



Серія «Фізична та біомедична електроніка»

Ю.І. Колесник, А.В. Кіпенський

ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

ХАРКІВ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Серія «Фізична та біомедична електроніка»

Ю.І. Колесник, А.В. Кіпенський

ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

**Навчальний посібник
для студентів денної та заочної форм навчання,
які вивчають квантову електроніку**

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 20.03.2015 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2016

УДК 621.375.826
ББК 32.86 – 5
К60

Рецензенти:

М.М. Рожницький, д-р физ.-мат. наук, професор кафедри біомедичної інженерії
Харківського національного університету радіоелектроніки;
О.В. Мужичук, д-р мед. наук, доцент кафедри онкології
Харківського національного медичного університету.

Колесник Ю.І.

Елементи та пристрої квантової електроніки : навч. посіб. / Ю.І. Колесник,
К60 А.В. Кіпенський. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – 320 с. – (Серія «Фізична та
біомедична електроніка»).

ISBN 966-8726-16-2

Наведено загальні відомості про твердотільні, газові та напівпровідникові лазери. Розглянуто застосування різних типів лазерів у науці, техніці, спеціальних технологіях, а також в медицині.

Посібник призначений для студентів денної та заочної форм навчання, які вивчають квантову електроніку.

Іл. 149. Табл. 22. Бібліогр. 42 назви.

УДК 621.375.826
ББК 32.86 – 5

ISBN 966-8726-16-2

© Ю.І. Колесник,
А.В. Кіпенський, 2016.

ВСТУП

Квантова електроніка – це сучасна галузь електроніки, що охоплює вивчення і розробку методів та засобів посилення і генерації електромагнітних коливань на основі ефекту вимушеного випромінювання атомів, молекул і твердих тіл. Найбільш великим прикладним розділом квантової електроніки є лазерна техніка, пов'язана із створенням лазерів різних типів, дослідженням властивостей лазерного випромінювання та його використанням для вирішення різних практичних завдань.

Лазер або оптичний квантовий генератор – технічний пристрій, що випускає електромагнітне випромінювання у вигляді спрямованого високо когерентного монохроматичного пучка. Слово «лазер» – аббревіатура англійського терміна «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», що в перекладі означає посилення світла в результаті вимушеного випромінювання.

В основі дії лазера лежить принцип накопичення світлової енергії з подальшим вивільненням її у вигляді монохроматичного променя. Найбільш характерними властивостями випромінювання є висока когерентність, монохроматичність, мала розбіжність променя, висока енергетична потужність.

З історії лазерної техніки відомо, що у 1954 році був створений перший молекулярний генератор, названий незабаром «Мазер» (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation – посилення мікрохвиль в результаті вимушеного випромінювання). Його розробили і створили незалежно і практично одночасно два колективи вчених – радянські вчені, що працювали у Фізичному інституті АН СРСР під керівництвом Н.Г. Басова і А.Л. Прохорова, і американські вчені, що працювали в Колумбійському університеті в США під керівництвом Ч. Таунса. Створений ними молекулярний генератор на пучку молекул аміаку генерував випромінювання з довжиною хвилі 1,25 см.

Перший лазерний апарат був створений у 1960 році: успіх випав на долю Т. Меймана. Йому вдалося отримати на рубіні генерацію випромінювання в оптичному діапазоні. У цьому ж році американським фізиком А. Джавалу, В. Беннету, Д. Ерріоту вдалося отримати генерацію когерентного оптичного випромінювання в електричному розряді в суміші неону і гелію. Так з'явилися перші гелій-неонові лазери. У 1964 році Н.Г. Басов, А.Л. Прохоров і американський фізик Ч. Таунс за розробку лазерної техніки були удостоєні Нобелівської премії з фізики.

У 1966 році К. Пател (США) створив перший лазер на суміші вуглекислого газу та азоту (CO₂ лазер). Істотним досягненням в науці і техніці стало створення напівпровідникових лазерів на основі гетеропереходів. Ці лазери працюють при кімнатних температурах без систем охолодження і термостабілізації.

На сьогодні квантова техніка вивчається у вищих навчальних закладах IV рівня акредитації в рамках ряду дисциплін, які відповідають навчальним планам підготовки бакалаврів відповідних спеціальностей.

Ці дисципліни входять у цикл професійноорієнтованих, що читаються студентам. Тому сучасний інженер не може обходитися у своїй діяльності без знань квантової техніки, принципів будови різних електронних пристроїв з використанням лазерів та випромінювальних діодів.

Квантова техніка спирається на відомості, отримані при вивченні дисциплін «Фізика», «Фізична хімія», «Вакуумна і плазмова електроніка», «Твердотільна електроніка» та інших.

У навчальному посібнику зібрані матеріали з лекційних курсів «Квантова електроніка» (лектор доцент Ю.І. Колесник) та «Фізіотерапевтичні апарати» (лектор професор А.В. Кіпенський), що читаються студентам, які навчаються на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП».

Перший та другий розділи посібника здебільшого присвячені теоретичним аспектам квантової електроніки. У третьому розділі міститься інформація щодо твердотільних, газових та напівпровідникових лазерів. Квантові прилади оптоелектроніки розглянуті у четвертому розділі. У п'ятому, шостому і сьомому розділах висвітлено питання застосування лазерів у науці та техніці. В останніх чотирьох розділах розглядаються аспекти застосування лазерів у медицині. Наведені технічні характеристики хірургічних і терапевтичних апаратів на лазерах та випромінюючих діодах.

Розділи 1–7 цього навчального посібника написані доцентом Ю.І. Колесником, а розділи 8–11 професором А.В. Кіпенським.

Автори висловлюють щире подяку рецензентам: М.М. Рожицькому, доктору фізико-математичних наук, професору кафедри біомедичної інженерії Харківського Національного університету радіоелектроніки та О.В. Мужичуку, доктору медичних наук, доценту кафедри онкології Харківського національного медичного університету за корисні зауваження, які було враховано в остаточному варіанті посібника.

Окрема подяка висловлюється Л.А. Пустовойтовій за кропітку роботу з редагування цього навчального видання.

1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

1.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ХВИЛЬОВОЇ ТЕОРІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Відповідно до законів квантової механіки, енергія електрона, зв'язаного в атомі, як і енергія атома, не може набувати довільних значень. Вона має певний дискретний ряд значень $E_0; E_1; E_2; \dots; E_n$, названих рівнями енергії. Цей набір енергетичних рівнів визначає енергетичний спектр атома. Дискретність енергетичного спектра властива також будь-якій системі взаємодіючих квантових частинок: молекулам, іонам, твердому тілу [1].

Рівень з найменшою енергією атома E_0 називається *основним рівнем*, решта рівнів $E_1, E_2, \dots, E_m, E_n$, відповідних вищій енергії атома, *збудженими*. У певних умовах взаємодії мікрочастинок електрон, як і будь-яка елементарна квантова частинка мікросвіту, може здійснювати стрибкоподібний перехід з одного рівня енергії на інший. При подібних квантових переходах атом випромінює або поглинає електромагнітні хвилі певними порціями – *квантами* енергії (фотонами $h\nu_{nm}$). Частоти електромагнітних хвиль при квантових переходах визначаються другим постулатом Н. Бора (1885–1962), який вперше був сформульований у 1913 році:

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}, \quad (1.1)$$

або

$$h\nu_{nm} = (E_n - E_m) = \Delta E,$$

де h – постійна Планка.

Рівність (1.1) по суті дуалістична, бо вона зв'язує хвильові (ν_{nm}) і квантові ($\Delta E = h\nu_{nm}$ – енергія фотона) властивості випромінювання. Цей постулат підтверджує закон збереження енергії при випромінюванні і поглинанні фотонів – квантових частинок мікросвіту. При поглинанні фотона $h\nu_{nm}$ енергія

атома збільшується на цю величину і здійснюється квантовий перехід атома з нижнього рівня енергії E_m на верхній E_n , а при випромінюванні фотона $h\nu_{nm}$ здійснюється квантовий перехід атома на нижній рівень E_m з частотою ν_{nm} .

Частотний спектр – набір частот електромагнітних хвиль, що випромінюються або поглинаються атомами речовини, тісно пов'язаний з енергетичним спектром атомів, тому дискретністю енергетичного спектра пояснюється лінійчатий характер спектрів поглинання або випромінювання електромагнітних хвиль атомами.

Отже, опис цих фізичних процесів базується як на хвильових, так і на квантових уявленнях.

Допустимо, що в цей момент часу атом знаходиться в одному із збуджених станів E_n . Такий стан атома нестійкий. Тому через дуже короткий час атом без якого-небудь зв'язку із зовнішнім випромінюванням перейде в один із станів з меншою енергією E_m , що через закон збереження енергії приведе до збільшення електромагнітного поля на величину $h\nu_{nm}$. Мимовільний (спонтанний) квантовий перехід – явище випадкове в часі і просторі. Передбачити його точно неможливо, можна говорити лише про вірогідність спонтанного квантового переходу A_{nm} із стану E_n в стан E_m в одиницю часу. Точніше кажучи, йдеться про швидкість зміни населеності квантовими частинками рівня E_n при спонтанних переходах, оскільки розмірність величини A_{nm} зворотна часу. Кількість квантових частинок в 1 см^3 речовини, що знаходяться на даному енергетичному рівні, називається **населеністю рівня** N_n і є найважливішою характеристикою рівня енергії E_n . Якщо розглядається велика кількість квантових частинок N_n на рівні в одиниці об'єму речовини, то повна кількість спонтанних переходів в одиницю часу з рівня E_n на рівень E_m рівна $N_n A_{nm}$, а потужність, що випромінюється, при цих переходах буде рівною $N_n(E_n - E_m)A_{nm}$.

Істотно, що вірогідність спонтанного переходу A_{nm} належить до одиниці часу. Тому вона може набувати значення від 0 до ∞ , на відміну від математичної вірогідності, що змінюється від 0 до 1.

Спонтанне випромінювання випускається безліччю незалежних атомів,

що не взаємодіють один з одним, унаслідок чого воно *некогерентне*.

Враховуючи випадковий характер спонтанних переходів, випромінювання всіх звичайних джерел світла – сонця, газорозрядних ламп, ламп розжарювання і т. ін. – є немонохроматичним, некогерентним і неполяризованим. Проте атом може перейти на рівень E_m не тільки мимоволі, але і під дією зовнішнього поля, якщо тільки частота електромагнітної хвилі близька до частоти переходу атома $\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$. Така резонансна хвиля якби прискорює перехід атома на рівень з меншою енергією. Квантові переходи, що відбуваються під впливом зовнішнього електромагнітного поля, називаються вимушеними (індукційованими) переходами. Вимушені переходи можливі і при резонансному поглинанні фотонів $h\nu_{nm}$ на збуджені рівні з найбільшою енергією. Як і спонтанне випромінювання, вимушене випромінювання і поглинання в речовині є імовірнісними процесами. При вимушеному випромінюванні кількість фотонів Z_{nm} , що випромінюються в 1 cm^3 речовини за 1 с , пропорційна населеності N_n верхнього рівня і спектральній густині випромінювання ρ_ν :

$$z_{nm} = B_{nm} N_n \rho_\nu = W_{nm} N_n.$$

Вперше і задовго до завершення квантової теорії проблему випромінювання квантових систем розглянув А. Ейнштейн. Він ввів коефіцієнти A_{nm} , B_{nm} , що характеризують спонтанні та індуковані переходи. Ці коефіцієнти зв'язані між собою співвідношеннями:

$$A_{nm} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{g_n}{g_m} \cdot B_{nm} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot B_{mn};$$

$$B_{mn} = \frac{g_n}{g_m} \cdot B_{nm},$$

де g_n ; g_m – кратність виродженості рівнів (кількість різних станів системи на певному рівні енергії).

Розглянемо два рівні з енергіями E_n і E_m , причому $E_n > E_m$. Нехай кількість частинок, що знаходяться в кожному з цих енергетичних станів, рівна

відповідно N_n і N_m . Якщо квантова система знаходиться під впливом зовнішнього електромагнітного поля, то в ній можливі три процеси: індуковане поглинання з вірогідністю в одиницю часу W_{mn} , індукційне випромінювання з тією ж вірогідністю в одиницю часу W_{nm} , спонтанне випромінювання, вірогідність якого в одиницю часу позначимо A_{nm} . Оскільки вірогідність індукованого переходу пропорційна спектральній густині випромінювання $W_{mn} = B_{mn}\rho_\nu$, Ейнштейн показав, якщо

$$N_n A_{nm} + N_n B_{nm} \rho_\nu = N_m B_{mn} \rho_\nu,$$

то:

$$\rho_\nu = \frac{A_{nm}}{B_{nm}} \cdot \frac{N_m}{(N_m - N_n)},$$

оскільки розподіл Больцмана

$$N_m = N_n \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) \quad \text{і} \quad B_{mn} = B_{nm}; \quad A_{nm} = \frac{8\pi\nu^3 h}{c^3} \cdot B_{nm},$$

де B_{mn} – вірогідність випромінювання (поглинання) в одиницю часу при одиничній густині випромінювання $\rho_\nu = 1$. При $g_m = g_n = 1$ можна отримати формулу спектральної густини випромінювання М. Планка:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}.$$

У цій формулі коефіцієнт $\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$ визначає кількість коливань (осциляторів) в одиниці об'єму і в одиничному інтервалі частоти для вільного простору; $\frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$ – середня кількість фотонів на одне коливання квазімонохроматичного випромінювання; $h\nu$ – енергія одного фотона.

Отже, зі збільшенням частоти вірогідність спонтанного переходу різко збільшується. Наприклад, при переході від сантиметрових хвиль ($\lambda = 5$ см) до видимої ділянки спектра ($\lambda = 0,5$ мкм) вірогідність спонтанного випромінювання зростає в 10^{15} разів. Відзначимо, що при $h\nu \gg kT$ система вироджується у квантово-механічну, а при $h\nu \ll kT$ – є класичною механічною.

ною системою.

Не всі квантові переходи можливі, деякі з них дозволені, а деякі заборонені. У квантовій механіці існують правила відбору, які регламентують можливі квантові переходи, тобто визначають можливість квантового переходу з одного енергетичного стану в інший. Заборонені і дозволені переходи визначаються вірогідністю переходу (рівень, з якого правилами відбору переходи заборонені і який, будучи коли-небудь збуджений, може існувати тривалий час, називається *метастабільним*).

Існують наближення, в яких дозволені квантові переходи: квадрупольні, магнітні і безвипромінювальні. Для розуміння принципу роботи лазерів найважливішими з них є *безвипромінювальні переходи*, при яких квантові частинки віддають або отримують енергію без випромінювання фотонів, взаємодіючи з іншими системами (зіткнення частинок і т. ін.). Вони також характеризуються імовірнісними величинами. Вірогідністю *безвипромінювального* переходу S_{nm} є середня кількість актів віддачі або отримання квантів енергії однією частинкою в одиницю часу.

Якщо можливі квантові переходи з випромінюванням і без випромінювання, то повна вірогідність квантових переходів рівна сумі вірогідностей:

$$P_{nm} = A_{nm} + W_{nm} + S_{nm},$$

де $W_{nm} = B_{nm}\rho_\nu$.

Перейдемо тепер до речовини, в якій є два збуджені рівні E_n і E_m з населеностями N_n і N_m . Якщо населеність N_n рівня E_n більша населеності N_m рівня, розташованого нижче ($N_n > N_m$), то таку речовину називають *активною*. При дії зовнішнього електромагнітного поля проліт фотонів крізь активну речовину викликає вимушене випромінювання все нових і нових фотонів. Якщо кількість актів випромінювання перевищує кількість актів поглинання, то відбувається лавиноподібне збільшення потоку фотонів. Наростання інтенсивності потоку по довжині активної речовини підпорядковується експоненціальному закону:

$$I_x = I_0 e^{Gz},$$

де $G \cong \frac{16\pi^2}{hc} \cdot \frac{\nu}{\Delta\nu} \cdot (N_n - N_m) \cdot |D_{mn}|^2$ – коефіцієнт квантового посилення;

D_{mn} – матричний елемент дипольного моменту квантового переходу.

Величина $(N_n - N_m) = \Delta N$ – так звана **інверсія населеностей рівнів** (повернення населеностей рівнів активної речовини), тобто таке співвідношення між населеностями цієї пари енергетичних рівнів активної речовини, при якій кількість квантових частинок на верхньому рівні більша, ніж на нижньому. У природних умовах, згідно із законом Больцмана, нижні рівні заселені квантовими частинками густіше, тобто в умовах термодинамічної рівноваги при будь-якій температурі стан з нижчою енергією повинен мати більшу населеність, чим стан з вищою енергією, так що:

$$N_n = N_m \cdot \frac{g_m}{g_n} \cdot e^{-\frac{E_n - E_m}{kT}}$$

Тому, щоб отримати посилення вимушеного випромінювання, необхідно штучно збільшити населеність верхнього або зменшити населеність нижнього рівня, тобто необхідно інвертувати населеності активної речовини.

Нерівноважний стан системи, для якого має місце інверсія населеностей рівнів, у літературі часто називається станом з **негативною температурою**. Цей термін еквівалентний терміну «інверсія населеностей». Дійсно, при будь-яких реальних значеннях температури інверсія населеностей завжди менше нуля, а підвищення температури не створює інверсії населеностей. При порушенні термодинамічної рівноваги, коли $N_n > N_m$, відношення $\frac{N_n}{N_m} = e^{\frac{h\nu_{nm}}{kT'}} > 1$, для чого необхідно, щоб $T' < 0$. У цьому випадку величина T' – це не температура у звичайному розумінні, а умовна величина, що характеризує відношення населеностей, при якому стан системи нерівноважний.

При $T' \leq 0$ співвідношення $\frac{N_n}{N_m} = e^{-\frac{h\nu_{nm}}{k(-T')}} = e^{\frac{h\nu_{nm}}{kT'}}$ більше одиниці,

$e^{\frac{h\nu_{nm}}{kT'}} \geq 1$, а це справедливо при $N_n > N_m$.

Стан з негативною температурою $T' = \frac{E_n - E_m}{k \ln(N_n - N_m)} < 0$ при $\frac{N_n}{N_m} > 1$ є не-

рівноважним. Якщо не буде притоку енергії ззовні, система швидко перейде в рівноважний стан з позитивною температурою за рахунок спонтанного ви-

промінювання. Аналіз нерівності для T' показує, що перехід від позитивної до негативної температури відбувається через нескінченно високу температуру. Можна говорити, що негативна температура вища нескінченно високої температури. У стані з негативною температурою система має запас енергії, який вона може випромінювати у вигляді електромагнітних хвиль. Саме на цьому явищі оснований принцип роботи квантових приладів.

Як ми вже з'ясували, однією з найважливіших характеристик випромінювання є його спектр, тобто набір монохроматичних хвиль, які створюють випромінюване електромагнітне поле. Монохроматична хвиля – це ідеалізація, строго монохроматичних коливань немає. Кожна реальна хвиля лазера є *квазі-монохроматичною*, тобто є видом коливань електромагнітного поля з середньою (центральною) частотою $\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \omega_0$ і деякою шириною спектра $\Delta\nu_N$.

Такі хвилі мають обмежений вузькополосний спектр, який іноді може складатися з декількох монохроматичних складових.

Відповідно до постулату Бора $\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$ спектр випромінювання ідеального гармонійного осцилятора повинен являти нескінченно тонку спектральну лінію, оскільки ширина енергетичних рівнів у цьому співвідношенні не обумовлена, а розуміється нескінченно тонкою. Фактично рівні енергії мають кінцеву ширину. Тому випромінювання відбувається у деякому інтервалі частот біля ν_0 . На частоті ν_0 енергія випромінювання має найбільше значення та убуває на частотах, що знаходяться по обидві сторони від неї. Частотний інтервал, в межах якого інтенсивність випромінювання або поглинання убуває удвічі порівняно з максимальним значенням, називається *шириною спектральної лінії* $\Delta\nu_N$. Ширина спектральної лінії, визначувана спонтанними переходами, є *природною шириною*:

$$\Delta\nu_N = \frac{A_{nm}}{2\pi} = \frac{32\pi^3 \nu_{nm}^3}{3hc^3 g_m} \cdot |D_{nm}|^2,$$

де $A_{nm} = \frac{1}{\tau_{nm}}$ – вірогідність спонтанного переходу; g_m – кратність виродженості рівня; $|D_{nm}|$ – матричний елемент дипольного моменту переходу.

Величина A_{nm} зворотно пропорційна середньому часу перебування частинок на збудженому енергетичному рівні, тобто часу, за який населеність цього збудженого рівня убуває в $e = 2,71$ рази.

З природною шириною спектральної лінії дуже тісно пов'язане інше важливе поняття квантової механіки – **час життя** квантової частинки на збудженому рівні. Кількість частинок, що спонтанно покидають збуджений енергетичний рівень за інтервал часу dt , визначається рівнянням:

$$dN_n(t) = -A_{nm}N_n(0)dt,$$

або:

$$\frac{dN_n(t)}{N_n(0)} = -A_{nm}dt.$$

Звідси:

$$N_n(t) = N_n(0)e^{-A_{nm}t} = N_n(0)e^{-\frac{t}{\tau_{nm}}},$$

де $N_n(0)$ – населеність n -го збудженого рівня в початковий момент часу $t = 0$.

Таким чином, середній час життя квантових частинок визначається величиною:

$$\tau_{nm} = \frac{1}{A_{nm}} = \frac{1}{2\pi\Delta\nu_N}.$$

Природна ширина лінії дуже мала. Оскільки вона не пов'язана ні з якими зовнішніми діями, її штучно зменшити неможливо. У діапазоні випромінювання видимого спектра ширина такої лінії відповідає десяткам кілогерц, на сантиметрових хвилях – часткам герца.

Відзначимо також, що ширина спектральної лінії визначається сумарною шириною рівнів ΔE_m і ΔE_n , між якими відбувається квантовий перехід, тобто $\Delta\nu_{nm} = \frac{\Delta E_m + \Delta E_n}{h}$. Форми ліній (рис. 1.1) випромінювання і поглинання однакові та описуються рівнянням контуру спектральної лінії $F(\nu)$, яке називають **лоренцевою формою лінії** або іноді **формфактором**:

$$F(\nu) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\Delta\nu_N}{(\nu - \nu_0)^2 + \Delta\nu_N^2}.$$

Лоренцева форма лінії нормується виразом $\int_{-\infty}^{\infty} F(\nu) d\nu = 1$. У реальних активних речовинах діють різні причини, що приводять до так званого **розширення спектральної лінії**, коли спектр випромінювання реального квантового осцилятора є смугою частот. Однією з основних причин розширення спектральної лінії є зменшення часу життя квантових частинок у збудженому стані під впливом недосконалості кристалів і неоднорідності електромагнітних полів.

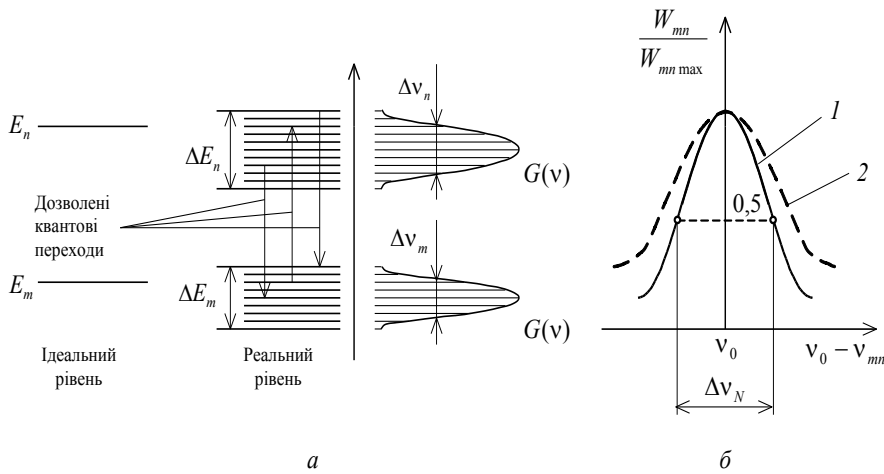


Рисунок 1.1 – Подання ідеального і реального енергетичних рівнів: ΔE_n , ΔE_m – реальна ширина енергетичного рівня, $\Delta \nu_n$, $\Delta \nu_m$ – ширина спектральної лінії (а); форма і ширина спектральної лінії випромінювання 1 – природна; 2 – розширена (б)

Ширина енергетичного рівня обумовлена **принципом невизначеності**, який стверджує, що, на відміну від фізичного тіла, положення та імпульс якого строго визначені, квантова частинка не може знаходитися в станах, в яких координати її центра інерції та імпульс одночасно набувають цілком певних, точних значень. Якщо час життя квантової частинки на якому-небудь збудженому енергетичному рівні має величину τ_{mn} , то, згідно з принципом невизначеності, ширина цього енергетичного рівня невизначена (рис. 1.1, а):

$$\Delta E_{mn} \sim \frac{\hbar}{\tau_{mn}},$$

де $\hbar = \frac{h}{2\pi} = (1,0545887 \pm 0,0000054) \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постійна Планка (квант дії).

Таким чином, ширина енергетичного рівня ΔE_m залежить від часу життя частинки у цьому енергетичному стані. Найбільш широкими виявляються рівні, що мають малий час життя частинки. Чим більше величина A_m , тим менше час життя і навпаки. Системи, використовувані у приладах квантової електроніки, повинні мати метастабільний рівень, що забезпечує тривалу взаємодію зі збурюючим електромагнітним полем. Метастабільні рівні мають малу ширину. Основний енергетичний рівень, що характеризується нескінченно довгим часом життя частинок, має нескінченно малу ширину енергетичного рівня. Наявність розширення енергетичного рівня приводить до певного розподілу потужності випромінювання за частотою, яка характеризується формою лінії поглинання або випромінювання.

1.2. ПОСТУЛАТИ І ПРИНЦИПИ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ

Бар'єром для вивчення квантової механіки служить її математичний апарат і складність сприйняття часом дивних та абстрактних квантово-механічних міркувань. Протягом першої чверті ХХ століття накопичилися певні теоретичні й експериментальні дані про явища мікросвіту, знайомство з якими бентежило поважних учених, прихильників класичної фізики. Вони говорили: «Що ж хорошого в квантовій теорії, якщо вона не може відповісти на прості запитання: чому рівні частинки дискретні? Яке точне положення частинки?» і т. ін.

Відповідь В. Гейзенберга на здивовані запитання була приблизно такою: «Я не зобов'язаний відповідати на такі запитання, бо ви не можете їх задати експериментально» [1, 3].

У 1926–1930-ті роки роботами Е. Шредінгера, В. Гейзенберга, Н. Бора, М. Борна, Л. де Бройля, П. Дірака ці складнощі сприйняття були усунені. Цим і ряду інших учених вдалося отримати несуперечливий опис поведінки частинок мікросвіту, створити строгу і величну квантову теорію. Пояснимо коротко її основні положення.

Статистичну безліч квантових частинок називають *квантовим ансамб-*

лем мікрочастинок – набором однотипних мікроскопічних частинок, які незалежно одна від одної знаходяться в однакових макроскопічних умовах. Ансамблем вимірювань є сукупність однотипних вимірювань, проведених над системою, що знаходиться в заданому квантовому стані.

Належність мікрочастинок до того або іншого ансамблю визначається хвильовою функцією Ψ (функцією стану) або матрицею густини ρ_{mn} . Хвильова функція і матриця густини є функціями повного набору фізичних величин, який визначається природою і кількістю степенів вільності квантової системи в цілому.

Як і будь-яка наукова дисципліна, квантова механіка має свої постулати. Наслідки, що витікають з постулатів квантової механіки, підтверджені численними експериментами. Розглянемо *постулати* квантової теорії.

1. Основним постулатом теорії є рівняння Ервіна Шредінгера (1887–1961):

$$\hat{H}(p; q; t) \cdot \Psi = j\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t},$$

де $\hat{H}(p; q; t)$ – *гамільтоніан*, оператор повної енергії квантової частинки; Ψ – функція стану (*хвильова функція*); p , q – імпульс та узагальнена координата відповідно; t – час; $j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця.

Це феноменологічне рівняння руху квантової частинки мікросвіту з'явилося науковим передбаченням та узагальненням експериментальних даних, накопичених фізикою до 1926 року. Воно так само, як і рівняння другого закону Ньютона в класичній механіці і рівняння Максвелла в електродинаміці, є математичним поданням фундаментальних фізичних процесів. Це рівняння пояснює дискретність енергетичних рівнів і подвійну корпускулярно-хвильову природу випромінювання.

З класичної механіки відомо, що повна енергія фізичної системи E є сумою кінетичної ε_K і потенційної V енергії і є функцією імпульсу p та координати q :

$$E = \varepsilon_K + V = E(p; q).$$

Такі функції в класичній механіці називаються функціями Гамільтона, а оператор від повної енергії є гамільтоніаном і позначається $\hat{E} = \hat{H}(\hat{p}; \hat{q})$.

Формалізований запис рівняння Шредінгера базується на інших постулатах квантової теорії. Мета введення постулатів полягає в тому, щоб додати квантовим поняттям певний фізичний зміст, скласти і розв'язати диференціальні рівняння, що описують різні явища мікросвіту.

2. Вся інформація фізичної системи міститься у функції стану. Функцію стану називають також хвильовою функцією і позначають через Ψ . Фізичною системою є те, що підлягає вивченню: електрони, нуклони, фотони, атом і т.ін. В результаті вивчення фізичної системи отримують набір дійсних чисел – фізично спостережуваних величин: значення координат, імпульсу, енергії і т. ін.

У квантовій теорії передбачається, що інформація про ці числа, тобто про поведінку фізичної системи, міститься у функції Ψ . Завдання полягає в тому, щоб «витягнути» необхідну інформацію з функції стану Ψ . Вважається, що функція стану залежить від координат частинок, складових системи, а також від часу. Для однієї частинки $\Psi = \Psi(x; y; z; t)$, або $\Psi(q; t)$, де $x; y; z$ – декартові координати частинки.

На Ψ -функцію накладаються такі обмеження: вона повинна бути у своїй області визначення безперервною, однозначною і кінцевою. Спосіб «витягання» інформації з функції $\Psi(q; t)$ встановлюється іншими постулатами.

3. Кожній фізичній величині (енергії, імпульсу, координатам) приводиться у відповідність лінійний самоспряжений (ермітів) оператор. Під оператором розуміють дію, що проводиться над деякою функцією. Строгіше оператор можна визначити як математичне перетворення, що зіставляє елементи однієї множини з елементами іншої. Оператор позначатимемо тією ж буквою, що і фізичну величину, тільки над символом ставитимемо «позначку», наприклад, \hat{E} – оператор енергії. Простим оператором є оператор диференціювання $\hat{D} = \frac{d}{dx}$. Цей оператор ставить у відповідність кожній функції $f(x)$, що диференціюється, її похідну $f'(x)$. Оператор $\hat{O} = \sqrt{\quad}$ нелінійний, він позначає операцію добування квадратного кореня. У разі диференціювання маємо справу з лінійним оператором.

Принципами квантової теорії є принципи невизначеності, відповідності і суперпозиції.

У класичній механіці при вивченні руху частинки по траєкторії передба-

часться, що в кожен момент часу у частинки існує певна координата і певний імпульс руху. Проте для мікрочастинок це положення не справедливе. Частинці з імпульсом \bar{p} відповідає довжина хвилі $\bar{\lambda}$, визначувана із співвідношення

Л. де Бройля (1892): $p = \hbar k = \frac{\hbar 2\pi}{\lambda}$. Оскільки довжину хвилі неможливо визна-

чити для інтервалу, простору, рівного точці, координата і імпульс не можуть одночасно мати точних значень. Неможливість точного визначення координати електрона в атомі аналогічна «розмазанню його за об'ємом атома».

Подібна невизначеність існує також між енергією E і часом t : у кожен даний момент часу енергія частинки не визначена точно через те, що у фіксований момент часу не можна визначити частоту ν , а отже, і енергію, пов'язану з частотою співвідношенням:

$$E = \hbar\omega = 2\pi\hbar\nu.$$

При фіксованому x або t не можна судити про величину імпульсу або енергії відповідно не тому, що ці величини невідомі, а тому, що ці поняття позбавлені змісту так само, як «довжина хвилі в точці» або «частота в певний момент часу», оскільки для визначення довжини хвилі потрібна деяка область простору, а для визначення частоти – деякий інтервал часу. **Принцип невизначеності** в 1927 році сформулював В. Гейзенберг так: зв'язані вимірювані величини $E \rightarrow t, p \rightarrow x, \varphi \rightarrow \bar{n}$ і т. ін. квантових систем одночасно можуть бути визначені до значення постійної Планка \hbar , наприклад $\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar$; $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$. Іншими словами, існують зв'язані пари фізичних вимірюваних величин, що характеризують стан квантових частинок, які не можуть бути точно зміряні одночасно.

З'ясуємо співвідношення невизначеностей для часу та енергії. Врахуємо, що в експерименті досліджується не повна енергія якого-небудь стану, а різниця енергій під час переходу частинки з одного стану в інший. Тому треба розглядати невизначеність в отриманні різниці енергії двох станів: $\Delta(E_n - E_m)$. Під $\Delta t \sim \tau$ розуміють час життя атома у збудженому стані. Таким чином $\tau \cdot \Delta(E_n - E_m) \geq \hbar$. Розкиду різниці енергій відповідає розкид у частоті

$$\Delta\omega = \frac{\Delta(E_n - E_m)}{\hbar},$$

який можна прийняти за ширину спектральної лінії випромінювання. Використовуючи вираз $\Delta\omega$, отримаємо, що $\tau \cdot \Delta\omega \geq 1$. Отже, чим

більше ширина спектральної лінії, тим менше час життя частинки у збудженому стані. Враховуючи отримане співвідношення, можна сказати, що чим довше час вимірювання, тим точніше може бути зміряна енергія.

Розглянемо співвідношення невизначеностей, що зв'язує кількість фотонів і фазу. Невизначеність енергії можна подати як добуток енергії одного фотона на невизначеність кількості фотонів Δn_ϕ . Тоді $\hbar\omega \cdot \Delta t \cdot \Delta n_\phi \geq \frac{\hbar}{2}$. Але

$\omega \cdot \Delta t = \Delta\phi$ – це невизначеність фази. Отже, $\Delta\phi \cdot \Delta n_\phi \geq \frac{1}{2}$, тобто чим більше невизначеність в кількості фотонів, тим точніше можна зміряти фазу.

Принцип невизначеності, записаний у вигляді $\Delta v \cdot \Delta x \geq \frac{2\pi\hbar}{m}$, при $m \rightarrow \infty$ показує, що чим більше маса частинки, тим з більшою точністю деякі поняття квантової теорії відповідають поняттям класичної механіки. Дійсно, якщо маса частинки нескінченна ($m \rightarrow \infty$), то відношення $\frac{2\pi\hbar}{m} \rightarrow 0$, тобто координата і швидкість частинки можуть бути точно визначені. У цьому полягає **принцип відповідності**, сформульований в 1918 році Н. Бором: при розробці теорії необхідно керуватися тим міркуванням, що, коли квантові числа системи набувають все більших і більших значень, випромінювання, що випускається, повинно асимптотично прагнути до значення, визначуваного класичними законами. Іншими словами, закони нової теорії повинні переходити в закони класичної фізики, коли квантова дискретність прагне до нуля, тобто коли величина кванта дії при переході до межі $\lim \frac{2\pi\hbar}{m} \rightarrow 0$ нехтовно мала.

Третім фундаментальним принципом квантової теорії, який узаконує обґрунтованість застосування лінійних операторів і матричного математичного апарата, є **принцип суперпозиції**. У загальному вигляді він формулюється таким чином: якщо на консервативну систему діє одночасно декілька збуджуючих дій, то реакція системи на їх сумісний ефект еквівалентна сумі ефектів, що викликаються кожною із збуджуючих дій окремо. Наприклад, це твердження з повною впевненістю можна віднести до так званого чистого стану ансамблю квантових частинок. Ці міркування взагалі стосуються квантових систем, зміст принципу суперпозиції можна звести до такого: якщо квантова

система знаходиться в станах, що описуються хвильовими функціями

$\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n$ то лінійна комбінація (суперпозиція) цих функцій $\Psi = \sum_1^n a_n \Psi_n$

також є хвильовою функцією, що описує один з можливих власних станів. Зокрема, ансамбль квантових частинок (статистичний набір мікрочастинок), що описується певною хвильовою функцією, називають чистим станом.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Назвіть причини виникнення квантової електроніки.
2. Охарактеризуйте основні етапи становлення і розвитку квантової електроніки як науки.
3. Назвіть основоположників квантової електроніки.
4. У чому різниця між «лазером» і «мазером»?
5. Що входить у поняття «лазерна техніка»?
6. У чому різниця між основними, збудженими і метастабільними енергетичними рівнями?
7. Поясніть термін «інтерференція» лазерного випромінювання.
8. Поясніть термін «поляризація» оптичного випромінювання.
9. Що таке дифракція оптичного випромінювання?
10. Що таке квант енергії?
11. Що таке частотний спектр електромагнітного випромінювання?
12. Напишіть рівняння, що зв'язує енергію і частоту електромагнітної хвилі.
13. Охарактеризуйте основні положення хвильової теорії випромінювання.
14. Які види квантових переходів ви знаєте?
15. Що таке «населеність квантового рівня»?
16. Яке випромінювання називається когерентним?
17. Яку речовину називають активною?
18. Що таке «інверсія населеності квантового рівня»?
19. Що таке «речовина з негативною температурою»?
20. Чому реальна електромагнітна хвиля є квазімонохроматичною?
21. Чим визначається ширина спектральної лінії випромінювання?
22. Чим визначається ширина енергетичного рівня?
23. Чим визначається час життя квантової частинки?

24. Назвіть три основні постулати квантової теорії.
25. Що описує рівняння Е. Шредінгера?
26. Що таке хвильова функція (функція стану) і що вона характеризує?
27. Що таке самоспряжений (ермітів) оператор і які операції з його допомогою виконують в квантовій фізиці?
28. Назвіть три основні принципи квантової теорії.
29. Поясніть принцип невизначеності В. Гейзенберга.
30. Сформулюйте принцип відповідності Н. Бора.

2. КВАНТОВІ ПІДСИЛЮВАЧІ. ОПТИЧНІ РЕЗОНАТОРИ

2.1. КВАНТОВІ ПІДСИЛЮВАЧІ

2.1.1. Класифікація, принцип дії та основні характеристики квантових підсилювачів

Пристрої, здатні за рахунок внутрішньої енергії електронів, зв'язаних з атомами і молекулами активної речовини, підсилювати малі сигнали без створення форми електромагнітного поля, називаються *квантовими підсилювачами* (КП). Від всіх інших типів електронних підсилювачів, в яких використовуються вільні електрони, що підпорядковуються законам класичної механіки, вони відрізняються принципом дії і малим рівнем шумів. За довжиною хвилі електромагнітного поля, що підсилюється ними, квантові підсилювачі діляться на дві великі групи: підсилювачі НВЧ-діапазону довжин хвиль та оптичні квантові підсилювачі (ОКП) [1, 3, 4].

Проблема створення підсилювачів, що мало шумлять, була актуальною для учених-радіофізиків, оскільки ці пристрої змогли б виявляти дуже малі сигнали. Успіх радіоспектроскопії, науки, яка досліджує поглинання радіохвиль атомами і молекулами різних речовин, дозволив зробити висновок про застосування для цієї мети внутрішньої енергії і властивостей квантових частинок.

В основі роботи оптичних квантових підсилювачів лежить здатність збуджених квантових частинок віддавати свою внутрішню енергію під впливом зовнішнього електромагнітного поля. За рахунок внутрішньої енергії квантової системи відбувається квантове підсилення випромінювання, оскільки проліт фотонів крізь активну речовину викликає народження нових таких самих фотонів. При цьому відбувається лавинне множення фотонів в речовині. Рух частинок і пов'язана з ним кінетична енергія до процесу підсилення не залучаються, через що відсутні характерні для звичайних електронних пристроїв дробові шуми. Основними ж джерелами шумів є спонтанне випромінювання активного середовища і теплове випромінювання дисипатив-

них елементів. При індукованому випромінюванні кванти електромагнітного поля як початкові, так і ті, що випромінюються квантовою системою, повністю тотожні, тобто мають однакові частоти, поляризацію і напрями поширення, що і визначає когерентність квантового випромінювання.

Отримання інверсії населеностей енергетичних рівнів активного середовища є необхідною, але не достатньою умовою для отримання підсилення. У підсилювачі важливо також забезпечити належну взаємодію активної речовини і випромінювання, що підсилюється. Ця взаємодія може відбуватися як в режимі біжучої хвилі, (квантові підсилювачі біжучої хвилі – ОКПБХ), так і в режимі стоячої хвилі. В останньому випадку випромінювання багато разів проходить через один і той же зразок активної речовини, поміщений в об'ємний або відкритий резонатор. На такому принципі побудовані резонаторні (регенеративні) квантові підсилювачі, які розділяються на прохідні, кільцеві, однонаправлені і відбивні.

Розглянемо основні характеристики квантових підсилювачів.

Коефіцієнт підсилення K_{Π} – величина, що показує в скільки разів потужність вихідного сигналу підсилювача перевищує потужність вхідного сигналу. Коефіцієнт підсилення завжди залежить від частоти підсилювального випромінювання.

Інтервал частот, в якому коефіцієнт K_{Π} достатньо великий, називають **смугою пропускання** підсилювача $\Delta\nu_{\Pi}$. Смуга пропускання визначається як область частотної характеристики, в якій квадрат коефіцієнта підсилення K_{Π}^2 відрізняється від квадрата найбільшого коефіцієнта підсилення K_0^2 не більше ніж в два рази, тобто:

$$\left(\frac{K_{\Pi}}{K_0}\right)^2 = \frac{1}{2}.$$

На практиці часто користуються таким поняттям, як **широкосмуговість** квантового підсилювача:

$$P = \Delta\nu_{\Pi}\sqrt{K_0},$$

де K_0 – коефіцієнт підсилення на резонансній частоті ν_0 .

Третьою найважливішою характеристикою підсилювача є потужність

шуму $P_{\text{ш}}$, яка обумовлює в основному **чутливість** квантового підсилювача, тобто його здатність підсилювати дуже слабкі вхідні сигнали. Чутливість не можна підвищувати нескінченно, бо вона обмежена флуктуаціями випадкового сигналу у вхідних елементах і рівнем принципово неусувного спонтанного випромінювання.

Добротність КП визначається відношенням резонансної частоти випромінювання до смуги пропускання:

$$Q = \frac{\nu_0}{\Delta \nu_{\text{п}}}.$$

Динамічний діапазон вимірюється зміною в часі рівня вихідного сигналу від мінімального значення, обмеженого шумами, до максимального значення, що приводить до насичення квантового робочого переходу, тобто зменшення інверсії населеності до нуля. Динамічний діапазон можна збільшити, якщо зменшити час релаксації активної речовини (наприклад, процес встановлення рівноважного магнітного моменту парамагнетика – речовини, що намагнічується під дією зовнішнього магнітного поля і у його напрямі).

Коефіцієнт квантового підсилення G характеризує збільшення амплітуди електромагнітної хвилі, що проходить крізь активну речовину, за експоненціальним законом:

$$E = E_0 \exp zG,$$

де E_0 – амплітуда вхідної хвилі; Z – відстань, пройдена хвилею в активній речовині. На відстані $z = \frac{1}{G}$ амплітуда поля збільшується в $e = 2,71$ раз. Активна речовина тим ефективніше, чим більша кількість квантових частинок знаходиться на інвертованому рівні, тобто чим більше інверсія населеностей і

дипольний момент квантового переходу $\left| \vec{D}_{mn} \right|$:

$$G \approx \frac{16\pi^2}{he} \cdot \frac{\nu_0}{\Delta \nu_{\text{п}}} \cdot \Delta N \cdot \left| \vec{D}_{mn} \right|^2.$$

Потреба у малошумових підсилювачах дуже велика для сантиметрових і міліметрових радіохвиль НВЧ-діапазону. Тому квантові підсилювачі широко застосовуються як у земних лініях з ретрансляційними супутниками зв'яз-

ку, так і в космічних лініях для радіозв'язку з міжпланетними станціями. Вони значно збільшили дальність дії радіолокаторів і радіотелескопів.

У промисловості і в наукових дослідженнях широко застосовуються також оптичні квантові підсилювачі. Ці пристрої у поєднанні з лазерами дають можливість отримувати високі рівні енергії (до 10^3 Дж) і потужності (до 10^{10} Вт) когерентного оптичного випромінювання. Вони генерують надкороткі імпульси лазерного випромінювання тривалістю $10^{-10} \dots 10^{-12}$ с. Оптичний квантовий підсилювач входить до складу приймальної частини оптичної лінії зв'язку і служить для виявлення слабких світлових сигналів у широкій смузі частот. До появи оптичних квантових підсилювачів в оптиці були відсутні способи когерентного посилення світла. Разом з деякими особливостями, а саме – наявністю в підсилювачах великої кількості типів коливань і спонтанного випромінювання, оптичні квантові підсилювачі мають багато спільного з квантовими підсилювачами радіодіапазону довжин хвиль.

2.1.2. Властивості парамагнітних кристалів

Речовини, що містять елементарні магнітні некомпенсовані моменти у внутрішніх недобудованих оболонках атома, називаються парамагнетиками. Використовувати для конструювання квантових підсилювачів діамагнітні кристали з парамагнітними іонами запропонував Н. Бломберген. До них належать елементи групи заліза: Cr; Nd; Mn; Fe; Ni; Co з недобудованою $3d$ -оболонкою і групи рідкоземельних елементів з недобудованою $4f$ -оболонкою. Квантові властивості електронів, як відомо, виявляються в тому, що вони, крім маси m і заряду e , характеризуються елементарною дозою магнетизму – магнітним моментом m_i ; орбітальним моментом l і власним моментом кількості руху – спіном s , вектор якого направлений протилежно елементарному магнітному моменту $m_i \cong \mu_B = \frac{\hbar e}{2mc}$ (магнетон Бора). Образно кажучи, електрон поводить себе як елементарний магнітик, намагнічений уздовж осі обертання, оскільки частинка, що обертається, має заряд і магнітний момент, рівний магнетону Бора, причому це «обертання» електрона не можна ні зупинити, ні прискорити ніякими силами природи. Можна лише змінити орієнтацію його осі «обертання» в просторі.

Коротко розглянемо, якими шляхами це можна здійснити. В атомах і молекулах спостерігається утворення електронних пар з елементарними механічними і магнітними моментами, що взаємно компенсуються. Більшість речовин, що мають спарені електрони, діамагнітна. Діамагнетики володіють властивістю набувати під впливом зовнішнього магнітного поля внутрішнє магнітне поле, протилежне за напрямом зовнішньому полю. Такі речовини із заміщенням в кристалічній структурі деяких діамагнітних іонів парамагнітними іонами і запропонував Н. Бломберген як активні речовини в квантових підсилювачах. Оптимальна концентрація в діамагнетику парамагнітних іонів виявилася рівною 0,01...0,3 %.

За відсутності зовнішнього магнітного поля елементарні моменти неспарених електронів орієнтовані хаотично. За наявності зовнішнього поля магнітні моменти неспарених електронів орієнтуються або у напрямі поля, або проти нього, причому в цих станах енергія іона-парамагнетика буде різною. В цьому випадку ми знову стикаємося з ефектом розщеплювання рівня іона на магнітні підрівні (ефект Зеємана). Залежно від кількості неспарених електронів і спину ядра парамагнітний іон може мати набір з декількох магнітних підрівнів. Типовим представником парамагнетиків є *кристал рубіну* (окисел алюмінію Al_2O_3 з домішкою окислу хрому Cr_2O_3). Парамагнетиком в рубіні є тричі іонізовані іони хрому Cr^{3+} , у яких на внутрішній недобудованій оболонці є три неспарені електрони. Повний магнітний момент іона визначається сумою орбітальних і спінових моментів електронів. Такий іон, введений у кристалічну решітку окислу алюмінію, випробовує дію сильного внутрішнього електричного поля, що створюється сусідніми діамагнітними іонами. Це поле, сумісне з електричним полем ядра іона хрому, змінює орбітальний рух електронів, зміщує і розщеплює енергетичні рівні електронів парамагнітного іона (ефект Штарка).

У цьому випадку спостерігається одночасна дія двох фізичних ефектів: по-перше, спин-орбітальна взаємодія між внутрішнім магнітним полем, створеним орбітальним рухом електронів, і їх елементарними магнітними моментами, в результаті якого електричне поле розщеплює енергетичний рівень на магнітні підрівні.

По-друге, подальше розщеплювання цих підрівнів на магнітні підрівні

відбувається вже у зовнішньому магнітному полі. Причому відстань між цими магнітними підрівнями – різниця енергій ($E_2 - E_1$) – залежатиме не тільки від величини, але і від орієнтації вектора напруженості зовнішнього магнітного поля \vec{H} відносно кристалографічної осі z активної речовини (рис. 2.1, де стрілками показані режими оптимального поглинання та індукованого випромінювання).

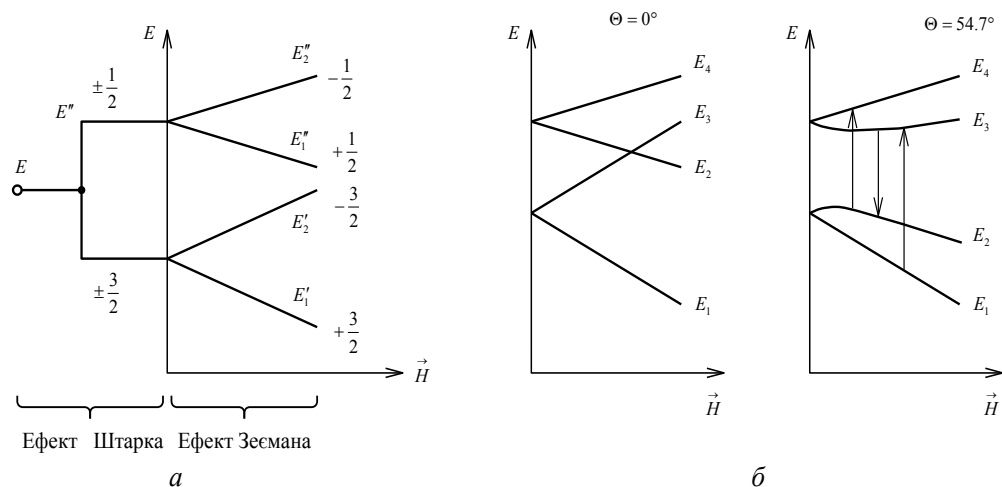


Рисунок 2.1 – Розщеплення основного рівня Cr^{3+} в кристалі рубіну під дією внутрішнього електричного поля і під дією зовнішнього магнітного поля \vec{H} (а) та залежність енергії іонів Cr^{3+} від зовнішнього магнітного поля при двох орієнтаціях поля відносно осі кристала $\Theta = 0^\circ$ або $\Theta = 54,7^\circ$ (б)

Це дуже важлива для практики обставина, оскільки, навмисно змінюючи орієнтацію векторів \vec{H} , можна змінювати відстань між розщепленими підрівнями і, отже, підстроювати частоту випромінювання. При цьому не виключена вірогідність вимушених переходів між розщепленими рівнями, які приводять до виборчого поглинання радіохвиль певної частоти – в цьому випадку можна говорити про явище електронного парамагнітного резонансу.

Вперше індуковані переходи між магнітними підрівнями експериментально виявив Е.К. Завойський в 1944 році. Незабаром на підставі цього відкриття були розроблені парамагнітні квантові підсилювачі.

Усе викладене підсумовуємо на прикладі рубіну. В електричному полі

кристала основний рівень іона хрому Cr^{3+} розщеплюється на два магнітні підрівні. Вони близько розташовані, кожний з них двічі вироджений $\left(\pm \frac{1}{2}; \pm \frac{3}{2}\right)$ і відрізняються один від одного величиною проекції сумарного магнітного моменту іона на вісь кристала $z\left(+\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}; +\frac{3}{2}; -\frac{3}{2}\right)$. Зовнішнє магнітне поле змінює енергію цих рівнів і розщеплює кожний з них ще на два підрівні.

У результаті одночасної дії електричного поля кристала і зовнішнього магнітного поля виходить чотири магнітних підрівні, положенням яких можна керувати, оскільки частоти їх переходів залежать від величини і напрямку магнітного поля.

За відсутності зовнішнього поля і при дії теплових коливань решітки кристала парамагнітні іони можуть також змінювати свою енергію, тобто переходити з одного магнітного підрівня на інше, змінюючи орієнтацію магнітного моменту в просторі – здійснювати *невипромінюючі релаксаційні пере-*

ходи. Якщо ж магнітний момент \vec{M}_0 змінюється або в часі, або за напрямом, то неминуче відбувається процес встановлення нового рівноважного магнітного моменту \vec{M}_1 парамагнетика – *парамагнітна релаксація*. Вона відбувається не миттєво, а за деякий інтервал часу, названий фізиками часом парамагнітної релаксації $t_{\text{ПР}}$. Іншими словами, за час парамагнітної релаксації век-

тор магнітного моменту з первинного положення \vec{M}_0 встановлюється у нове положення \vec{M}_1 з кутовою швидкістю прецесії $\omega_{\text{П}} = \frac{l}{mc} \cdot \vec{H}_0$, де \vec{H}_0 – напру-

женість магнітного поля. Вектор \vec{M}_0 можна подати компонентами: перпендикулярною \vec{M}_{\perp} і паралельною \vec{M}_{\parallel} до вектора \vec{H} , які в загальному випадку змінюються з різною швидкістю: тому прийнято говорити про поперечну і подовжню парамагнітну релаксацію. Це явище виконує певну функцію у роботі парамагнітних квантових підсилювачів.

Наприклад, у рубіні іони хрому Cr^{3+} взаємодіють один з одним і в цьому

випадку поперечна релаксація відбувається швидше подовжньої. Для підсилення радіохвиль НВЧ-діапазону застосовують і інші кристали: рутил TiO_2 ; смарагд $\text{Be}_3\text{Al}_3(\text{SiO}_3)_6$; вольфрамат кадмію і цинку з активаторами іонів хрому і заліза. При виборі кристала необхідно виконувати такі вимоги: парамагнітні іони повинні мати більше двох магнітних підрівнів; ядро парамагнітного іона не повинно мати власного магнітного моменту, оскільки його взаємодія з магнітним моментом електрона приведе до додаткового розщеплювання рівнів; парамагнітна релаксація повинна бути повільною. Це визначає малу потужність накачування. Окрім правильного вибору активної речовини, при проектуванні квантових підсилювачів необхідно вирішити ще дві проблеми: здійснити інвертування і розробити оптимальну конструкцію квантового підсилювача.

2.1.3. Модель квантового підсилювача

Широке застосування останніми роками знаходять парамагнітні квантові підсилювачі, які мають порівняно з іншими типами підсилювачів НВЧ-діапазону дуже низький рівень власних шумів [1]. Розміри активної речовини зменшуються, якщо збільшити час взаємодії поля і речовини. З цією метою кристал розміщують в об'ємному резонаторі. Відбиваючись від стінок резонатора, хвиля багато разів проходить через кристал і час взаємодії поля з речовиною збільшується порівняно з поширенням у вільному просторі. Як правило, збудження резонатора проводиться на двох частотах: на частоті накачування і частоті підсилюваного сигналу, що і дозволяє зменшити потужність накачування. Потужне поле накачування певної частоти викликає насичення одного з переходів парамагнетика, через що виникає інверсія населеностей для іншого квантового переходу. Наприклад, для рубіна з орієнтацією кристалографічної осі $\Theta = 90^\circ$ і накачування на частоті переходу $E_4 \rightarrow E_1$ отримують інверсію населеностей на переходах $E_4 \rightarrow E_3$; $E_2 \rightarrow E_1$. Резонатор з активною речовиною поміщається в магнітне поле і разом з магнітом опускається в посудину Дюара з рідким гелієм (рис. 2.2). Вхідний сигнал з антени надходить у циркулятор, призначення якого направляти сигнал або в резонатор, або в приймач, але не назад в антену, тобто розділяти вхідний і вихідний сигнали.

Потужність, поглинена активною речовиною з діелектричною сприйнятливістю χ , має негативне значення:

$$P_{\text{погл}} = -0,5\omega\chi H^2,$$

де H – напруженість зовнішнього магнітного поля.

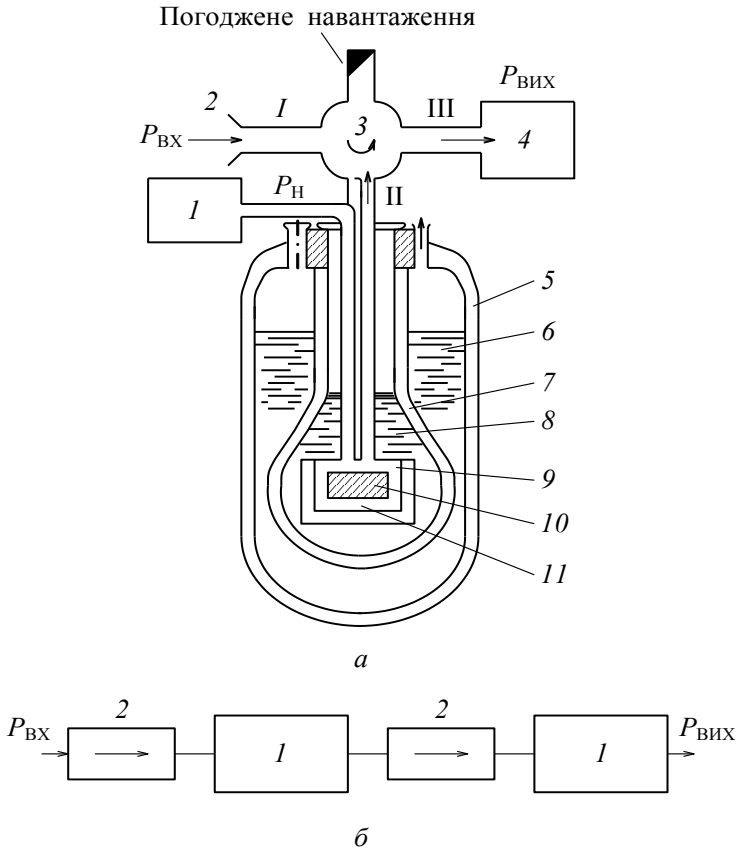


Рисунок 2.2 – Моделі квантових підсилювачів НВЧ-діапазону хвиль:
 однорезонаторний регенеративний підсилювач 1 – система накачування;
 2 – антена; 3 – циркулятор; 4 – приймач; 5, 7 – вакуумні оболонки посудин Дюара;
 6 – рідкий азот; 8 – рідкий гелій; 9 – магніт; 10 – парамагнітний кристал;
 11 – об'ємний резонатор (а); двокаскадний багаторезонаторний прохідний
 підсилювач 1 – резонатор з парамагнетиком; 2 – невзаємний феритовий елемент (б)

Коефіцієнт підсилення за потужністю з урахуванням провідності резонатора $Y_{\text{РЕЗ}}$ визначається як:

$$k_{\text{П}} = \frac{(Y_0 - Y_{\text{РЕЗ}})^2}{(Y_0 + Y_{\text{РЕЗ}})^2},$$

де $Y_{\text{PEЗ}} = G_0 \cdot (1 + \zeta Q \chi)$ – провідність резонатора НВЧ-діапазону довжин хвиль; Q – добротність резонатора; G_0 – коефіцієнт квантового підсилення для резонансної частоти ν_0 ; Y_0 – характеристична провідність вхідного хвилеводу; ζ – коефіцієнт заповнення резонатора активною речовиною.

Щоб пристрій підсилював вхідний сигнал, тобто щоб $k_{\text{П}} > 1$, необхідно виконати умову:

$$\zeta Q \chi(\nu_0) < -1.$$

Іншими словами, для отримання підсилення необхідно забезпечувати перевищення випромінюваної потужності над потужністю втрат усередині резонатора. Втрати в стінках резонатора і в самому активному кристалі з лишком компенсуються коефіцієнтом підсилення і не мають істотного значення. Квантовий підсилювач з одним резонатором має значення коефіцієнта підсилення:

$$k_{\text{П}} \sim 2 \frac{G_0 c}{\pi \Delta \nu_{\text{П}}}. \quad (2.1)$$

Типове значення коефіцієнта підсилення однорезонаторного квантового підсилювача при $G_0 = \frac{1}{100} \lambda$ $k_{\text{П}} \sim 10$, смуга пропускання $\Delta \nu_{\text{П}} \sim 0,002 \nu_0$. Згідно із залежністю (2.1) резонатор, одночасно збільшуючи коефіцієнт підсилення, зменшує його смугу пропускання $\Delta \nu_{\text{П}}$. Для усунення цього недоліку в конструкції квантових підсилювачів роблять декілька резонаторів або застосовують інші конструкції підсилювачів прохідного типу з феритовими невзаємними елементами (рис. 2.2, б), які під впливом магнітного поля пропускають хвилю в одному напрямі, поглинаючи хвилю, що поширюється назад. Проте ці квантові підсилювачі складні і вимагають ретельного налагоджування.

2.1.4. Оптичні квантові підсилювачі

Об'ємні резонатори радіодіапазону мають розміри, порівнянні з довжиною порушеної в них хвилі. Оскільки для дуже коротких хвиль резонатори такого типу виготовити неможливо, то для оптичного діапазону замість резонатора із замкнутим об'ємом пропонується відкритий оптичний резонатор (рис. 2.3).

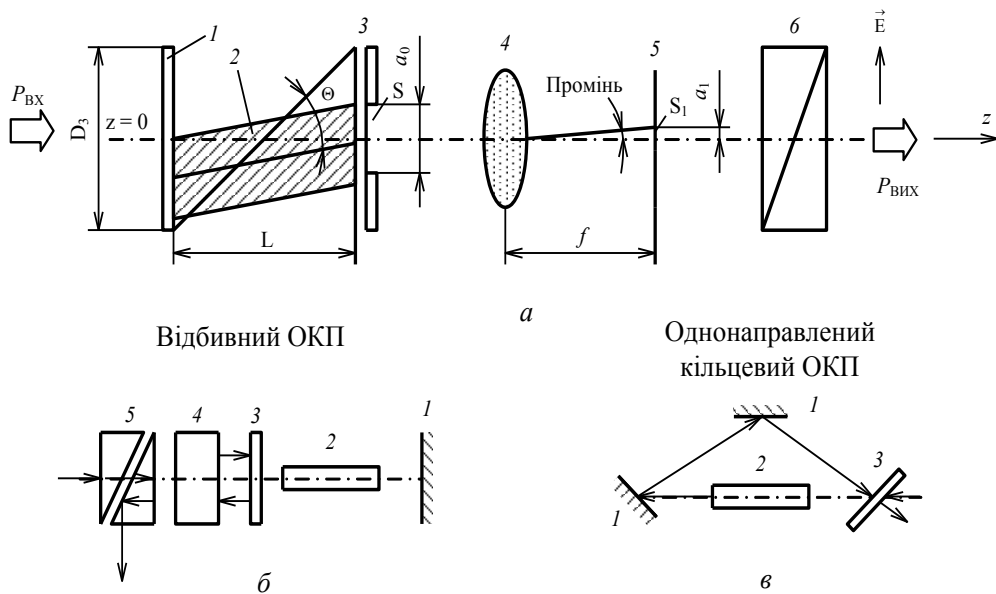


Рисунок 2.3 – Оптичні схеми типових квантових підсилювачів: відбивний резонаторний з активним середовищем 1, 3 – вхідне і вихідне дзеркало, 2 – активна речовина, 4 – лінза, 5 – діафрагма з радіусом a_1 , 6 – поляризатор, a_0 – радіус активної речовини, f – фокусна відстань, $P_{ВХ}$, $P_{ВИХ}$ – вхідна і вихідна потужність (а); відбивний оптичний резонаторний квантовий підсилювач 1 – дзеркало, 2 – активна речовина, 3 – напівпрозоре дзеркало, 4 – чарунка Фарадея, 5 – призма Глана (б); кільцевий оптичний квантовий підсилювач резонатора 1 – дзеркало; 2 – активна речовина; 3 – напівпрозоре дзеркало (в)

Резонаторні оптичні квантові підсилювачі (РОКП) знайшли широке застосування при роботі з активною речовиною з поглинанням і що має малий ступінь активності. Принцип роботи такого підсилювача оснований на явищі регенерації, а використання позитивного зовнішнього або внутрішнього зворотного зв'язку дозволяє значно підвищити коефіцієнт підсилення порівняно з коефіцієнтом підсилення активного середовища за один прохід G . Вважаючи, що резонатор заповнений активною речовиною, що має коефіцієнт поглинання α , для коефіцієнта квантового підсилення за один прохід можна записати :

$$G = \exp(-2\alpha L),$$

де L – довжина резонатора.

У загальному випадку коефіцієнт підсилення резонансного оптичного

квантового підсилювача рівний:

$$K_{\Pi} = \frac{(1-r_1) \cdot (1-r_2) \cdot G}{(1 - \sqrt{r_1 r_2} \cdot G)^2}, \quad (2.2)$$

де r_1, r_2 – коефіцієнти віддзеркалення дзеркал оптичного резонатора.

Прохідні резонансні оптичні квантові підсилювачі можуть працювати в двох режимах: у режимі повного узгодження входу підсилювача і передачі посиленого сигналу у напрямі виходу і в режимі симетричного підсилення ($r_1 = r_2 = r$). Перший режим характерний тим, що підсилювач не відбиває сигнал, що надходить на нього, і не випромінює у напрямі входу. Коефіцієнт підсилення при виконанні режиму узгодження $r_{\text{узг}} = r_2 G^2$ узгодженого режиму визначається підстановкою цієї умови у вираз (2.2):

$$K_{\text{узг}} = \frac{(1-r_2) \cdot G}{(1-r_2 G^2)}.$$

Для симетричного режиму відповідно:

$$K_{\text{сим}} = \frac{(1-r_2)^2 \cdot G}{(1-r_2 G)^2}.$$

Досягши інверсії населеностей енергетичних рівнів, в резонаторі збуджуються власні коливання електромагнітного поля і його добротність рівна:

$$Q = \frac{2\pi L}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{rG}}{1-rG} \quad \text{при } rG < 1.$$

Для проектування оптичних квантових підсилювачів має особливий інтерес характер залежностей $r_1 = f(r_2)$, що дозволяє вибрати оптимальні коефіцієнти віддзеркалення дзеркал резонатора і добитися великого коефіцієнта підсилення, не допускаючи самозбудження підсилювача. На рис. 2.4 в логарифмічному масштабі наведено графік залежностей $r_1 = f(r_2)$.

Ділянка підсилення визначається з умови $r_1 r_2 G^2 \geq 1$. Коефіцієнт віддзеркалення вхідного дзеркала r_1 утримується постійним і міняється відповідно до умов симетрії ($r_1 = r_2$), або узгодження $r_1 = r_2 G^2$.

З наведених залежностей виходить, що при великому коефіцієнті підсилення ($K_{\text{сим}} = 10..20$ дБ) і $G = 2$ дзеркала повинні мати коефіцієнти r_1 і r_2

близько 35...46 %, а самозбудження оптичного квантового підсилювача відбувається при $r \sim 50\%$.

Для узгодженого режиму при тих же значеннях K_{Π} і G коефіцієнт $r_1 \sim 83...96\%$, а $r_2 \sim 21...24\%$, тоді як підсилювач самозбуджується при $r_2 \sim 25\%$.

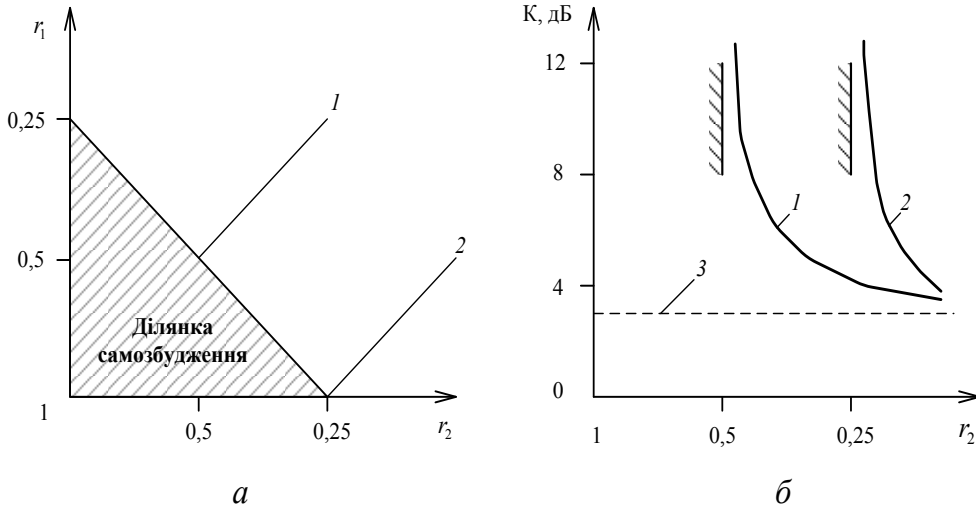


Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнтів віддзеркалення дзеркал РОКП від КП (а) і коефіцієнта підсилення (б) при $G = 2$: 1 – симетричний режим; 2 – узгоджений режим; 3 – ділянка самозбудження

При збільшенні ступеня активності речовини, що відповідає підвищенню G , відбувається зсув ліній узгодженого і симетричного режимів в область менших значень r_1 і r_2 і для здійснення узгодженого режиму потрібне прояснення поверхні вихідного дзеркала. Наприклад, при $G = 8$ і $K_{\text{узг}} = 13$ дБ коефіцієнт r_2 повинен бути близько 1,5 %.

При зменшенні ступеня активності речовини лінії симетричного й узгодженого режимів зміщуються в область великих значень r_1 і r_2 . Для отримання в симетричному режимі $k_{\text{сим}} = 10$ дБ необхідні дзеркала з $r_{1,2} \approx 87\%$, а критичному режиму відповідає $r_{1,2} \approx 91\%$. Для отримання аналогічного підсилення при $G = 1,1$ в узгодженому режимі необхідні коефіцієнти віддзерка-

лення вхідного і вихідного дзеркал 98 і 81 % відповідно. Самозбудження настає при $r_2 \approx 83\%$.

При значенні коефіцієнта квантового підсилення $G = 0$ ділянка самозбудження стягується в точку на початку координат, а лінія симетричного режиму співпадає з лінією узгодженого (випадок звичайного оптичного резонатора).

Оскільки симетричний режим, як і режим узгодження, вимагає досить точного підбору r_1 і r_2 , то при практичній роботі з резонансними оптичними квантовими підсилювачами рекомендується остаточно підбирати дзеркала безпосередньо при юстируванні пристрою, як це робиться, наприклад, при виборі пристроїв виведення енергії для деяких типів електронних приладів НВЧ.

Використання металевих дзеркал у резонаторі резонансних оптичних квантових підсилювачів небажано через їх теплову нестабільність. Крім того, коефіцієнт підсилення резонансних оптичних квантових підсилювачів з металевими дзеркалами перевищує підсилення активної речовини лише у вузькій області зміни r_1 і r_2 безпосередньо поблизу порогу самозбудження.

Широкоугловість прохідного резонансного оптичного квантового підсилювача з відкритим резонатором визначається як:

$$\Pi = \nu_0 \cdot \frac{\lambda_0}{2\pi} \cdot \frac{G-1}{\sqrt{G}} \quad \text{при } K_{\Pi} \gg G.$$

Із збільшенням коефіцієнта квантового підсилення G широкоугловість резонансних оптичних квантових підсилювачів збільшується. Зменшення регенерації можна досягти збільшенням G і наближенням режиму резонансних оптичних квантових підсилювачів до режиму біжучих хвиль. Найбільшого поширення набули такі два технічні рішення: відбивний резонансний оптичний квантовий підсилювач та однонаправлений кільцевий (рис. 2.3, б, в).

Спектральний коефіцієнт підсилення відбивного регенеративного оптичного підсилювача в симетричному режимі визначається так:

$$K(\lambda) = \frac{r - 2G\sqrt{r} \cos 4\pi \left(\frac{L}{\lambda_0} \right) + G^2}{1 - 2G\sqrt{r} \cos 4\pi \left(\frac{L}{\lambda_0} \right) + G^2 r};$$

звідки коефіцієнт підсилення на резонансній частоті:

$$K_0 = \frac{G - \sqrt{r}}{1 - G\sqrt{r}},$$

а широкосмуговість резонансного оптичного квантового підсилювача:

$$\Pi = \nu_0 \cdot \frac{\lambda_0}{2\pi L} \cdot \frac{G^2 - 1}{G}.$$

Спектральний коефіцієнт підсилення іншого практично вживаного одно-направленого кільцевого оптичного квантового підсилювача (рис. 2.3, в):

$$K(\lambda) = \frac{r - 2\sqrt{rG} \cos 2\pi \left(\frac{L}{\lambda_0} \right) + G}{1 - 2rG \cos 2\pi \left(\frac{L}{\lambda_0} \right) + rG}.$$

Коефіцієнт підсилення на резонансній частоті цього кільцевого резонансного оптичного квантового підсилювача рівний:

$$K_0 = \frac{\sqrt{r} - \sqrt{G}}{1 - \sqrt{rG}}.$$

А його широкосмуговість:

$$\nu_0 \cdot \frac{\lambda_0}{\pi L} \cdot \frac{G - 1}{\sqrt{G}} = \Pi.$$

Типові оптичні схеми цих оптичних квантових підсилювачів наведено на рис. 2.3, б, в. Обидва підсилювачі є регенованими оптичними квантовими підсилювачами біжучої хвилі. У відбивному резонансному оптичному квантовому підсилювачі активна речовина має форму довгого однорідного стрижня з одним відбиваючим торцем. Протилежний торець частково прозорий і є одночасно вхідним і вихідним дзеркалом для випромінювання, що підсилюється. Як і в радіодіапазоні, розділення вхідного і вихідного сигналів здійснюється за допомогою невзаємних елементів, подібних до циркулятора. В цьому випадку це чарунка Фарадея з призмою Глана (рис. 2.5).

2.1.5. Квантові підсилювачі біжучої хвилі

Стабільне посилення в оптичному діапазоні, де довжина активних елементів багато більша довжини хвилі, можна реально отримати, використовуючи лазерний підсилювач біжучої хвилі. В даному випадку вибирають актив-

ну речовину з великим коефіцієнтом квантового підсилення.

Розглянемо деякі схемні рішення оптичних квантових підсилювачів біжучої хвилі (рис. 2.5).

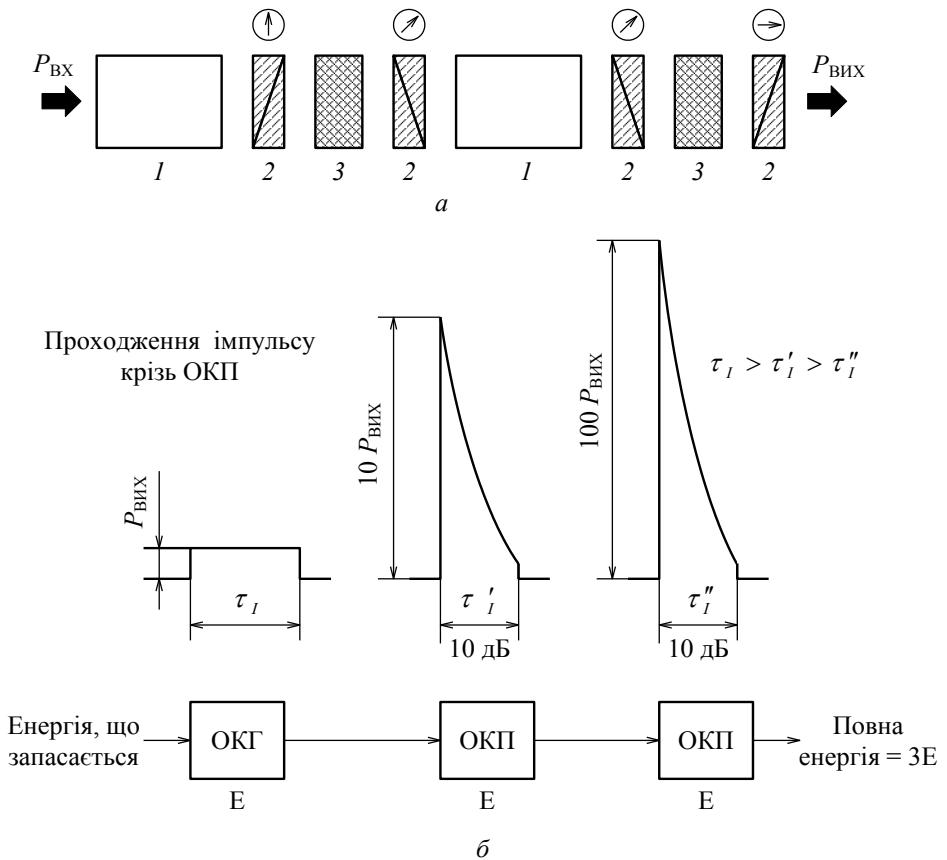


Рисунок 2.5 – Схема оптичного квантового підсилювача біжучої хвилі (а) і схема процесу проходження лазерного імпульсу крізь ОКП БХ (б):
 1 – активна речовина; 2 – поляризатори; 3 – чарунка Фарадея

Оскільки, на відміну від радіодіапазону, в оптичному діапазоні довжин хвиль неможливо одночасно здійснити підсилення сигналу, що поширюється в прямому напрямі, та ослаблення сигналу, що поширюється у зворотному напрямі, то застосовують послідовне з'єднання підсилювальних секцій, розділених невзаємними елементами. Підсилення кожної секції вибирають таким, щоб регенерація окремого підсилювального елемента була невеликою.

Якщо на торцях стрижнів активної речовини відсутні просвітлювальні узгоджувальні покриття, то підсилення одного каскаду не повинно перевищувати 6 дБ. Для створення невзаємної розв'язки застосовують чарунку Фарадея. Площина поляризації падаючої хвилі на активну речовину задається поляризаторами, поверненими на кут 45° один відносно одного.

Як поляризатори використовують призми Глана, дихроїчні поляризатори з віддзеркаленням під кутом Брюстера. За допомогою кожного невзаємного елемента досягається розв'язка близько 25 дБ при втратах 1,6 дБ у прямому напрямі. Наприклад, за допомогою п'ятикаскадного підсилювача, що має підсилення 20 дБ, отримується імпульсна потужність до 1 ГВт.

Принциповою межею величини вихідної потужності для оптичних квантових підсилювачів біжучої хвилі можна вважати потужність, що обмежується процесами багатофотонного поглинання. У середовищі з інверсією населеностей $(N_2 - N_1)$ під дією монохроматичного випромінювання з потужністю $P_{ВХ}$ і частотою ν в одиниці об'єму в одиницю часу створюється енергія:

$$E_{\nu} = (N_2 - N_1) \cdot \sigma_{21}(\nu) \cdot P_{ВХ},$$

де $\sigma_{21}(\nu) = \frac{c^2 A_{21}}{8\pi\nu_0} \cdot F(\nu - \nu_0)$ – перетин радіаційного переходу $E_2 \rightarrow E_1$ з випусканням фотона частотою ν .

Максимально досяжна енергія в імпульсі, що з'являється при підсиленні за допомогою оптичного квантового підсилювача біжучої хвилі:

$$E_{\max} \cong \frac{N_0 h\nu_0}{2\beta_{\Sigma}},$$

де $N_0 = N_1 + N_2$; β_{Σ} – сумарні втрати в резонаторі.

Для рубіна на переході R_1 – лінії з $h\nu_0 = 2,8 \cdot 10^{-19}$ Дж при ΔN інверсії населеностей $\Delta N \sim 0,5N_0$, де $N_0 = 1,6 \cdot 10^{19}$ – населеність рубіна $\beta_{\Sigma} = 0,04 \frac{1}{\text{см}}$, можна отримати енергію $E_{\max} \sim 56 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$.

Оптичний квантовий підсилювач біжучої хвилі працює в імпульсному режимі, скорочує тривалість підсилюваного ним імпульсу випромінювання (рис. 2.5, б). Проте для цього необхідно, щоб передній фронт початкового імпульсу був достатньо крутим. Інакше спостерігається розширення імпульсу.

Ширина вихідного імпульсу на половинному рівні:

$$\tau_{il\ 0.5} \approx \frac{2 \exp\left(-\frac{\sigma_{21}}{(N_2 - N_1)L}\right)}{2\sigma_{21}\rho_{v_0}v},$$

де ρ_{v_0} – густина потоку фотонів у резонаторі в момент часу $t=0$; $(N_2 - N_1)$ – інверсії населеностей енергетичних рівнів E_2 і E_1 у момент часу $t=0$; v – швидкість поширення світла в середовищі, см/с⁻¹.

2.2. ЕЛЕМЕНТИ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ЛАЗЕРІВ

До конструктивних елементів лазерів належать освітлювачі, дзеркала, резонансні відбивачі, призми-покрівлі.

Освітлювачі. Для підвищення ефективності накачування лампу та активну речовину розміщують всередину освітлювача (рис. 2.6). На рис. 2.6, *a–г* – лампа накачування знаходиться на осі активної речовини; *д–і* – лампа накачування паралельна осі активної речовини; тут *1* – активна речовина; *2* – лампа накачування; *3* – освітлювач.

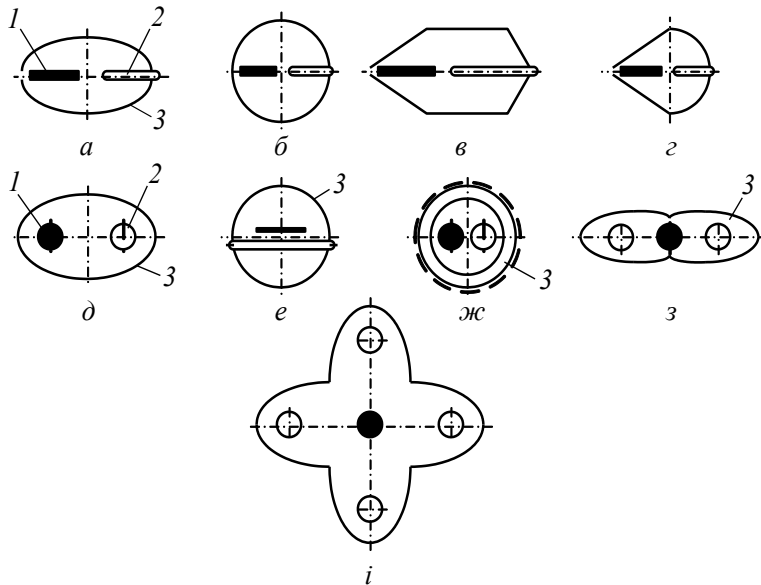


Рисунок 2.6 – Схеми конструкцій освітлювачів

Ефективність світлопередачі освітлювача далека від ідеальної. Втрати в освітлювачі становлять від 30 до 70 %, що в основному і обумовлює низький ККД подібних лазерів (0,1...1,5 %). Найбільший ККД (близько 1,5 %) можна отримати, застосовуючи освітлювач, показаний на рис. 2.6, *а*, і ниткоподібну лампу накачування.

У групі освітлювачів з лампою накачування, розташованою на осі активної речовини, максимальна ефективність досягає 56 % (рис. 2.6, *б*), а у решти освітлювачів цієї групи вона не перевищує 50 %.

Освітлювачі, показані на рис. 2.6, *в*, *г*, мають обмежене застосування, оскільки отримання високого коефіцієнта віддзеркалення в них пов'язане із значними технологічними труднощами. Допустимий рівень енергії накачування не перевищує 25 Дж.

На рис. 2.6, *д*, *е*, *ж* наведені схеми двох ефективних освітлювачів, що отримали найбільш широке застосування (освітлювачі з «щільною упаковкою»). Для освітлювача з перетином у вигляді еліпса (рис. 2.6, *д*) ефективність світлопередачі:

$$\eta_{\text{ОСВ}} = \frac{R_1}{R_2} \quad \text{при} \quad \frac{R_2}{R_1} \leq \frac{1-e}{1-e};$$

$$\eta_{\text{ОСВ}} = 1 \quad \text{при} \quad \frac{R_2}{R_1} \geq \frac{1-e}{1-e},$$

де R_1 , R_2 – радіуси лампи накачування та активної речовини; e – ексцентриситет еліпса. Максимальні значення $\eta_{\text{ОСВ}}$ досягають 75 %.

Для освітлювача, показаного на рис. 2.6, *ж*, ефективність світлопередачі рівна:

$$\eta_{\text{ОСВ}} = \frac{r_{\text{СТ}} S_{a.g}}{S_{\text{ОСВ}}},$$

де $r_{\text{СТ}}$ – коефіцієнти віддзеркалення стінок; $S_{\text{ОСВ}}$ – площа поверхні освітлювача; $S_{a.g}$ – площа бічної поверхні активної речовини.

На рис. 2.6, *з*, *і* наведено схеми освітлювачів, утворених декількома еліптичними циліндрами. Такі освітлювачі застосовуються в лазерах з великою вихідною енергією. Із збільшенням числа ламп накачування відносна величина енергії зростає, проте загальна ефективність освітлювача знижується. Оп-

тимальне число ламп накачування:

$$N_{\text{ОРГ}} = \frac{R_2 n}{R_1}.$$

Дзеркала. У лазерній техніці знайшли застосування дзеркала з металевими і діелектричними покриттями. Дзеркала з металевими покриттями мають істотні недоліки: відбивна здатність металів мала і становить 80...90 %; покриття мають малу стійкість до світлового випромінювання і мають малу механічну міцність. Так, наприклад, при щільності енергії 50...80 Дж/см² срібні покриття починають відшаровуватися від скляної підкладки після 50...2000 спалахів при роботі в імпульсному режимі генерації.

Коефіцієнт віддзеркалення у діелектриків значно менший, ніж у металів (для скла з показником заломлення $n = 1,5$ коефіцієнт віддзеркалення становить всього 4 %), проте використання багатошарових діелектричних покриттів, що віддзеркалюють, дає можливість отримувати коефіцієнти віддзеркалення більше 99 %.

Діелектричні дзеркала складаються з великої кількості (13...17) шарів двох діелектриків (з високим і низьким показниками заломлення), розташованих позмінно. Необхідно, щоб товщина діелектричного покриття була рівна:

$$\Delta = \frac{\lambda_0 n_K}{4},$$

де n_K – кількість шарів покриття.

Непарні шари роблять з діелектриків з високим показником заломлення: сульфідів цинку і сурми, оксидів титану, цирконію, гафнію, торію, свинцю. Парні шари – з матеріалу з низьким показником заломлення: фторидів магнію, двоокису кремнію. Переваги діелектричних покриттів можна реалізувати лише при високоякісному виготовленні підкладки. Для отримання коефіцієнта віддзеркалення більше 99 % для $\lambda_0 = 0,7$ мкм висота мікронерівностей не повинна перевищувати 0,005 мкм. Стійкість діелектричних покриттів до світлового випромінювання залежить від кількості шарів, температури підкладки при нанесенні діелектриків, чистоти початкових матеріалів і від орієнтації монокристалів.

Резонансні відбивачі. У ряді випадків як вихідне дзеркало резонатора використовують резонансні відбивачі, які є набором («стопою») плоско-

паралельних пластин з показником заломлення n , розділених повітряними проміжками. Максимальний коефіцієнт віддзеркалення системи, що складається з m пластин, рівний:

$$r_{\max} = \left(\frac{1 - n^{2m}}{1 + n^{2m}} \right)^2.$$

Потрібно зазначити, що товщина пластин, як і товщина повітряних проміжків, рівні цілому значенню $\lambda/4$. Для отримання розрахункового значення коефіцієнта віддзеркалення при виготовленні резонансного відбивача необхідно, щоб пластини відрізнялися за товщиною не більш, ніж на $\lambda/8$. Зміна товщини пластин, викликана зміною температури, приводить до зсуву частоти. Резонансні відбивачі мають високу стійкість до світлового випромінювання, що визначається порогом руйнування металу пластин.

Призми-покрівлі в резонаторах дозволяють відмовитися від покриттів і використовувати явище повного внутрішнього віддзеркалення. Це дає ряд істотних переваг: збільшує допустиму густину енергії в резонаторі ОКГ, що визначається порогом руйнування матеріалу призми, сприяє вирівнюванню густини лазерного випромінювання по перерізу активної речовини. Величина втрат при віддзеркаленні залежить від матеріалу призми і становить 4...9%. Резонатор з вхідними в нього оптичними елементами унаслідок багатократного проходження в ньому електромагнітного поля як оптична система еквівалентний послідовності тонких лінз з однаковими фокусними відстанями.

2.3. СИСТЕМИ ОПТИЧНОГО НАКАЧУВАННЯ

Процес зміни розподілу квантових частинок з рівноважного в нерівноважний стан в активній речовині за рівнями енергії під дією зовнішнього електромагнітного випромінювання, постійного струму або хімічних реакцій називається **накачуванням**. На сьогодні в лазерній техніці застосовуються різні методи накачування [1, 4].

Найбільшого поширення як в імпульсному режимі роботи, так і в безперервному режимі роботи лазерів отримав метод **оптичного накачування**

газорозрядними лампами, наповненими інертними газами.

Деякі активні речовини можуть генерувати випромінювання при накачуванні ртутними лампами надвисокого тиску і йодними лампами розжарювання. До нових методів оптичного накачування належить використання енергії вибухового дроту, застосування випромінювання плазмового шнура, що стискається. Досліджується також можливість використання енергії випромінювання сонця і застосування рентгенівських променів для збудження флуоресценції в твердих тілах.

При розгляді конструктивних і фізичних параметрів ламп накачування слід вибирати такі, які визначають газорозрядну лампу як елемент електричного ланцюга, що робить вплив на розробку електричної схеми живлення лазера. При реалізації методу оптичного накачування конструктивно добиваються максимального поглинання випромінювання накачування.

Лампи. При виборі лампи початковим параметром є об'єм розрядного проміжку, який повинен бути приблизно рівний об'єму активної речовини. Для ламп зазвичай застосовують кварцові трубки з нормованою товщиною стінки. Найбільш часто вживана у твердотільних лазерах пряма імпульсна лампа має електроди на кожному кінці циліндричної кварцової трубки, яка заповнена інертним газом. Обидва кінці кварцової трубки щільно зварюються з молібденовими стрижнями – електродами.

Втрати енергії на нагрів лампи та електродів, а також на поглинання кварцовою трубкою у зоні довжин хвиль 180...3500 нм не перевищують 25...30 %.

Лампи накачування, призначені для роботи в імпульсних лазерах, наповнюють ксеноном, оскільки цей газ забезпечує вищу порівняно з іншими інертними газами світловидатність, що пов'язане з низьким потенціалом іонізації і порівняно високою його атомною масою (131,3).

Оптимальний тиск газу при наповненні становить $(4...13) \cdot 10^4$ Па. Ксенонові лампи бувають різної конфігурації: прямі, трубчасті, трапецеїдальні П- і U-подібні, коаксіальні, спіральні. Рекомендовані значення довжини міжелектродного проміжку і внутрішнього діаметра кварцової трубки становлять 4...30 і 0,3...3 см відповідно.

До недоліків імпульсних ламп слід віднести порівняно недовгий термін

служби навіть при експлуатації в номінальному режимі. Цей термін може бути значно збільшений при зниженні гранично допустимих навантажень і навпаки.

Для експлуатації лазерів необхідно знати довговічність і надійність ламп, визначувану *коефіцієнтом навантаження* $k_{\text{л}}$. Коефіцієнт навантаження є відношення робочої енергії лампи $E_{\text{л}}$ до граничної енергії $E_{\text{л max}}$, що підводиться від джерела живлення, яку лампа може витримати при накачуванні.

Однією з причин руйнування ламп, разом з ерозією електродів, появою нальоту і мікротріщин, є термоудар, що виникає при генерації імпульсу випромінювання. Максимальна енергія $E_{\text{л max}}$ лампи накачування залежить від прикладеного імпульсу накачування і конструктивних параметрів лампи:

$$E_{\text{л max}} \cong 1,2 \cdot 10^4 d_{\text{л}} L_{\text{л}} \tau_{\text{л}}^{0,5}.$$

Залежно від режиму живлення лампи змінюється спектральний розподіл енергії випромінювання. Із збільшенням струму, що протікає через лампу, спектр випромінювання зміщується в область коротких довжин хвиль, окремі лінії стають менш вираженими і випромінювання лампи істотно наближається до випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ). Порівняння випромінювання імпульсних ламп ($d_{\text{л}} = 0,9$ см, $L_{\text{л}} = 58$ см) з випромінюванням абсолютно чорного тіла показало, що в інтервалі $(0,4 \dots 20,3) \cdot 10^3$ см⁻¹ спостерігається хороший збіг спектральних характеристик.

Тривалість спалаху та енергія, що підводиться до лампи, збільшується із збільшенням ємності конденсаторів блока живлення.

Наприклад, при зміні ємності в межах 100...800 мкФ тривалість спалаху збільшується від $1 \cdot 10^{-4}$ приблизно до $7 \cdot 10^{-4}$ с.

Також сприятливо позначається на зростанні величини граничної енергії лампи зменшення крутизни наростання імпульсу розрядного струму. Це досягається введенням індуктивності в розрядний контур лампи.

Спектральний коефіцієнт поглинання розрядом власного випромінювання $\frac{\alpha_{\text{с}}}{\lambda}$ пропорційний напрузі живлення лампи і при оптимальному значенні напруги на електродах досягає 1,1-2 см⁻¹. Наприклад, для лампи типу

ІФП-800 при $u_0 = 500$ В $\alpha_C(\lambda) = 1,5$ см⁻¹, а при $u_0 = 1000$ В $\alpha_C(\lambda) = 2,6$ см⁻¹.

Указані особливості і характеристики імпульсних ламп зумовлюють певні вимоги до систем живлення. Ці вимоги впливають на вибір принципових електричних схем джерел і на розрахунок окремих елементів їх конструкції.

Однією з характерних особливостей лампи є можливість використання її як комутуючого пристрою для імпульсних лазерів. У цьому випадку лампа забезпечує непровідний стан розрядного кола за наявності на ній напруги живлення. Для кожної лампи існує своя гранична частота спалахів, при перевищенні якої імпульсна лампа переходить в безперервний режим горіння. Максимальна напруга джерела живлення не повинна перевищувати напруги самопробою (мимовільний розряд). Керування лампою здійснюється ініціалізацією розряду високовольтним короткочасним імпульсом підпалу. Напругу самопробою і запалювання визначають межі зміни напруги на виході джерела живлення.

Конденсатори. Імпульсні лампи оптичного накачування підключаються до накопичувачів енергії – конденсаторів, які забезпечують високу імпульсну потужність при порівняно малій питомій енергії і нерівномірному навантаженні живильної мережі. Основними характеристиками накопичувачів енергії є питома енергія, Дж/м³; максимальна імпульсна потужність, Вт; питомий об'єм, м³/Дж; питома маса, кг/Дж.

Для об'єктивної оцінки параметрів накопичувальних конденсаторів необхідно розглядати їх питомі характеристики з урахуванням довговічності, оскільки від цього параметра істотно залежать характеристики накопичувачів. За рахунок зменшення довговічності можна зменшити об'єм і масу конденсаторів. При аперіодичному характері розряду для режиму одиночних імпульсів гарантується термін служби паперово-масляного конденсатора не менше 10⁴ циклів заряд-розряд.

Для зменшення габаритів конденсаторів величину напруженості поля підвищують до 70...100 кВ/мм, але при цьому на порядок зменшується термін їх служби. У довідниках наведені основні характеристики накопичувальних конденсаторів, розроблених та освоєних промисловістю спеціально для пристроїв лазерної техніки.

Схеми джерел живлення імпульсних ламп. Проектування малогабаритних систем накачування для отримання стійкої імпульсної генерації інду-

кованого випромінювання лазерів є складним завданням, оскільки при достатньо малих габаритах і масі необхідно розробити надійну конструкцію блока живлення, що забезпечує високі значення енергії накачування і частоти заряду накопичувача.

До основних функціональних елементів електричних схем джерел живлення імпульсних ламп належать такі: зарядний пристрій (ЗП), призначенням якого є передача енергії від живильної мережі в ємнісний накопичувач; розрядний контур (РК), призначений для перетворення запасеної в накопичувачі електричної енергії в світлову енергію імпульсних ламп; блок підпалу (БП), необхідний для ініціалізації розряду в лампах, і, нарешті, система керування (СК), що координує роботу всіх вхідних у джерело живлення приладів (рис. 2.7).

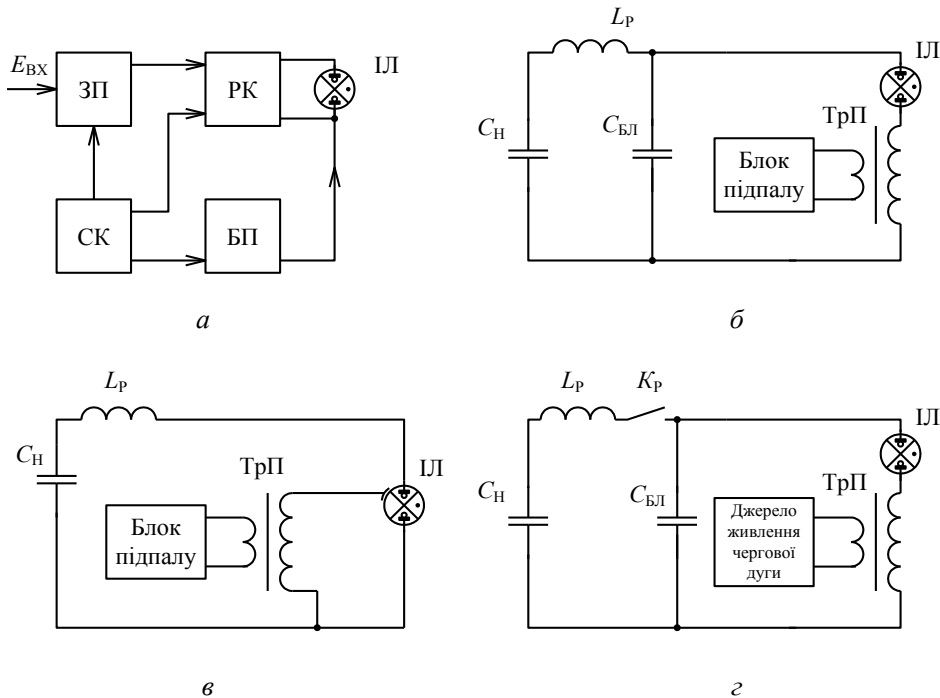


Рисунок 2.7 – Структурна схема системи керування джерелами живлення імпульсних ламп (а) і схеми включення блока підпалу в розрядний контур імпульсної лампи: зовнішній підпал (б); послідовний підпал (в); підпал черговою дугою (г)

Серед зарядних пристроїв ємнісних накопичувачів блоків живлення найбільшого поширення набули схеми з активними або індуктивними елеме-

нтами. Ці схеми знаходять також застосування в імпульсних модуляторах НВЧ-генераторів. Теорія таких модуляторів досить повно розроблена, що і зумовило їх значне поширення в найперших експериментальних і дослідних зразках джерел живлення твердотільних лазерів.

Підпал лампи здійснюється високовольтним імпульсом, що виробляється в генераторі імпульсів підпалу. При зовнішньому підпалі високовольтний імпульс подається на спеціальний електрод підпалу (рис. 2.7, *a–г*), яким зазвичай служить дріт, що підводиться до колби лампи.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Перерахуйте основні характеристики і параметри квантових підсилювачів.
2. Назвіть основні властивості парамагнітних кристалів і перелічіть парамагнітні матеріали.
3. Назвіть особливості рубіна – активної речовини твердотільних лазерів.
4. Поясніть принцип дії моделі квантового підсилювача НВЧ-діапазону хвиль.
5. Поясніть особливості квантових підсилювачів оптичного діапазону.
6. Нарисуйте основні оптичні схеми оптичних квантових підсилювачів.
7. У чому особливості квантових підсилювачів біжучої хвилі?
8. Назвіть види оптичних резонаторів.
9. Що таке відкритий оптичний резонатор?
10. Назвіть основні типи відкритих оптичних резонаторів, що використовуються в лазерній техніці.
11. Назвіть основні елементи оптичних систем лазерів.
12. Поясніть конструктивні особливості освітлювачів оптичних систем лазерів.
13. Поясніть призначення, конструктивні особливості дзеркал оптичних систем лазерів і матеріали, що використовуються для їх виготовлення.
14. Що таке резонансні відбивачі оптичних систем лазерів?
15. У чому переваги призм-покривель порівняно з іншими відбивачами в оптичних системах лазерів?
16. Для чого призначені пристрої оптичного накачування в лазерних си-

стемах?

17. Які основні елементи входять у пристрої оптичного накачування лазерних систем?

18. Охарактеризуйте вимоги до ламп та особливості оптичного накачування лазерних систем.

19. Назвіть основні характеристики і параметри накопичувальних конденсаторів пристроїв оптичного накачування.

20. Порівняйте типові схеми джерел живлення імпульсних ламп пристроїв оптичного накачування.

21. З якою метою в схеми джерел живлення імпульсних ламп вводяться дроселі?

3. КВАНТОВІ ГЕНЕРАТОРИ – ЛАЗЕРИ

3.1. ТВЕРДОТІЛЬНІ ІМПУЛЬСНІ ЛАЗЕРИ

3.1.1. Модель твердотільного імпульсного лазера

Вперше індуковане випромінювання в оптичному діапазоні довжин хвиль було отримане Т. Майманом в 1960 році в твердотільному рубіновому імпульсному генераторі [1, 3, 5]. Необхідно нагадати, що створенню першого лазера передували фундаментальні дослідження учених (О.М. Прохоров, Г.Н. Басов, А. Шавлов, У. Таунс, Д. Вебер). Іншим типом твердотільних імпульсних лазерів були чотирирівневі генератори на склі, активованому неодимом, з довжиною хвилі випромінювання $\lambda_0 = 1,064$ мкм. Цей генератор був створений Е. Снітцером у 1961 році. Зараз це один з найпоширеніших типів лазерів, істотний внесок у вдосконалення яких зробили учені М.П. Ванюков, А.А. Мак, Б.В. Скворцов, П.П. Феофілов та ін.

Подальшим розвитком лазерів на основі конденсованих середовищ було створення у 1962 році напівпровідникових інжекційних лазерів на $p-n$ переходах. За короткий період було запропоновано більше ста твердих активних середовищ на основі неорганічних матеріалів. Такий швидкий розвиток твердотільних лазерів обумовлений принциповими особливостями цих приладів.

Концентрація активних частинок у твердому матеріалі набагато перевищує концентрацію частинок в газових середовищах. Тому тверді активні середовища характеризуються більшим коефіцієнтом підсилення, а це дозволяє отримувати великі потужності генерації.

На сьогодні створені лазери з вихідною енергією в імпульсі більше 5000 Дж і потужністю до 20 ГВт, що не є межею. Подальше підсилення випромінювання за допомогою оптичних квантових підсилювачів дозволило отримати надкороткий імпульс потужністю 10^{13} Вт. Такі великі потужності, необхідні для різних практичних і наукових цілей, можуть бути досягнуті тільки при імпульсній роботі лазера, при певній формі і тривалості випромінюваного імпульсу.

Спонтанні (мимовільні, без якого-небудь зв'язку із зовнішнім випромінюванням) процеси випромінювання відбуваються завжди і повсюдно. Це випромінювання від нагрітих тіл, світних газів, електричного розряду і т. ін. Щоб практично отримати індуковане (вимушене) випромінювання, потрібно виконати три основні умови, які фактично й описують модель твердотілого лазера (рис. 3.1).

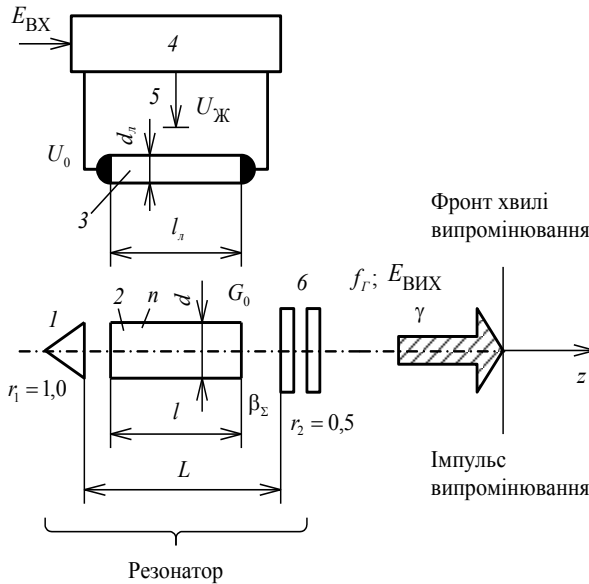


Рисунок 3.1 – Модель твердотілого імпульсного лазера:

l – призма повного внутрішнього віддзеркалення; 2 – активна речовина; 3 – імпульсна лампа накачування; 4 – пристрій накачування; 5 – електрод підпалу; 6 – резонансний відбивач (стопа пластин); параметри і характеристики лазера – E_0 , $E_{ВХ}$, $d_л$, $l_л$, r_1 , r_2 , L , d , n , l , G_0 , β_Σ , γ , $E_{ВІХ}$

1. Необхідно мати речовину з інверсією населеностей $\Delta N = N_n - N_m$, тобто, щоб з двох вибраних рівнів верхній рівень був заселений більше, ніж нижній, де N_n ; N_m – населеності рівнів енергії E_n , E_m . Інверсія населеності досягається накачуванням, одним з універсальних методів якого є оптичне збудження частинок (метод оптичного накачування).

2. Активну речовину необхідно помістити в оптичний резонатор – систему двох паралельних дзеркал, щоб здійснити позитивний зворотний зв'язок. У

результаті цього частина випромінюваної енергії, розповсюджуючись усередині активної речовини, підсилюється за рахунок вимушеного випускання фотонів все новими і новими атомами, що залучаються до процесу випромінювання.

3. Підсилення $G(\nu)$, що надається активною речовиною, повинне бути більше деякого сумарного порогового значення втрат β_{Σ} у резонаторі, визначеного для кожної активної твердої речовини. Генерація буде можлива при виконанні умови самозбудження:

$$G(\nu)L \geq \beta_{\Sigma}.$$

Відповідно до цих трьох умов, лазер складається з трьох основних елементів: *активної речовини* – джерела індукованого випромінювання; *системи накачування*, яка збуджує активну речовину, і *резонатора* – системи, що підтримує коливання і формує частотні, енергетичні і просторові характеристики вихідного випромінювання.

Більшість твердотільних лазерів працюють в імпульсному режимі. Джерелом збудження іонів кристала зазвичай служать імпульсні газорозрядні лампи накачування. Енергія, необхідна для роботи ламп, накопичується в конденсаторах загальною ємністю 200...500 мкФ. Запалювання газового розряду в лампі проводиться високовольтним імпульсом підпалу. Іонізація ксенону в лампі супроводжується інтенсивним світінням плазми газового розряду. Випромінювана лампою в малому проміжку часу ($\tau_i \sim 1$ мс) промениста енергія фокусується спеціальним відбивачем на кристалі активної речовини і частково ним поглинається. Активні іони кристала переходять в збуджені стани. Через невеликий час на метастабільному рівні створюється інверсія населеностей частинок. Відбувається індуковане випромінювання фотонів. У резонаторі виникають коливання електромагнітної енергії, які лавинним процесом збуджують й інші активні центри кристала. Цей лавинний процес протікає за короткий час близько 150 мкс.

Потік фотонів, зазнаючи багатократних віддзеркалень від дзеркал, виходить назовні крізь напівпрозоре дзеркало резонансної системи. Фотони, які рухаються не паралельно осі резонатора, покидають активну речовину і резонатор. Тому випромінювання має високу просторову спрямованість.

Таким чином, на виході лазера створюється потужний монохроматичний пучок малого розходження.

У твердотільних лазерах накачування здійснюється шляхом поглинання випромінювання в широкій смузі енергетичного спектра. Потім слідують дуже швидкі переходи на рівні з малою шириною, що зазвичай називаються *метастабільними рівнями*, де час життя квантових частинок великий порівняно із звичайним часом життя частинок на інших збуджених рівнях.

Час життя частинок у збудженому стані – величина, зворотно пропорційна вірогідності кантових переходів з цього рівня енергії на інші рівні:

$$\tau = \frac{1}{P_{nm}},$$

де $P_{nm} = A_{nm} + \rho_\nu B_{nm}$ – повна вірогідність переходу частинки в одиницю часу на нижчий рівень E_m , $A_{nm} = \frac{8\pi h \nu^3 B_{nm}}{c^3}$, $W_{nm} = B_{nm} \rho_\nu$ – вірогідність спонтанного та індукованого переходів; ρ_ν – густина індукованого випромінювання на частоті переходу ν_{nm} ; $B_{nm} = \frac{g_n}{g_m} B_{mn}$ – коефіцієнт Ейнштейна; g_n, g_m – кратності виродженості енергетичних рівнів.

У твердотільних лазерах використовуються три- і чотирирівневі системи енергетичних рівнів (рис. 3.2).

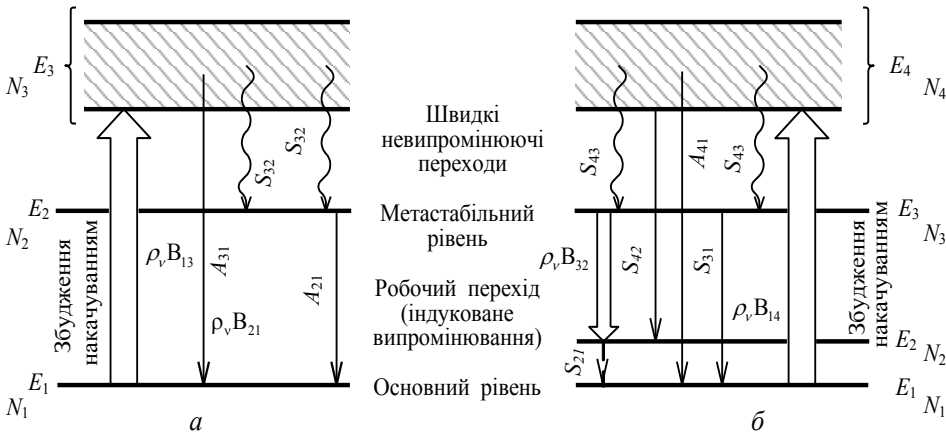


Рисунок 3.2 – Схеми квантових переходів у три- і чотирирівневному лазері (а та б відповідно)

У першій системі випромінювання оптичного накачування переводить квантові частинки в широку смугу поглинання E_3 , потім атоми швидко переходять на метастабільний рівень E_2 .

Якщо потужність накачування достатня, між основним рівнем E_1 і рівнем E_2 виникає інверсія населеностей. Генерація вимушеного випромінювання відбувається з метастабільного рівня E_2 на основний (або з рівня E_3 на допоміжний рівень E_2 в чотирирівневій системі).

У загальному випадку зміна населеностей рівнів обумовлена трьома квантовими механізмами: спонтанними переходами на нижні рівні; індукованим випромінюванням і поглинанням; невипромінюючими переходами, збудженими тепловими процесами і взаємодіями з коливаннями кристалічної решітки.

За трирівневою системою працює лазер на рубіні. Недолік його полягає в тому, що для створення інверсії населеностей повинно бути переведено з основного на метастабільний рівень більше 50 % квантових частинок. Тому кожний із збуджених атомів віддає велику частину енергії накачування (80...85 %) на нагрів кристалічної решітки при невипромінюючих переходах $E_3 \rightarrow E_2$.

Чотирирівнева система, за якою працюють багато твердотільних лазерів (на склі, активованому рідкоземельними елементами, антинідами, YAG та ін.), ефективніша. Якщо рівень E_4 розташований достатньо далеко від основного E_1 , то його населеність буде менше населеності основного рівня, і інверсія населеностей між рівнями E_2 і E_4 може бути досягнута при відносно низьких потужностях накачування.

Після створення рубінового лазера було запропоновано багато лазерів на інших матеріалах, проте рубіновий лазер широко використовується на сьогодні і використовуватиметься у майбутньому. Це пояснюється такими обставинами: випромінювання його відбувається у видимій частині спектра, кристала при генерації імпульсів з частотою $f_r \sim 0,03$ Гц не потрібне охолодження, забезпечується висока вихідна потужність в режимі генерації імпульсів з модуляцією добротності ($P_{\text{ВИХ}} = 7500$ МВт при тривалості імпульсу 2 нс).

3.1.2. Активна речовина твердотільного лазера

Рубін – дорогоцінний матеріал, що рідко зустрічається в чистому вигляді у природі. Це діамагнітний кристал окислу алюмінію Al_2O_3 (α -корунд) з парамагнітними домішковими іонами хрому Cr^{3+} . Як активна речовина синтетичний рубін рожевого кольору із вмістом хрому близько 0,05 масових процентів застосовується в квантових приладах з 1958 року, коли О.М. Прохоров досліджував електронний парамагнітний резонанс іонів Cr^{3+} в кристалах, запозичених у годинниковій промисловості. Залежно від концентрації хрому кристал α -корунд набуває різних кольорів: 0,5 % Cr – забарвлення яскраво-червоне, більше 8 % Cr – колір кристала зелений.

Іони Cr^{3+} ізоморфно заміщають в кристалічній решітці α -корунда іони алюмінію Al^{3+} , кожний з яких знаходиться в оточенні шести іонів кисню O^{2-} , що утворюють правильний октаедр. Іонний радіус Al^{3+} складає $0,51 \text{ \AA}$; він менше іонного радіуса Cr^{3+} ($0,63 \text{ \AA}$) і тому іон Cr^{3+} виявляється дещо зміщеним від центра октаедра уподовж тригональної осі кристала. Спотворення симетрії кристала приводить до внутрішньої напруги і дефектів структури кристала. Показник заломлення рубіна для різних поляризацій і для звичайного променя становить $\sim 1,76$. Різниця показників заломлення для звичайного і незвичайного променів рівна 0,008 (явище подвійного промене-заломлення). Міцність кристала – 3800 кг/см^2 , теплоємність $0,18 \text{ кал/г} \cdot \text{град}$, теплопровідність $20 \text{ кал/с} \cdot \text{град}$ (при $30 \text{ }^\circ\text{C}$). Враховуючи високі оптичні, механічні і квантові властивості, рубін займає особливе місце серед активних речовин лазерної техніки.

Якщо застосувати хвильові функції, що описують стан іона з однаковим значенням сумарного орбітального моменту, але з різними проекціями його на кристалографічну вісь z , то при деяких операціях симетрії хвильові функції мають дво- або триразову орбітальну виродженість.

Діаграма рівнів енергії іонів Cr^{3+} в рубіні складається з двох наборів рівнів (рис. 3.3, *a*): перший зліва – характерний для стану іона Cr^{3+} із спином $S = 3/2$, нижній рівень набору 4A_2 – основний стан Cr^{3+} – має два підрівні з відстанню між ними $0,38 \text{ см}^{-1}$.

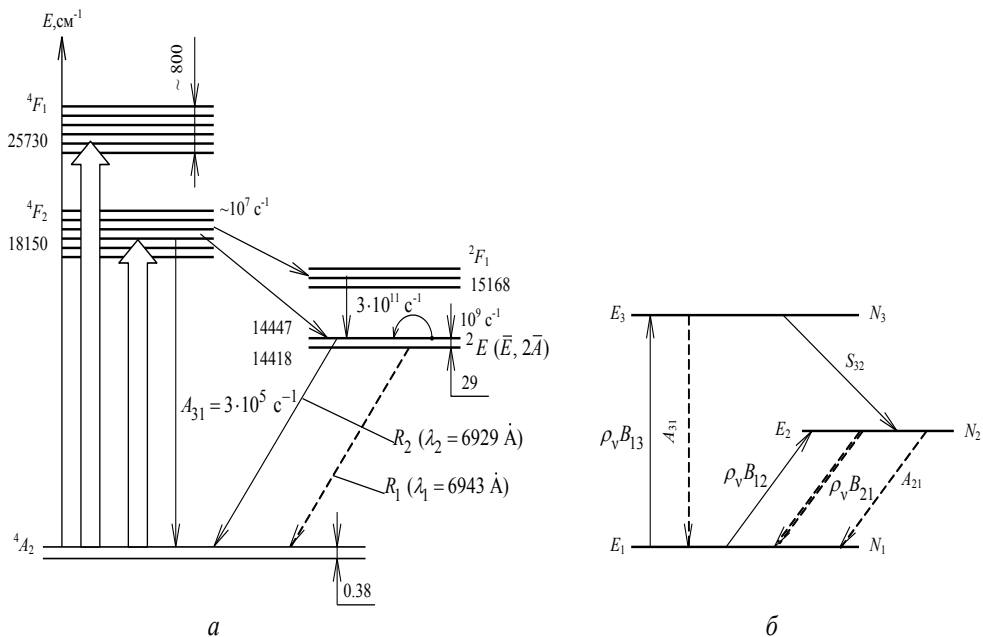


Рисунок 3.3 – Схема енергетичних рівнів і вірогідності переходів для іонів Cr³⁺ в рубіні при температурі $T = 4,2$ К (а) і розрахункова схема енергетичних рівнів активної речовини трирівневого лазера (б)

Два верхні рівні – це рівні резонансного поглинання. Вони складаються з шести дублетів і внаслідок неоднорідності поля сильно розмиті. Другий набір рівнів справа відповідає станам іонів Cr³⁺ із спином $S = \frac{1}{2}$. Рівень ²E – метастабільний, двічі вироджений, розщеплений на два підрівні з проміжком 29 см⁻¹, рівні A є орбітальними синглетами. Рівні ²E і ²F₁ відповідно двічі і тричі вироджені. Положення рівнів ²F₁, ²E мало залежить від неоднорідностей кристала, і вони практично не мають розширення. В результаті спин-орбітальної взаємодії іонів Cr³⁺ з полем кристала електронні стани, відповідні енергетичним рівням кристала, виявляються змішаними станами. Це призводить до того, що випромінювальні переходи з рівнів ⁴F₁, ⁴F₂ на рівні ²F₁ і ²E заборонені правилами відбору для спину.

Проте між цими рівнями здійснюються інтенсивні не випромінюючі переходи:

$$S_{32} \sim (2...5) \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$$

з величезним виділенням тепла. При збудженні оптичним накачуванням в смугах 4F_1 , 4F_2 зміна населеностей рівнів пов'язана із спонтанними переходами на нижні рівні, індукованим поглинанням і випромінюванням, невипромінюючими переходами. Збуджені квантові частинки (іони хрому) з основного рівня 4A_2 переходять на рівні, що резонансно поглинаються 4F_1 , 4F_2 . Час життя частинок у збудженому стані малий. Рівні 4F_1 , 4F_2 унаслідок спонтанного переходу частинок на основний 4A_2 рівень з вірогідністю $A_{31} = 3 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ і невипромінюючого переходу з вірогідністю $S_{32} \sim (2...5) \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$ в метастабільний стан 2E швидко обідняються. Оскільки вірогідність спонтанного переходу з рівня E мала $A_{21} = 3 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$, то на рівнях \bar{E} і $2\bar{A}$ можливе утворення інверсії населеності частинок. Досягши порогового значення інверсії $\Delta N = 0,5N_0$, відбувається спонтанне та індуковане випромінювання.

Якщо інверсія населеностей не досягає порогового значення, то спостерігається тільки спонтанне випромінювання у вигляді люмінесценції рубіна на одній з двох вузьких ліній $R_1(\lambda_1 = 6943 \text{ \AA})$ або $R_2(\lambda_2 = 6929 \text{ \AA})$ з рівнів $2\bar{A}$ і \bar{E} відповідно (рис. 3.3, а).

Квантова ефективність в R -лініях становить $\sim 0,52$. Практично рубіновий лазер випромінює на R_1 -лінії, оскільки вірогідність переходу в ній вище і простіше досяжних порогових умов. Як видно, не всі енергетичні стани беруть участь у процесі генерації індукованого випромінювання. Тому з деякою часткою похибки зручно етапи поглинання і збудження, створення інверсії і випромінювання подавати у вигляді трирівневої моделі (рис. 3.3, б) з відповідними квантовими переходами і населеностями. Проте при цьому не враховується наявність в рубіні дуплетних станів і другорядних рівнів, розширення рівнів, оскільки прийнято $g_1 = g_2 = g_3 = 1$. У рівень E_3 зазвичай включають зелену (4F_2) і синю (4F_1) смуги поглинання, що виконують основну функцію у збудженні рівнів \bar{E} і $2\bar{A}$. Ці рівні характеризуються великою швидкістю релаксації коливань кристалічної решітки. Основний стан E_1 при температурі

$T = 300$ К можна розглядати як один рівень із виродженістю $g_1 = 4$. У кристалі рубіна з масовою концентрацією хрому, рівною 0,05 %, при температурі $T = 300$ К вірогідність невикраїнюючого переходу становить біля $2 \cdot 10^7$ с⁻¹, а час життя квантових частинок у метастабільному стані рівний приблизно $3 \cdot 10^{-3}$ с. Якщо проводити накачування світловим потоком, паралельним осі z рубіна, то показник поглинання для генерації R_1 -лінії становить $0,4$ см⁻¹, а поперечний переріз поглинання рівний $2,5 \cdot 10^{-20}$ см². Зазвичай при практичних розрахунках рубінового лазера застосовується наближена трирівнева модель станів – робоча схема енергетичних рівнів рубіна E_1, E_2, E_3 з відповідними позначеннями вірогідності $A_{21}, A_{31}, S_{32}, W_{12} = B_{12}\rho_\nu, W_{13}B_{13}\rho_\nu, W_{21} = B_{21}\rho_\nu$ населеностей N_1, N_2, N_3 кожного з рівнів.

3.1.3. Чотирирівневий твердотільний лазер

Разом з рубіновими лазерами значного поширення набули лазери на скляній основі, що мають ряд таких переваг, як практично необмежені розміри стрижнів (б...200 см), простота виготовлення зразків будь-якої форми, висока оптична однорідність, простота масового виробництва. В той же час порівняно з іонними кристалами вони мають нижчу теплопровідність і вищий коефіцієнт теплового розширення, що утрудняє розробку імпульсних лазерів з великою частотою повторення.

На сьогодні створені лазери на склі, активованому іонами неодиму, ітербію, ербію, гольмію, тулію, європію, диспрозію та ін.

Кращим є *неодимовий лазер*. Діаграма енергетичних рівнів іонів неодиму достатньо складна, тому зазвичай приймають до уваги ті рівні, які мають істотне значення у процесі генерації, тобто чотирирівневу модель станів (рис. 3.4).

У цій моделі рівень E_1 – основний стан, E_2 – кінцевий рівень, E_3 – метастабільний рівень, E_4 – сукупність всіх кінцевих станів для поглинання випромінювання накачування, що приводить до збудження квантових частинок з рівня E_1 на рівень E_4 .

Час життя частинок у збудженому стані залежно від температури, складу скла і концентрації неодиму змінюється від 10^{-3} до 10^{-5} с. Потім збуджені

частинки не випромінюючи переходять на метастабільний рівень E_3 . Час життя на цьому рівні приблизно рівний 10^{-3} с.

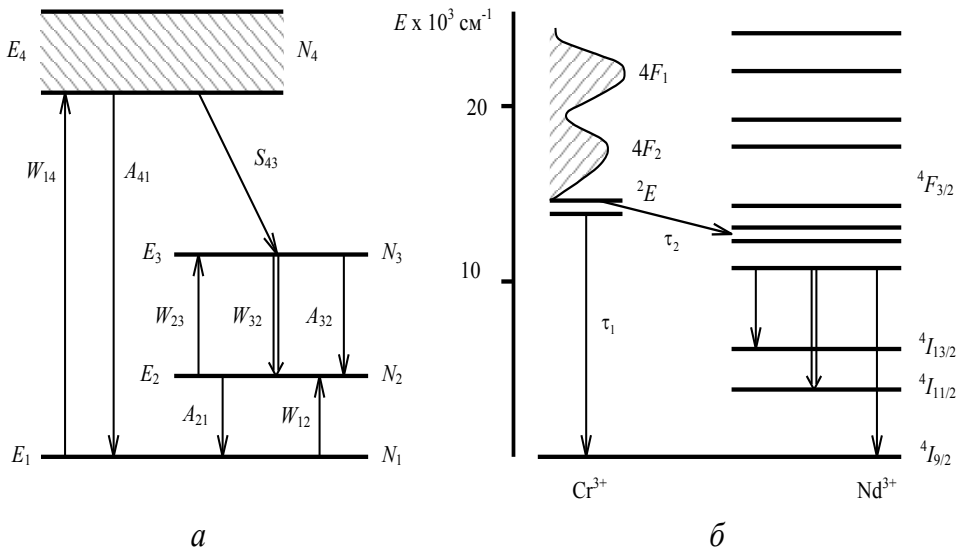


Рисунок 3.4 – Модель енергетичних станів активної речовини чотирирівневого лазера (а) і схема рівнів енергії іонів Cr^{3+} і Nd^{3+} в кристалі YAG (б)

Робочий перехід (генерація) між рівнями E_3 і E_2 відповідає довжині хвилі $\lambda_0 = 1,06$ мкм. При переході $E_4 \rightarrow E_3$ створюється інверсія населеностей ΔN . Рівень E_2 розташований вище за основний рівень E_1 приблизно на 2000 cm^{-1} . Щоб виключити теплові переходи з рівня E_1 на рівень E_2 , повинна бути виконана умова $(E_2 - E_1) \gg kT$ або $(E_2 - E_1) \geq 8kT$. При термодинамічній рівновазі населеність рівня E_2 дуже мала, оскільки рівень E_2 не заповнений. Тому для створення інверсії населеностей $\Delta N = (N_3 - N_2)$ в чотирирівневій активній речовині потрібно значно менше енергії збудження порівняно з трирівневою системою. При цьому чотири кінетичні рівняння (рис. 3.4, а), що описують процес генерації з урахуванням обмежень:

$$N_1 \gg N_4; \quad \frac{dN_4}{dt} \rightarrow 0; \quad S_{43} \gg W_{14},$$

де $W_{14} = B_{14}\rho_\nu$ можна перетворити в рівняння нестационарного режиму:

$$\frac{d(N_3 - N_2)}{dt} = W_{14}(N_0 - \Delta N) - (W_{32} + A_{32})\Delta N,$$

або стаціонарного режиму:

$$\Delta N = \frac{W_{14}N_0}{W_{14} + W_{32} + A_{32}},$$

і розрахувати інверсію населеностей і порогове значення потужності накачування:

$$P_{\text{н пор}} = \frac{N_0 S l h \nu_H \delta m_P}{\tau_\lambda \eta_E b \eta_0 \eta_L}.$$

Найбільш перспективним за своїми можливостями і застосуванням в даний час є твердотільний лазер на ітрій-алюмінієвому гранаті (YAG) з домішкою неодиму. Це чотирирівнева система, хімічний склад якої $Y_3Al_5O_{12}$ (Nd^{3+} ; Cr^{3+} ; Nd^{3+} ; Ho^{3+} ; Er^{3+} ; Yb^{3+}). Кристал граната становить матричну основу, активаторами є перераховані вище рідкоземельні елементи. Структура кристала має об'ємноцентровані кубічні ґрати. YAG, активований іонами Nd^{3+} : Cr^{3+} , є унікальним лазерним матеріалом, оскільки має високу теплопровідність, велику твердість і добрі оптичні характеристики.

Крім того, він є єдиною твердою активною речовиною, на якій вдалося отримати в безперервному режимі потужність більше 1 кВт. Смуги поглинання іонів Nd^{3+} в гранаті розташовані від 11500 до ~ 25000 $см^{-1}$ і відповідають довжинам хвиль $\lambda \sim 0,88...0,4$ мкм.

Три можливі випромінювальні переходи пов'язані з рівнем ${}^4F_{3/2}$; ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ (1,34 мкм); ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ (1,06 мкм); ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ (0,94 мкм). Основним найбільш потужним квантовим переходом є перехід ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$. Час життя метастабільного стану при концентрації іона Nd^{3+} до 3 % становить приблизно 200 мкс. Велика кількість поглинаючих рівнів забезпечує роботу лазера на YAG : Nd^{3+} : Cr^{3+} як в імпульсному, так і в безперервному режимі, а розташування рівня E_2 вище за основний рівень на ~ 2000 $см^{-1}$ – малий поріг збудження (~ 10 Дж $см^{-3}$). Для більшого підвищення ефективності оптичного накачування в кристалічну решітку граната і вводять іони Cr^{3+} .

Проте YAG дорогий і не вдається вирощувати стрижні завдовжки більше 12 см. Типові розміри стрижнів лазера: $l = 3...8$; $d = 0,3...0,5$ см. Промислові зразки лазерів на YAG дають потужність генерації до 250 Вт з густиною $2 \cdot 10^5$ Вт/см², ККД 2,1 %, і розбіжністю близько 30'. Робочий перехід цього генератора лежить в ближній інфрачервоній ділянці на довжині хвилі $\lambda = 1,064$ мкм.

Залежно від умов роботи бувають одно- і багатомодові лазери, причому в одномодовому режимі потужність генерації знижується втричі. В імпульсному режимі частота посилення імпульсів досягає $10^8...10^9$ Гц, з піковою потужністю 30...300 кВт і тривалістю імпульсів 30 нс. Лазери на YAG генерують також ряд інших хвиль випромінювання 0,94; 1,05...1,12; 1,34...1,4 мкм.

Термін служби твердотільних лазерів визначається терміном служби лампи накачування і досягає 1500 годин. Отримана безперервна генерація в лазері на вольфраматі кальцію, активованому тривалентним неодимом: $\text{CaWO}_4(\text{Nd}^{3+})$, на довжинах хвиль 1,058 і 1,065 мкм при температурі 300 і 85 К відповідно. Вихідна потужність такого лазера 10 мВт...1 Вт.

3.1.4. Системи охолодження і термостабілізації лазерних головок

При конструюванні систем охолодження імпульсних лазерів з частотою генерації $f_G \leq 1$ Гц переважні легковихрові і напівпровідникові системи термостабілізації. Для лазерів з частотою генерації імпульсів $f_G \geq 1$ Гц рекомендуються рідинні системи охолодження.

Раціональна конструкція вузлів кріплення стрижня активної речовини і лампи накачування, а також оптимальний вибір зазорів і перерізів каналів тепловідводів дозволяють підвищити ефективність теплообміну, зменшити перепад температури в кристалі, скоротити витрату охолодного середовища. Фотохімічна стійкість, агресивність і корозійна дія охолодних середовищ на матеріали конструкції можуть стати причиною порушення нормальної роботи навіть найнадійнішої системи охолодження.

Системи глибокого охолодження. Для спектроскопічних досліджень характеристик різних активних речовин лазерів, а також з метою отримання оптимальних режимів вихідної енергії і частоти випромінювання застосовують *кріостати*.

Наприклад, дослідження активних середовищ в кріостаті, що має коефі-

цієнт теплообміну $\alpha = 2,5 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, дозволило отримати такі результати. У кристалі рубіна з 0,05 %-им вмістом іонів Cr^{3+} при 77 К порогова потужність накачування на 40% менша, ніж при 300 К. Кристали $\text{CaWO}_4 : \text{Nd}^{3+}$ мають поріг генерації при 77 К удвічі менший, ніж при 300 К. Вихідна енергія кристала $\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{2+}$ при $T = 77 \text{ К}$ і пороговому значенні енергії накачування рівна $E_{\text{вих}} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$. На рис. 3.5 показано структурну схему охолоджувача.

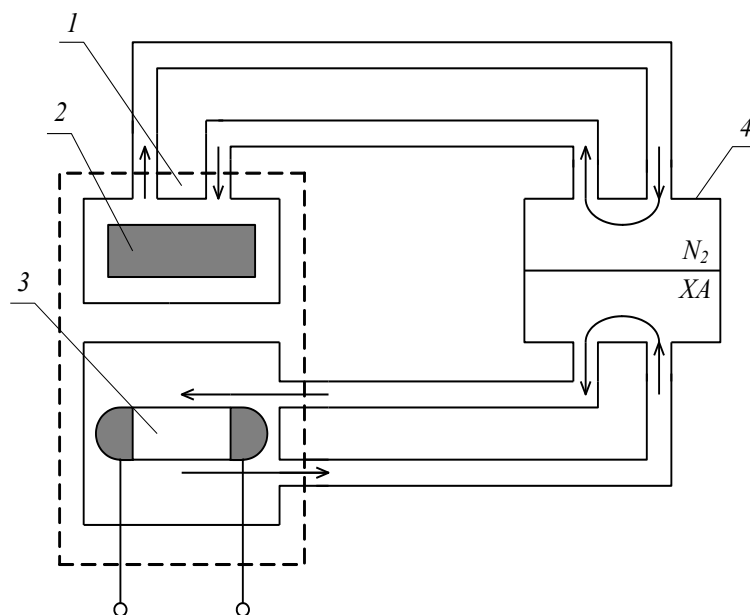


Рисунок 3.5 – Структурна схема системи глибокого охолодження:
 1 – резонатор; 2 – активна речовина; 3 – лампа накачування; 4 – теплообмінник

Для швидкого охолодження активної речовини застосовується малогабаритна двоконтурна система з роздільним охолодженням. Камера цієї системи є герметичним циліндром еліптичного перерізу з високим ступенем чистоти обробки внутрішньої поверхні. В одному із зв'язаних фокусів циліндра знаходиться мікрохолодильник з активною речовиною, а в іншому – імпульсна лампа накачування. Лампа охолоджується оптично прозорою фторо- або кремнійвмісною рідиною, тепло від якої відбирається в спеціальному теплообміннику рідким азотом, що надходить з мікрохолодильника. Рідкий

контур охолодження – замкнутого типу. Активна речовина піддається глибокому охолодженню в мікрохолодильнику. Рідкий азот з посудини місткістю 0,015 м³ під тиском 1 Па подається в теплообмінник. Щоб уникнути закипання на поверхні активної речовини, азот в теплообміннику переохолоджується і потім омиває кристал. Увесь комплекс системи охолодження є стаціонарною установкою, що забезпечує генерацію випромінювання лазера з частотою проходження імпульсів 10...100 Гц при зміні температури навколишнього середовища ± 50 °С.

Замкнуті рідинні системи охолодження. Для лазерів, застосовуваних у малогабаритній апаратурі, розроблена рідинна система термостабілізації з коаксіальною лампою накачування (рис. 3.6).

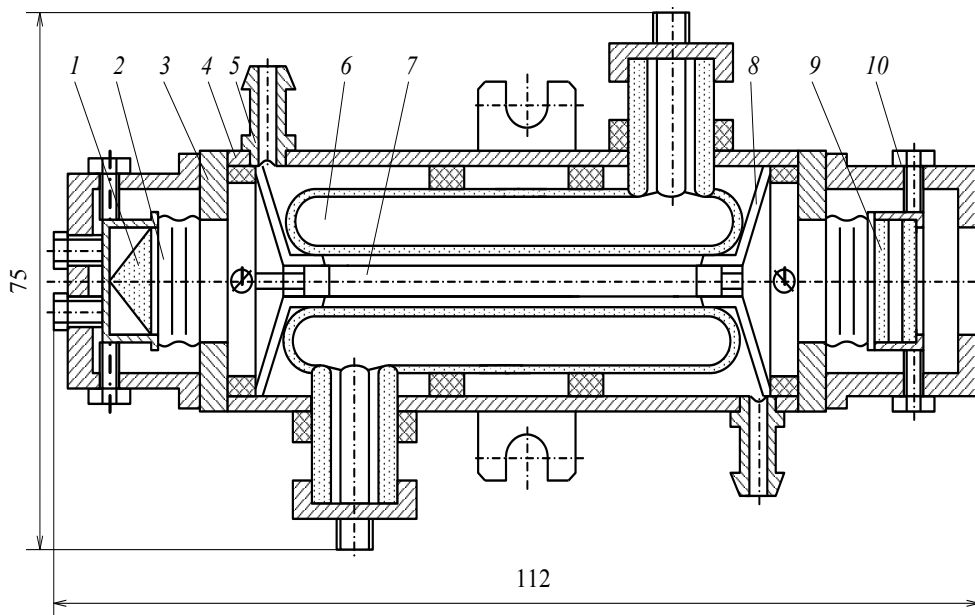


Рисунок 3.6 – Лазерна головка з концентричною імпульсною лампою і рідинною системою охолодження: 1 – призма повного внутрішнього віддзеркалення; 2 – сильфон; 3 – фланець; 4 – корпус; 5 – штуцер; 6 – лампа імпульсна; 7 – кристал; 8 – коронка; 9 – резонансний відбивач; 10 – юстирувальний гвинт

Внутрішній об'єм камери лазера розділений коронками на дві порожнини. Імпульсна лампа накачування і кристал омиваються охолодною рідиною, що заповнює весь внутрішній об'єм герметичного корпусу. Тепло від криста-

ла, імпульсної лампи і частина тепла від відбивача відбирається холодоагентом, що перекачується насосом з однієї порожнини в іншу, а потім передається зовнішньому корпусу. Інша частина тепла, що виділяється у відбивачі, передається кондуктивно, завдяки щільній посадці на корпус. Для збільшення теплообміну в корпусі зроблено чотири гвинтові пази, що збільшують турбулентність потоку і поверхню теплообміну. Таке конструктивне рішення дає можливість знизити масу і габарити, а відсутність сполучних трубок і необхідної герметизації ущільнень обумовлює значне підвищення експлуатаційної надійності пристрою та отримання стійкої генерації з частотою $f_r \sim 1$ Гц.

Вихровий повітроохолоджувач. Цей пристрій дає можливість створити систему охолодження з мінімальною масою і габаритами. При цьому ефективність охолодження порівняно із звичайними газовими системами збільшується у декілька разів.

Принцип охолодження активної речовини в цій системі оснований на утворенні повітряного вихору, що рухається з тангенціальним прискоренням в сопло, яке має форму спіралі Архімеда (сопло-равлик) (рис. 3.7).

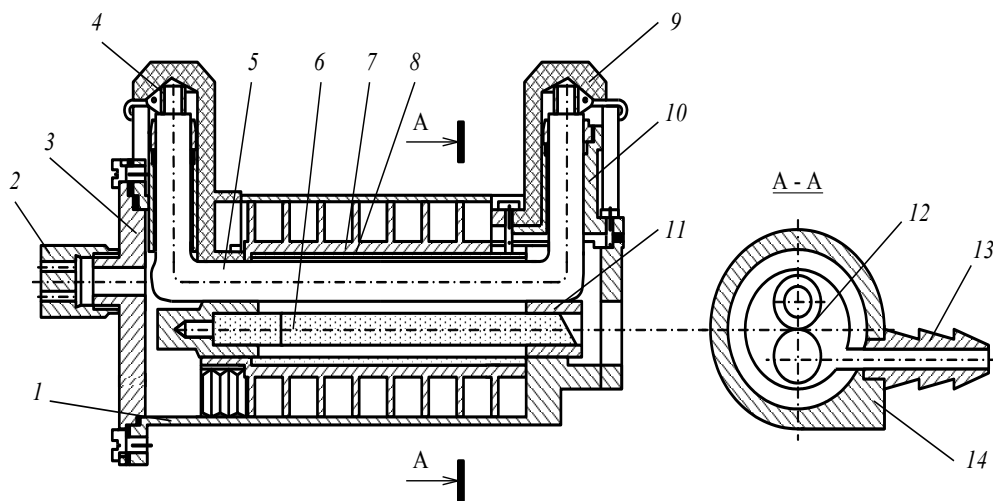


Рисунок 3.7 – Лазерна головка з вихровим повітроохолоджувачем: 1 – дифузор; 2 – патрубок нагрітого потоку повітря; 3 – фланець; 4 – електрод лампи накачування; 5 – лампа; 6 – кристал; 7 – радіатор; 8 – відбивач; 9 – ізолятор; 10 – утримувач лампи; 11 – цанга кристала; 12 – сопло-равлик; 13 – штуцер; 14 – корпус

Кристал закріплюють цангами на осі вихрової трубки, виготовленої з прозорого кварцу. У корпусі вихрової трубки встановлюють сопло-равлик. На протилежному кінці трубки знаходиться дифузор. Стиснене повітря із зовнішньої мережі надходить через підвідний патрубок у сопло. Вихор, що утворюється там, рухається в осьовому напрямі уздовж трубки до дифузора. Інтенсивне закручування повітряного потоку створює градієнт статичного тиску і високу турбулентність. Внаслідок цього у центральній частині вихрової трубки створюється зона зниженого тиску і температури.

Наявність дифузора сприяє зниженню температури в цій зоні на 100 °С. Висока турбулентність вихору забезпечує великі значення коефіцієнта теплообміну $200 \dots 550 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$. Вісь вихрової трубки суміщена з кристалом активної речовини. Відпрацьоване повітря з дифузора надходить всередину відбивача, охолоджує лампу і виходить назовні. Відсутність теплової ізоляції вихрової трубки від корпусу камери не позначається на теплофізичних характеристиках системи охолодження, оскільки низькотемпературна зона в центрі вихору відділяється від стінок трубки периферійними шарами, що мають температуру, близьку до оточуючої. Ця ж особливість виключає запотівання зовнішніх стінок кварцової трубки. Оптимальна площа перерізу сопла при тиску $9,81 \cdot 10^4$ Па становить одну десяту площі перерізу вихрової трубки, а оптимальне відношення довжини трубки до діаметра рівне 3...5.

Для якнайкращого охолодження кристала величину зазору між дисками дифузора необхідно вибрати рівною $(0,05 \dots 0,07) \cdot D_B$, де D_B – діаметр вихрової трубки. Значення коефіцієнта теплообміну α і температури охолодження ΔT залежать від тиску p і відношення $\frac{d}{D_B}$ 0,25...0,8 і становить:

$\alpha = (360 \dots 525) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$. Системи термостабілізації, що використовують вихровий ефект, надійні і конструктивно прості.

Напівпровідникові системи термостабілізації. У цих системах, що працюють на ефекті Пельтьє, суміщені в єдиному блоці освітлювач камери лазера з термоелектричним холодильником (рис. 3.8). Застосування таких систем виправдане при холодопродуктивності термоелектричних 30...40 Вт і при

температурі навколишнього середовища до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. До переваг напівпровідникових систем слід віднести невелику масу і габарити, порівняно малу споживану потужність, можливість швидкого переходу від режиму охолодження до режиму нагріву, можливість роботи в широкому діапазоні навколишніх температур, тиску, вібрацій і прискорень.

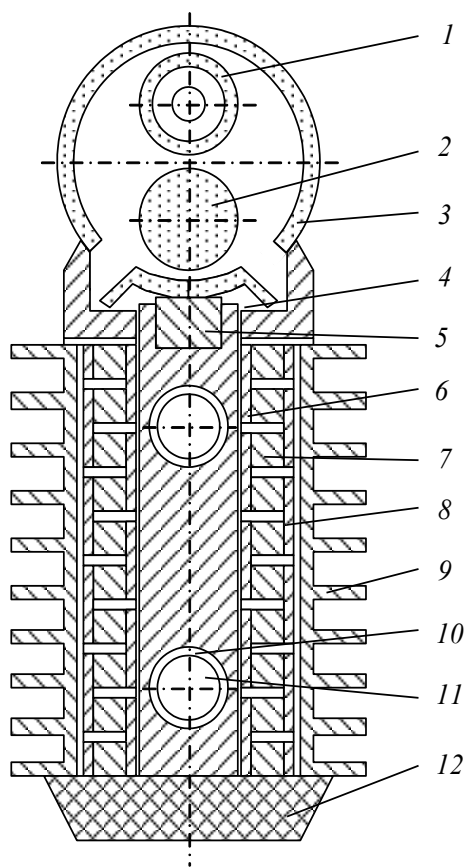


Рисунок 3.8 – Напівпровідникова система термостабілізації активної речовини:
 1 – імпульсна лампа накачування; 2 – кристал; 3 – освітлювач; 4 – мідна шина;
 5 – індієва підкладка; 6 – пластини холодних спаїв; 7 – термоелемент; 8 – пластини
 гарячих спаїв; 9 – радіатор; 10 – керамічні пластини; 11 – термістор; 12 – кришка

Проте при холодопродуктивності 150...200 Вт і більше ці системи за габаритами та енергетичними параметрами поступаються рідинним і компресійним системам. Імпульсна лампа і кристал, закріплені в освітлювачі, кондуктивно охолоджуються шиною, виготовленою з червоної міді. Кристал крі-

питься до шини через м'яку підкладку з чистого індію, що допускає пластичні деформації. В отвір шини вставлені термістори, які керують електричною схемою термобатарей. При роботі лазера мідна шина виконує функцію своєрідного акумулятора теплоти під час генерації випромінювання і акумулятора холоду під час пауз між спалахами.

З метою забезпечення хорошого теплового контакту між тепловідвідною шиною і кристалом рубіна по краю кристала впікається смужка срібла шириною 2,5...3 мм і товщиною 50...70 мкм. Перепади температури на поверхні кристала від спалахів лампи можуть досягати 20 °С. Найбільший вплив на добротність резонатора при цій системі термостабілізації робить несиметрична деформація кристала, що має характер оптичного клина.

Напівпровідникова система термостабілізації створена для лазерів, що працюють з частотою повторення не більш одного спалаху за 2...5 с при $q_m = 10...15 \text{ Вт/см}^2$. Коефіцієнт теплообміну таких систем невеликий і складає

$$50...100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Корпус, що проводить тепло, термобатарей і підкладку кристала іноді поміщають в охолодне середовище певного об'єму, так званий пасивний акумулятор тепла (речовина з низькою температурою плавлення, доброю теплопровідністю і великою прихованою теплотою плавлення). В цьому випадку використовують галій або його евтектичні сплави (температура плавлення $T = 29,8 \text{ °С}$; теплопровідність $35 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; динамічна в'язкість 0,18 Па·с при 30 °С).

Проте одним з істотних недоліків галію і його сплавів є здатність легко переохолоджуватися в рідкому стані до досить низьких температур.

Іншим недоліком, що перешкоджає широкому використанню галієвих сплавів як акумуляторів тепла, є їх висока агресивність по відношенню до металів та ізоляційних матеріалів, причому з підвищенням температури корозійна стійкість матеріалів у середовищі галію різко знижується. При тривалій дії галію погіршуються механічні властивості більшості металів і їх сплавів.

3.2. ГАЗОВІ ЛАЗЕРИ

3.2.1. Загальна характеристика газових лазерів

Газовими називаються лазери, в яких активним середовищем є газ, суміш декількох газів або суміш газу з парою металу [1, 3, 5]. Особливістю активного середовища, що знаходиться в газовій фазі, є його висока оптична однорідність, яка дозволяє застосовувати великі оптичні довжини резонатора і внаслідок цього отримувати високу спрямованість і монохроматичність випромінювання. Інша особливість такого активного середовища – його невелика щільність, внаслідок чого енергетичний спектр активних частинок (атомів, іонів, молекул) не спотворюється через взаємодію з сусідніми активними частинками. Тому енергетичні рівні у спектрі газів вузькі, що дозволяє зосередити енергію випромінювання газового лазера в декількох або навіть одній модах.

При відповідному виборі активного середовища в газових лазерах можна здійснити генерацію в будь-якій частині спектра – від ультрафіолетової ділянки ($\lambda \sim 0,2$ мкм) до далекої інфрачервоної ділянки випромінювання ($\lambda \sim 0,4$ мм).

Перевагами газових лазерів є їх здатність працювати як в безперервному, так і в імпульсному режимах. Ці лазери характеризуються широким діапазоном потужностей випромінювання (~ 100 кВт) і високим ККД (1,5...15 %).

Першими були створені газові лазери, що збуджуються електричним розрядом, направленим уздовж оптичної осі резонатора, та отримали назву *газорозрядних*.

Розрізняють три типи газорозрядних лазерів, де як активні частинки використовують нейтральні атоми, іони і молекули газів. Механізми збудження цих частинок різні.

Інверсія населеностей рівнів у газорозрядних лазерах створюється в результаті проходження крізь активне газове середовище електричного струму (табл. 3.1).

У *лазерах на нейтральних атомах* основним механізмом збудження є непружне зіткнення електрона з атомом (зіткнення 1-го роду). Цей механізм використовують для збудження атомів неону, аргону, криптону і ксенону, а

також пари свинцю, марганцю, міді. Іншим важливим механізмом є резонансне збудження атомів – непружне зіткнення збуджених атомів одного газу з атомами іншого (зіткнення 2-го роду). Цей механізм ефективний тоді, коли енергія метастабільного рівня першого газу близька до енергії збудженого рівня атомів іншого газу. Характерним прикладом активного газового середовища, що збуджується таким чином, є суміш гелію з неоном ($\lambda_0 \sim 0,6328$ мкм; 1,15 мкм).

Таблиця 3.1 – Процеси збудження інверсії населеностей, що протікають в газорозрядних лазерах

Ініціатор	Атомний процес	Молекулярний процес
Фотон	Поглинання \leftarrow випромінювання \rightarrow $h\nu + A \rightarrow A^*$ Іонізація \leftarrow рекомбінація \rightarrow $h\nu + A \rightarrow A^* + e$	Романівське розсіяння $h\nu + AB \rightarrow AB^*$ Дисоціація $\left\{ \begin{array}{l} h\nu + AB \rightarrow A + B \\ h\nu + AB \rightarrow A^+ + B^- \end{array} \right.$
Електрон	Зіткнення 1-го роду Збудження $e + A \rightarrow A^* + e$ Іонізація $e + A \rightarrow A^+ + 2e$ Потрійна рекомбінація $e + A^+ + B \rightarrow A + B$	$e + AB \rightarrow AB^* + e$ $e + AB \rightarrow A^+ + B^- + e$ Дисоціація $\left\{ \begin{array}{l} e + AB \rightarrow A + B + e \\ e + A^+ + B \rightarrow A + B \end{array} \right.$
Атом	Розсіяння, зіткнення 2-го роду $A + B^* \rightarrow A^* + B$ $A^* + B \rightarrow A + (B^+)^* + e$ $A^* + B \rightarrow A + (B^+)^*$	–

Примітка до таблиці 3.1. Умовні позначення: A, B – частинки у нормальному стані; A^* – частинка у збудженому стані; A^+ – позитивно заряджений іон; A^- – негативно заряджений іон; $h\nu$ – фотон; e – електрон.

Найбільш ефективним процесом збудження *іонних лазерів* безперервної дії є спустошення нижнього лазерного рівня за рахунок спонтанного випромінювання і зіткнення збуджених іонів із стінками кювети. Висока населеність верхнього лазерного рівня забезпечується в результаті зіткнення іонів з швидкими електронами у газовому розряді. Активною речовиною в іонному лазері може бути інертний газ: аргон ($\lambda_0 \sim 0,48$ мкм), криптон ($\lambda_0 \sim 0,56$ мкм), неон ($\lambda_0 \sim 0,23$ мкм; $0,33$ мкм), пари різних хімічних елементів (кадмію, цинку, йоду $\lambda_0 \sim 1,01$ мкм), а також іони фосфору ($\lambda_0 \sim 0,42$ мкм), сірки ($\lambda_0 \sim 0,53$ мкм), хлору ($\lambda_0 \sim 0,7$ мкм), бромю ($\lambda \sim 2,8$ мкм) та інших елементів.

У *молекулярних лазерах* інверсія населеностей відбувається під впливом різних процесів (зіткнень молекул з швидкими електронами, непружних зіткнень молекул різних газів в робочій суміші, дисоціації і ін.), які якісно подібні до процесів збудження на нейтральних газах. Найбільш поширеними робочими речовинами в молекулярних лазерах, що використовують енергію коливального та обертового стану, є азот і вуглекислий газ (CO_2 , $\lambda \sim 10,6$ мкм) в суміші з азотом і гелієм.

Газові лазери можуть збуджуватися не тільки подовжнім електричним розрядом. Великі потужності випромінювання забезпечують *газодинамічні*, хімічні, електроіонізаційні і ТЕА-лазери («Transversely Excited, Atmospheric Pressure»), газові імпульсні лазери, що працюють при високому тиску і збуджуювані поперечним електричним розрядом з густиною струму близько 300 А/см^2 .

3.2.2. Лазер на нейтральних атомах гелій-неонової суміші

Типовим лазером на нейтральних атомах є газорозрядний гелій-неоновий лазер, в якому використовується суміш гелію і неону в співвідношенні приблизно 10:1–5:1, при загальному тиску в газорозрядній трубці близько 130 Па. Індуковане випромінювання створюється атомами неону, а атоми гелію беруть участь лише в передачі енергії до атомів неону (рис. 3.9). При збудженні газової суміші електричним струмом (постійним або змінним з частотою близько 30 МГц) виникає тліючий розряд, подібний до розряду в «рекламній» газовій неоновій лампі. В електричному розряді частина атомів неону переходить з основного рівня E_1 на довгоживучі збуджені рівні E_4 і E_5 . Ін-

версія населеностей створюється завдяки великій населеності цих рівнів порівняно з короткоживучим рівнем E_3 . У чистому неоні створенню інверсії населеності заважає метастабільний рівень E_2 , тому корисним виявилось введення в робочу суміш гелію.

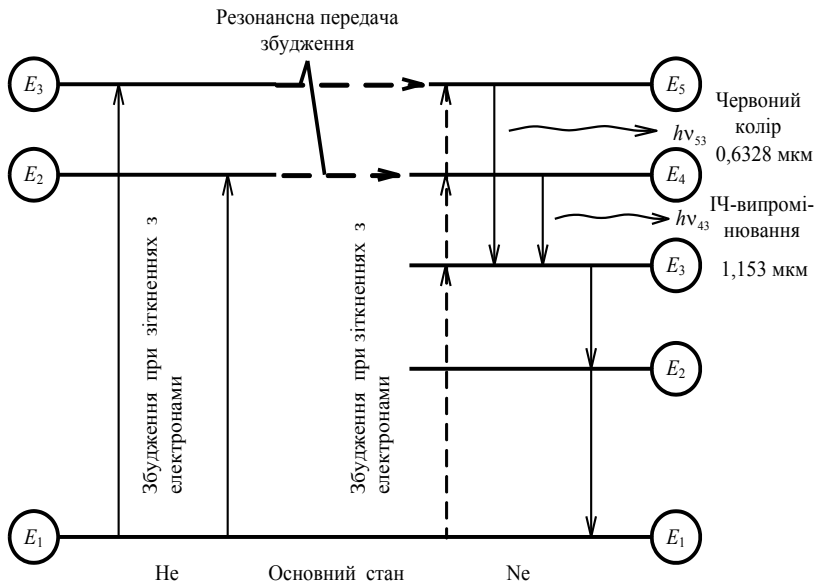


Рисунок 3.9 – Схема енергетичних рівнів гелій-неонового лазера

Під дією електричного розряду частина атомів гелію іонізується і утворюється плазма, що містить електрони з великою кінетичною енергією. Ці електрони, стикаючись з атомами гелію, переводять їх з основного стану E_1 на довгоживучі збуджені рівні E_2 і E_3 , які дуже близькі до рівнів E_4 і E_5 неону.

Тому при зіткненнях збуджених атомів гелію з незбудженими атомами неону виникає висока вірогідність резонансної передачі збудження, внаслідок чого атоми неону виявляються на рівнях E_4 або E_5 , а атоми гелію повертаються в основний стан. Вірогідність збудження атомів неону до рівнів E_2 і E_3 за рахунок зіткнень з атомами гелію невисока, оскільки енергії цих станів істотно відрізняються від енергій рівнів E_2 і E_3 гелію.

Таким чином, використання допоміжного газу – гелію, дає можливість здійснити додаткове заселення енергетичних рівнів неону та отримати інвер-

сію населеностей між рівнями E_3 і E_4 , E_5 .

Оскільки рівень E_3 неону є короткоживучим, то на переходах $E_4 \rightarrow E_3$ і $E_5 \rightarrow E_3$ можна отримати безперервну генерацію. Переходу $E_4 \rightarrow E_3$ відповідає генерація в ближній інфрачервоній ділянці з довжиною хвилі 1,153 мкм, а переходу $E_5 \rightarrow E_3$ – в червоній ділянці видимого спектра з довжиною хвилі 0,6328 мкм.

Кожний з рівнів E_3 , E_4 , E_5 насправді складається з декількох підрівнів, тому в діапазоні видимої та інфрачервоної ділянок спектра спектр гелій-неонового лазера може містити велику кількість (~ 40) спектральних ліній. Виділення потрібної спектральної лінії здійснюється підбором дзеркал оптичного резонатора, введенням у резонатор диспергуючого або селективно поглинаючого елементу. Між рівнями E_4 і E_5 неону є ще один короткоживучий рівень, перехід атомів на який з рівня E_5 дозволяє отримати генерацію на довжині хвилі 3,392 мкм.

У гелій-неоновому лазері робоча газова суміш знаходиться в газорозрядній трубці (рис. 3.10), довжина якої може досягати 0,2...1 м.

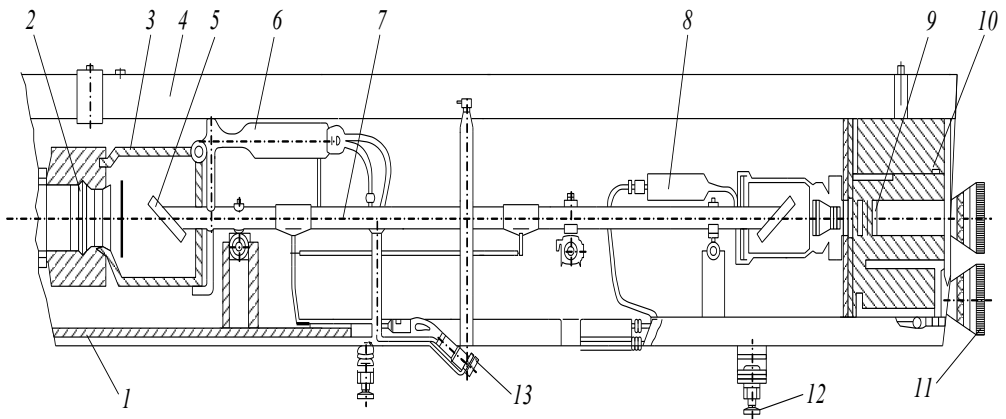


Рисунок 3.10 – Схема конструкції лазерної головки гелій-неонового ОКГ типу ЛГ-36А: 1 – основа; 2 – вихідне сферичне дзеркало; 3 – обойма; 4 – кожух; 5 – вихідне вікно; 6 – оксидний катод; 7 – газорозрядна трубка (кювета); 8 – анод; 9 – плоске дзеркало; 10 – вузол кріплення дзеркала; 11 – юстирувальні гвинти; 12 – опори; 13 – роз'єм

Трубка виготовляється з високоякісного скла або кварцу. Потужність генерації істотно залежить від діаметра трубки. Збільшення діаметра веде до збільшення об'єму робочої суміші, що сприяє зростанню потужності генерації.

Проте із збільшенням діаметра трубки зменшується електронна «температура» плазми, що приводить до зменшення кількості електронів, здатних збуджувати атоми газів, що зрештою знижує потужність генерації. Для зменшення втрат торці газорозрядної трубки закриті плоскопаралельними пластинками 5, які розташовані не перпендикулярно осі трубки, а так, щоб нормаль до цієї пластини становила з віссю трубки кут $i_B = \text{arctg} n$ (n – показник заломлення матеріалу пластини), що називається кутом Брюстера. Особливість віддзеркалення електромагнітної хвилі від межі розділу різних середовищ під кутом i_B широко застосовується в лазерній техніці. Установка вихідних вікон кювети з активним середовищем під кутом Брюстера однозначно визначає поляризацію лазерного випромінювання. Для випромінювання, поляризованого в площині падіння, втрати у резонаторі мінімальні. Природно, що саме це плоскополяризоване випромінювання встановлюється в лазері і є переважаючим.

Газорозрядна трубка поміщена в оптичний резонатор, який утворений дзеркалами 2 з інтерференційним покриттям. Дзеркала закріплені у фланцях 10, конструкція яких дозволяє повертати дзеркала в двох взаємно перпендикулярних площинах при юстируванні шляхом обертання юстирувальних гвинтів 11. Збудження газової суміші здійснюється шляхом подачі високочастотної напруги з блока живлення на електроди. Блоком живлення є високочастотний генератор, що забезпечує генерування електромагнітних коливань з частотою близько 30 МГц при потужності декілька десятків ватів.

Найбільш часто використовується живлення газових лазерів постійним струмом при напрузі 1000...2000 В, отримуваним за допомогою стабілізованих випрямлячів. В цьому випадку газорозрядна трубка забезпечується катодом, що підігрівається, або холодним катодом, і анодом. Для запалювання розряду в трубці використовується електрод, на який подається імпульсна напруга близько 12 кВ. Цю напругу отримують шляхом розряду конденсатора ємністю 1...2 мкФ через первинну обмотку імпульсного трансформатора.

Перевагою гелій-неонових лазерів є когерентність їх випромінювання,

мала споживана потужність і невеликі габарити. Основні недоліки – невисокий ККД (0,01...0,1 %) і низька вихідна потужність, що не перевищує 60 мВт. Ці лазери можуть працювати і в імпульсному режимі, якщо для збудження використовувати імпульсну напругу великої амплітуди при тривалості в одиниці мікросекунд. Головні сфери практичного застосування гелій-неонових лазерів – наукові дослідження і вимірювальна техніка, а також медицина.

3.2.3. Іонний аргонний лазер

З іонних лазерів найбільшого поширення набув аргонний лазер безперервного випромінювання на довжині хвилі 0,48 мкм. Історично механізм збудження іонного лазера був запропонований Е. Гордоном в 1964 році. Інверсія населеностей між верхнім $4p$ і нижнім $4s$ робочими рівнями створюється таким чином (рис. 3.11).

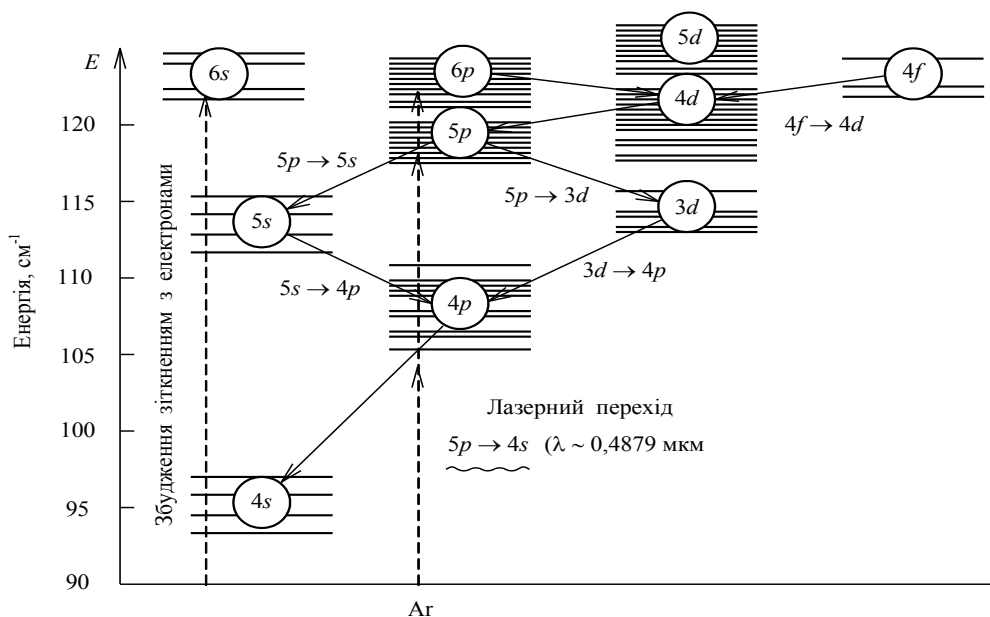


Рисунок 3.11 – Схема рівнів і квантові переходи між рівнями аргону: ($4p \rightarrow 4s$ – стійкий лазерний перехід на $\lambda_0 = 0,487$ мкм)

Рівень $4p$, що має порівняно з рівнем $4s$ більший час життя, заселяється іонами аргону за рахунок їх зіткнення з швидкими електронами в газовому розряді і за рахунок переходів збуджених іонів з групи розташованих вище

рівнів $5p$. В той же час рівень $5p$, що має дуже короткий час життя, приблизно в 25 разів менший, ніж час життя рівня $4p$, швидко спустошується за рахунок повернення іонів в основний стан. Оскільки рівні $5p$; $5s$; $4p$ складаються з груп підрівнів, генерація може відбуватися одночасно на декількох довжинах хвиль: від 0,45 до 0,53 мкм.

Особливості конструкції аргонового лазера обумовлені тим, що для його роботи потрібно пропускати через газ струм великої густини, оскільки спочатку потрібно іонізувати нейтральні атоми аргону. Тому необхідно передбачити ефективну систему тепловідведення від газорозрядної трубки.

Газовий розряд створюють в тонкому капілярі діаметром 5 мм, охолоджуваному рідким холодоагентом. Робочий тиск газу близько 220 Па. Для збільшення концентрації електронів у центрі капіляра в розрядному проміжку за допомогою магнітів створюється магнітне поле, яке стискає розряд і не дає йому дотикатися стінок.

Катод емітує електрони, які під дією електричної напруги, прикладеної між катодом і анодом, рухаються по капіляру до анода. При цьому газ в капілярі теж починає переміщатися від катоду до аноду, що може привести до гасіння розряду, оскільки у анода тиск газу значно підвищується. Для вирівнювання тиску по довжині капіляра катодна і анодна порожнини газорозрядної трубки з'єднують обвідною трубкою, що забезпечує циркуляцію газу.

В перших іонних лазерах використовувалися кварцові капіляри, термін служби яких не перевищував 100 годин. У пізніших конструкціях застосовувалися металокерамічні капіляри. Перспективними є капіляри на основі окислів берилію, що працюють близько 1000 годин.

Значним досягненням в конструкції іонних лазерів стало створення лазерної головки з кільцевим розрядом та отримання генерації в ультрафіолетовій області спектра. Кювета є замкнутим контуром, одною із сторін якого є капіляр у вигляді вторинної обмотки одновиткового високочастотного трансформатора. У цій кюветі немає електродів, які, як правило, забруднюють домішками активне середовище. Іншими перевагами цієї конструкції є зниження внутрішніх шумів і порівняльно мале розширення спектральної лінії.

Блоком живлення іонного лазера є потужний (близько 10 кВт) випрямляч, вихідна напруга якого становить 200...400 В. Можна використовувати та-

кож високочастотне збудження, при якому збільшується довговічність капіляра за рахунок того, що іони, бомбардуючи його стінки, під час руху у високочастотному полі не встигають набути великої швидкості. Проте блок живлення в цьому випадку виходить значно складнішим, ніж при збудженні лазера постійним струмом.

На сьогодні іонні аргонові лазери є найпотужнішими джерелами безперервного когерентного випромінювання в ультрафіолетовому і видимому діапазонах спектра. Створено лазери з потужністю випромінювання в 150 Вт. Теоретичні оцінки показують, що потужність цих лазерів може бути збільшена до декількох сотень ватів.

Широкому поширенню потужних аргонних лазерів перешкоджає їх висока вартість, складність, малий ККД ($\sim 0,1\%$) і велика споживана потужність (3...5 кВт).

Основними сферами застосування аргонних лазерів є фотохімія, лазерні технології і медицина. Особливо перспективне використання в медицині короткохвильового ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі 0,26 мкм, яке на 90 % поглинається нуклеїновими кислотами і лише на 10 % – білками.

У цьому випадку лазерне випромінювання, що отримується подвоєнням частоти аргонного лазера, виявляється ефективнішим рентгенівського і γ -випромінювань. Подвоєння частоти випромінювання здійснюється спеціальним пристроєм, принцип дії якого оснований на нелінійних ефектах в кристалах. Останнім часом розроблений також кадмій-гелієвий лазер, що відрізняється низькими пороговими потужностями живлення (близько 70 Вт) і великою потужністю випромінювання $P_{\text{ВИХ}} \sim 0,3...0,4$ Вт на довжині хвилі 0,839 мкм.

3.2.4. Молекулярний CO₂ лазер

Атомні і іонні лазери мають малий ККД у зв'язку з тим, що верхній робочий рівень розташований дуже високо над основним станом, і в процесі збудження бере участь лише мала частка від загальної кількості електронів. З погляду підвищення ККД газорозрядних лазерів бажано, щоб робочі рівні були розташовані по можливості нижче. Як такі рівні доцільно використовувати коливальні рівні молекул CO₂, H₂O, D₂O, CH₃, HCN.

Першість в отриманні генерації на молекулах CO_2 (рис. 3.12) належить С.К. Пателу. Майже за два роки (1964–1965) він отримав потужність безперервного випромінювання газового лазера спочатку 220 Вт, потім 450 Вт і 925 Вт на суміші $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$ з ККД $\cong 10\%$. Для того часу це було сенсацією, якщо порівняти ці результати з потужністю близько 2 мВт у гелій-неоновому лазері.

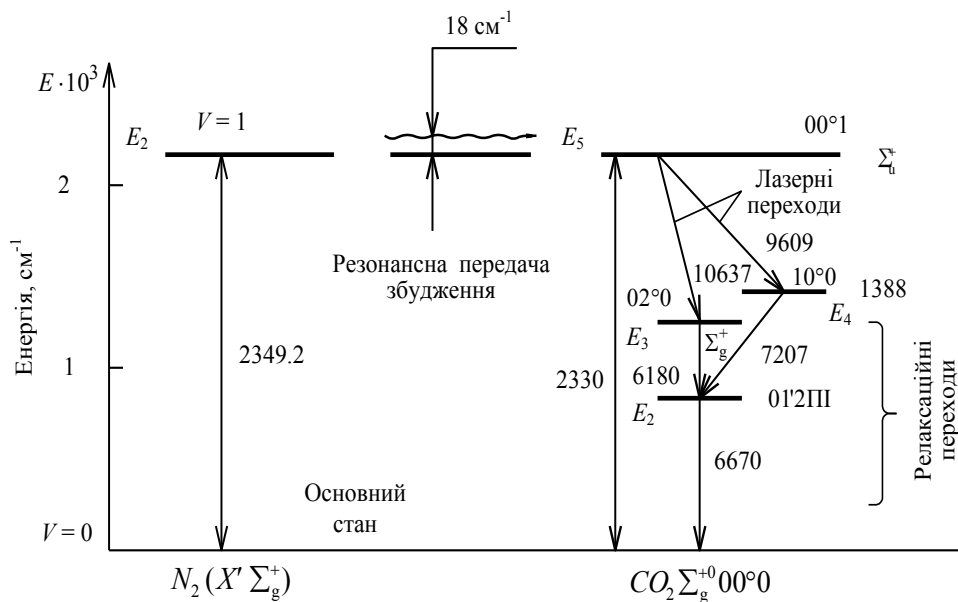


Рисунок 3.12 – Схема нижніх коливальних енергетичних рівнів молекул CO_2 і N_2 та квантових переходів молекули CO_2 (індекс ν позначає коливальні рівні)

Молекула CO_2 має три частоти власних коливань, яким відповідають рівні E_3 , E_4 і E_5 . Заселення цих рівнів в газовому розряді відбувається унаслідок трьох основних процесів.

Перший з них – збудження молекул CO_2 при їх зіткненнях з швидкими електронами. Використання такого механізму збудження дозволяє створити лазер, що дає в безперервному режимі випромінювання з потужністю близько 10 Вт при ККД, рівному 10%. Значне підвищення потужності і ККД досягається додаванням до CO_2 молекулярного азоту і гелію.

У газовому розряді відбувається інтенсивне збудження молекул азоту до рівня E_2 вуглекислого газу. Збіг енергетичних рівнів азоту і CO_2 майже ідеальний – близько 18 см^{-1} . За рахунок резонансної передачі збудження від

молекули азоту до молекули CO_2 населеність рівня E_5 значно збільшується. Це другий процес.

Гелій вводиться в робочу суміш для зменшення її температури, це знижує теплове заселення всіх рівнів і збільшує інверсію населеності.

Третій механізм додаткового заселення рівня E_5 молекули CO_2 полягає в здійсненні каскадних переходів на цей рівень молекули вуглекислого газу, коливально-збуджена за рахунок зіткнень з електронами і перейшла на вищі енергетичні рівні, не показані на рис. 3.12. Індуковане випромінювання в лазері на CO_2 викликане переходами $E_5 \rightarrow E_4$ і $E_5 \rightarrow E_3$. Особливістю лазера на CO_2 є великий час життя верхнього рівня (порядку $2,6 \cdot 10^{-3}$ с), завдяки чому цей рівень у відсутності генерації служить накопичувачем енергії, яка при високій добротності резонатора звільняється у вигляді потужного імпульсу.

Найбільш інтенсивним є перехід $E_5 \rightarrow E_3$ з довжиною хвилі 10,6 мкм, який може майже повністю пригнічувати лазерну генерацію в переході $E_5 \rightarrow E_4$ на довжині хвилі 9,6 мкм. Довжина хвилі 10,6 мкм відповідає вікну прозорості атмосфери, що відкриває можливість застосування цього випромінювання в оптичній локації. Кожний з коливальних рівнів, показаний на рис. 3.12, спрощений, оскільки насправді є смугою, що включає до 30 підрівнів. Тому спектр генерації в лазері на CO_2 дуже складний, може виникнути на великій кількості переходів і мати декілька сотень ліній. Довжини хвилі випромінювання, що генерується, лежать в інтервалі 9,2...11,4 мкм.

Істотною особливістю газорозрядної трубки лазера на суміші вуглекислого газу з азотом є ведення безперервного відкачування робочої суміші. За рахунок відкачування робоча суміш безперервно замінюється новою, охолодженою, що покращує відведення тепла і сприяє збільшенню потужності випромінювання. Потужність генерації такого лазера становить 10...20 Вт. Основна складність полягає в розробці надійної конструкції дзеркал і вікон кювети.

Значно більшу потужність (більше 100 Вт) можна отримати за допомогою лазера з секціонованою газорозрядною трубкою. Використання порівняно коротких секцій, на кожен з яких подається електричний струм, дає можливість спростити запалювання і підтримку тліючого розряду при великій загальній довжині газорозрядної трубки, що досягає декількох метрів.

Однією з особливостей лазера на вуглекислому газі є незалежність вихідної потужності і ККД від діаметра розрядної трубки, що дозволяє застосовувати газорозрядні трубки великого діаметра (40...70 мм), для яких легше виконати систему охолодження. Збільшення довжини розрядної трубки приводить приблизно до пропорційного збільшення потужності.

Таким чином, в режимі безперервної генерації можна досягти потужності в десятки кіловат при ККД до 30 % при теоретичній межі близько 40 %.

Генерацію з потужністю в десятки ватів можна отримати в лазерах на вуглекислому газі з відпаяною трубкою. Довжина розрядної трубки такого лазера становить декілька десятків сантиметрів, споживана лазером потужність невелика (менша 100 Вт).

Лазери на вуглекислому газі знаходять широке застосування в нелінійній оптиці і в лазерних технологічних установках. У технологічних цілях використовуються також молекулярні лазери на азоті, генерація в яких спостерігається при збудженні молекул в сильноточному високовольтному розряді. Потужності випромінювання деяких молекулярних лазерів такі: ОКГ-15 $P_{\text{ВИХ}} = 10$ Вт; ЛГ-22 $P_{\text{ВИХ}} = 40$ Вт; ЛГИ-21 $P_{\text{ВИХ}} = 10$ кВт.

На рис. 3.13 наведено конструкцію молекулярного CO_2 лазера.

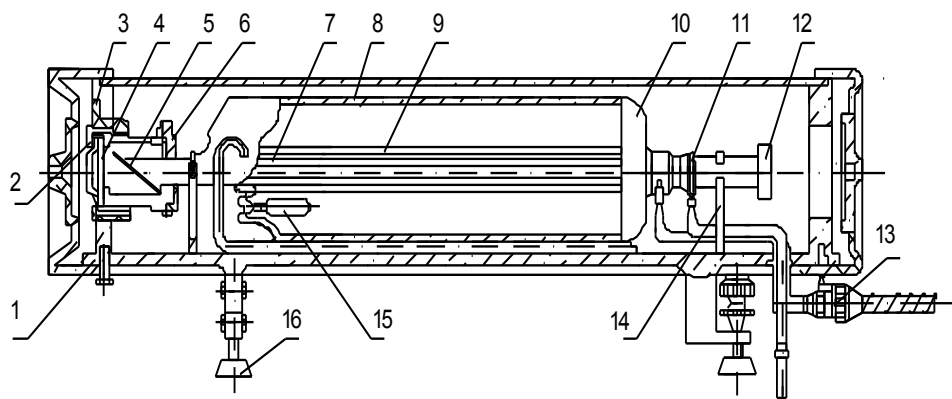


Рисунок 3.13 – Конструкція головки молекулярного CO_2 лазера типу ЛГ-23:

- 1 – основа; 2 – фіксатор; 3 – юстирувальний вузол; 4 – вихідне дзеркало;
- 5 – вихідне вікно; 6 – манжета; 7 – скляний капіляр кювети; 8 – резервуар з газом;
- 9 – оболонка водяного охолодження; 10 – кювета; 11 – анод;
- 12 – внутрішнє дзеркало; 13 – роз'єм; 14 – стійка; 15 – катод; 16 – опора

3.2.5. Газодинамічні лазери

Газові лазери, у яких джерелами енергії є коливально-збуджені молекули, а інверсія населеностей створюється шляхом швидкого розширення заздалегідь нагрітої підсилюючої газової суміші, що рухається з надзвуковою швидкістю через оптичний резонатор, називаються газодинамічними оптичними квантовими генераторами. Вперше ідею їх створення та отримання генерації в 1968 році на хвилі довжиною $\lambda_0 = 10,6$ мкм здійснили О.М. Прохоров і В.К. Конюхов. Активним середовищем в таких генераторах є газові суміші молекул вуглекислого і чадного газу CO_2 , CO ; азоту і окислу азоту N_2 , NO_2 ; водяної пари H_2O , кисню O_2 і благородних газів He , Ne , Ar , Kr .

В основному в газодинамічних лазерах використовують газову суміш: N_2 (80...90 %) об'ємних часток; CO_2 (5...10 %) і водяну пару H_2O (1...2 %); молекулярний азот – газ з великим часом коливальної релаксації і коливальне збудження N_2 зберігається навіть при високій температурі $T = (1300...1400)$ К.

Молекулярний вуглекислий газ CO_2 є другим компонентом суміші. Молекула CO_2 має дозволений квантовий перехід на довжині хвилі $\lambda_0 = 10,6$ мкм і збуджений коливальний рівень її $00^{\circ}1$ співпадає з коливальним рівнем молекули азоту. Між ними відбувається резонансна передача енергії коливального збудження. Таким чином, енергія коливального руху молекули азоту є резервом, звідки черпається енергія для лазерного випромінювання.

Молекула CO_2 має малий час коливальної релаксації і населеність її рівнів на шляху до оптичного резонатора (рис. 3.14) близька до рівноважної.

Тільки населеність збудженого рівня $00^{\circ}1$ підтримується постійною за рахунок зіткнень з молекулами N_2 . Населеність нижнього рівня молекули CO_2 $10^{\circ}0$ ($E = 1388$ см⁻¹) при температурі надзвукового газового потоку $T = 300^{\circ}$ К мала і тому в газі, що проходить через оптичний резонатор, має місце інверсія населеностей. За час, протягом якого газова суміш проходить резонатор, кожна молекула CO_2 здійснює 3–4 цикли: перехід з основного стану на рівень $00^{\circ}1 \rightarrow$ випромінювальний перехід при зіткненні з коливально-збудженою молекулою N_2 і перехід релаксації на основний рівень $10^{\circ}0$. Водяна пара H_2O скорочує час життя молекул CO_2 на нижньому енергетичному рівні і прискорюють перехід релаксації в основний стан. Цю ж функцію може виконати гелій з концентрацією $\sim 40...60$ % при заміщенні азоту.

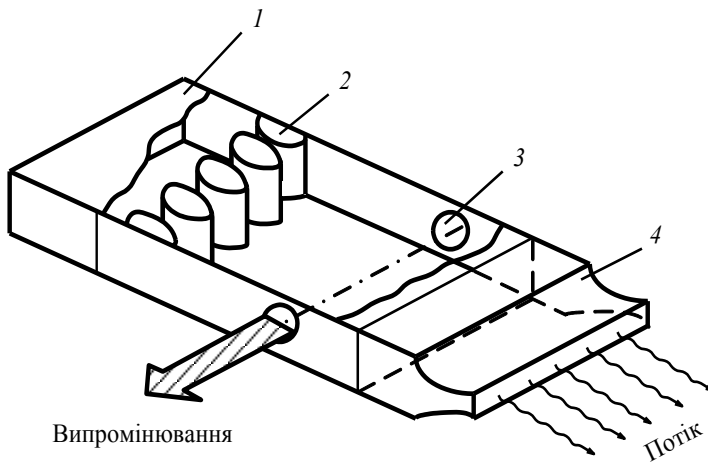


Рисунок 3.14 – Схема конструкції газодинамічного лазера:
 1 – камера згоряння; 2 – надзвукові сопла; 3 – оптичний резонатор; 4 – дифузор

Для створення інверсії населеності при швидкому розширенні газу використовується спосіб пропускання суміші вуглекислого газу з азотом крізь надзвукове сопло Лаваля.

У камеру такого газодинамічного лазера (рис. 3.14) подається пальне (C_2N_2 або CO) та окислювач (повітря). В результаті горіння утворюється гаряча газова суміш, що складається з вуглекислого газу і водяної пари. Для забезпечення необхідних пропорцій газової суміші (приблизно 10 % CO_2 і 1 % водяної пари H_2O) і заданої температури (близько 1400 К) в камеру додається азот N_2 .

Коливальна енергія молекул азоту передається в резонансних зіткненнях молекулами вуглекислого газу. Нагріта газова суміш швидко адіабатично розширюється і крізь решітки надзвукових сопел надходить в оптичний резонатор.

Параметри установки вибирають так, щоб в резонаторі населеність верхнього коливального рівня молекул CO_2 відповідала температурі в камері, а населеність нижнього рівня – температурі газового потоку за соплом. Унаслідок високої щільності потоку і його високої швидкості витоку, що відповідає числу Маха близько чотирьох, досягається інверсія, яка забезпечує роботу лазера з великою вихідною потужністю. Молекули N_2 , проходячи крізь сопло, втрачають частину коливальних квантів, а молекули CO_2 втрачають практично всю свою енергію. Ефективність сопла оцінюється величиною

$\varphi_C \sim 0,5 \dots 0,8$. Це ККД сопла – відносна кількість коливальних квантів на виході з сопла до кількості квантів на вході.

У дифузорі, куди газ потрапляє після резонатора, потік сповільнюється, і тиск в ньому піднімається вище атмосферного, тому вихлоп відпрацьованого газу здійснюється без відкачування.

Газодинамічні лазери, робочу суміш в яких утворюють продукти згоряння, забезпечують потужності випромінювання, що перевищують в безперервному режимі 100 кВт.

Перспективні імпульсні газодинамічні лазери з накачуванням вибухом. У таких пристроях вибухова суміш газів підпалюється електричною іскрою. При вибуху в камері згоряння утворюється гаряча суміш вуглекислого газу, водяної пари та азоту, що має необхідний тиск, і робоча суміш надходить крізь сопло в резонатор.

На сьогодні ведеться розробка імпульсних газодинамічних лазерів з накачуванням від вибуху твердого пального.

3.3. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ЛАЗЕРИ

3.3.1. Процеси в напівпровідниковій активній речовині

На сьогодні створено велику кількість напівпровідникових лазерів різних типів: охолоджуваних і не охолоджуваних з різними схемами збудження, на різних матеріалах: ZnS; ZnO; ZnSe; CdS; CdTe; GaSe; GaTe; GaAs; GaAs_{1-x}Sb_x; Al_{1-x}Ga_xAs; GaSb; PbS; PbSe; PbTe; InSb; InAs_{1-x}Sb_x і т.д. Ці лазери перекривають значний діапазон довжин хвиль від ультрафіолетового до дальнього інфрачервоного: 0,33; 0,37; 0,46; 0,49; 0,53; 0,59; 0,63...0,9; 0,78; 0,83...0,91; 0,9...1,5; 1,01...1,55; 2,1; 3,1; 3,1...5,4; 3...15; 4,3; 5,2; 6,5; 3,9...8,5; 6; 28; 8...31,2 і т.д. Великими їх перевагами є малі габарити і високий ККД (близько 80 %). Напівпровідникові лазери через особливості енергетичної структури активної речовини істотно відрізняються від лазерів інших типів [1, 3, 5].

Специфіка процесів генерування випромінювання в напівпровідникових лазерах багато в чому обумовлена системою енергетичних рівнів напівпровідника. На відміну від окремих атомів і молекул, напівпровідникові кристали мають не вузькі енергетичні рівні, а широкі смуги – зони енергетичних

станів. Дозволені зони відокремлені одна від одної забороненими зонами (рис. 3.15).

У напівпровіднику, підданому нагріву, опромінюванню або пропусканню струму, електрони валентної зони, поглинаючи енергію, що підводиться ззовні, набувають здатності долати заборонену зону і переходити у вищу енергетичну зону – зону провідності.

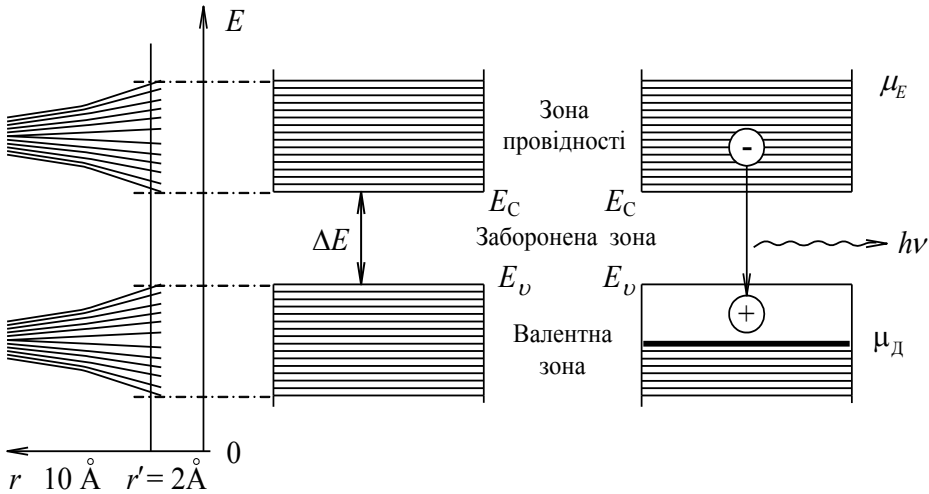


Рисунок 3.15 – Енергетичний спектр напівпровідникового кристала

У результаті цього утворюються пари носіїв заряду: електрони в зоні провідності і дірки у валентній зоні, що приводить до **електронно-дірчастої провідності**. Можливий, очевидно, і зворотний перехід електронів із збудженого атома на нижчий енергетичний рівень: із зони провідності у валентну зону. В результаті такого переходу пари електрон-дірка **рекомбінують**, тобто при заповненні електронами порожніх місць (дірок) у валентній зоні, електрон і дірка зникають, виділяючи надмірну енергію, отриману електронами ззовні в процесі збудження. Цей процес триває приблизно $10^{-10} \dots 10^{-12}$ с.

У природних умовах за відсутності яких-небудь зовнішніх дій на напівпровідник, електронно-дірчасті пари виникають і рекомбінують в результаті теплового руху і спонтанного випускання фотонів, причому в напівпровіднику встановлюється теплова рівновага електронів і дірок. Вона характеризується деякою рівноважною кількістю електронів в зоні провідності і дірок у

валентній зоні. Вірогідність заповнення електроном будь-якого рівня з енергією E при будь-якій температурі T як у валентній зоні, так і в зоні провідності описується формулою Фермі–Дірака:

$$f_{F-D}(E) = \left(1 + \exp \frac{e - \mu}{kT} \right)^{-1}.$$

У різних типах напівпровідників ширина забороненої зони ΔE досягає від 0,001 до 3 еВ.

В стані теплової рівноваги кількість електронів у валентній зоні у багато разів більша, ніж в зоні провідності. Тому при освітленні напівпровідника поглинання світла переважає над підсиленням. Для підсилення світла необхідно створити особливі умови, при яких концентрація електронів поблизу дна зони провідності E_C була б більше їх концентрації поблизу стелі валентної зони E_V , тобто $N_C > N_V$. У цих умовах кількість актів спонтанної та індукованої рекомбінації переважатиме над кількістю актів поглинання і відбудеться посилення світла. Умова $N_C > N_V$ виконується при настанні в напівпровіднику так званої виродженості, тобто такого стану, при якому всі рівні в нижній частині зони провідності зайняті електронами, або у верхній частині валентної зони – дірками. Найвищий рівень енергії μ_E , до якого електрони щільно заповнюють зону провідності, називається рівнем Фермі для електронів. Вірогідність заповнення його електронами рівна:

$$f_{F-D}(E)_E = \left(1 + \exp \frac{e - \mu_E}{kT} \right)^{-1}.$$

Чим більше електронів потрапили в зону провідності, тим вище розташований рівень Фермі, тим сильніше виродженість електронів в напівпровіднику (рис. 3.15). Подібна картина спостерігається і для дірок, тільки в цьому випадку рівень Фермі для дірок μ_D розташований у валентній зоні і із збільшенням кількості дірок опускається все нижче і нижче. Функція вірогідності заповнення рівнів дірками має вигляд:

$$f_{F-D}(E)_D = 1 - f_{F-D}(E)_E.$$

Проведемо елементарний аналіз вірогідності заповнення енергетичного рівня електронів μ_E і дірок μ_D при різних температурах та значеннях енергії.

1. При температурі напівпровідника $T=0$ К і $E > \mu_E$, $f_{F-D}(E)_E = 0$, тобто всі стани енергій $E > \mu_E$ вільні.

2. При $T=0$ К і $E < \mu_E$, $f_{F-D}(E)_E = 1$. Це означає, що при температурі напівпровідника $T=0$ К всі стани з енергією $E \leq \mu_E$ заповнені, а $E \geq \mu_E$ – вільні.

3. При $T \neq 0$ К і $E = \mu_E$, $f_{F-D}(E)_E = 0,5$. Це означає, що при температурі напівпровідника $T \neq 0$ К рівень Фермі має зміст енергії рівня, вірогідність заповнення якого електронами рівна 0,5.

Якщо в напівпровіднику одночасно звироднілі електрони і дірки, то відстань між рівнями Фермі для електронів μ_E і для дірок μ_D більше, ніж ширина забороненої зони, тобто:

$$\mu_E - \mu_D > \Delta E. \quad (3.1)$$

Цей енергетичний стан, необхідний для роботи напівпровідникового лазера, прийнято називати *інверсією населеностей рівнів*.

Електрони із зони провідності можуть перейти у валентну зону тільки на вільні рівні, які лежать в інтервалі від E_V до μ_D , оскільки решта рівнів вже зайнята електронами. Електрони з валентної зони з тієї ж причини практично можуть перейти в зону провідності тільки на рівні, які лежать вище за рівень Фермі для електронів μ_E . Таким чином, якщо надати на звироднілий напівпровідник додаткову дію, енергія якої лежить в інтервалі $(E_C - E_V) \leq E \leq (\mu_E - \mu_D)$, то такий напівпровідник генеруватиме кванти випромінювання (фотони).

Для отримання інверсії в чистому напівпровіднику необхідно досягти виродженості електронів і дірок та виконання умови $\mu_E - \mu_D > \Delta E$. Чим вище температура кристала, тим важче це здійснити, оскільки з підвищенням температури електрони і дірки прагнуть на вищі енергетичні рівні, щільність заповнення нижніх станів зменшується, рівні Фермі наближаються до забороненої зони. Тому всі напівпровідникові лазери легше збуджувати при низьких температурах.

Напівпровідникові лазери, що існують в даний час, створені на основі кристалів з прямими переходами. Незважаючи на деякі успіхи в отриманні

індукованого випромінювання в кристалах з непрямыми переходами GaP, SiC, Ge, Si і т.ін., лазер достатньо потужного випромінювання створити на них, на жаль, не вдалося. Лазери з прямими переходами відрізняються один від одного лише способами створення інверсії населеностей, тобто способами реалізації умови (3.1).

Класифікуючи за цією ознакою, лазери можна розбити на чотири основні групи: лазери на $p-n$ переході (інжекційні лазери); лазери з електронним збудженням; лазери з оптичним накачуванням і, нарешті, лазери з прямим електричним збудженням (лавинний пробій) – рис. 3.16.

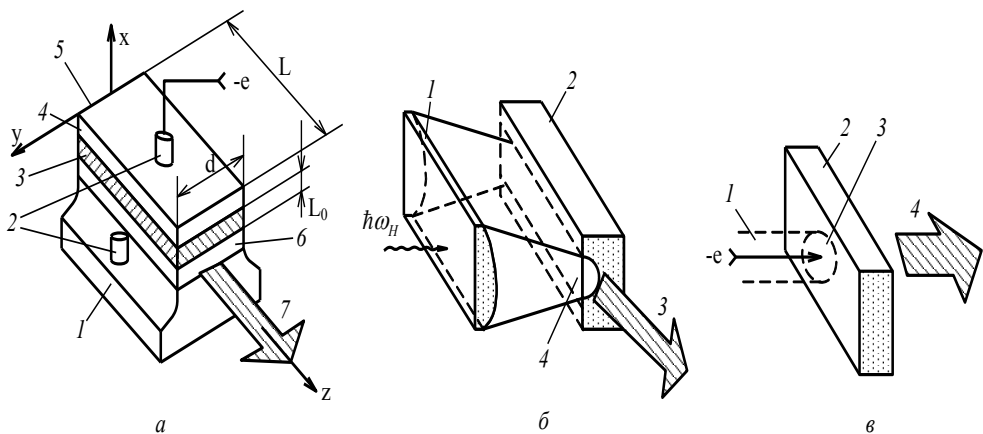


Рисунок 3.16 – Основні схеми і методи збудження напівпровідникових лазерів: інжекційні напівпровідникові лазерні діоди з контактами, широким резонатором і смужовою мезаструктурою 1 – молибденова позолочена підкладка, 2 – електричні контакти інжекції носіїв, 3 – $p-n$ перехід напівпровідника, 4 – напівпровідник p -типу, 5 – поліровані грані, 6 – напівпровідник n -типу, 7 – випромінювання (а); напівпровідниковий лазер з оптичним накачуванням 1 – циліндрова лінза, 2 – кристал, 3 – випромінювання, 4 – область збудження (б); напівпровідниковий лазер з електронним накачуванням з подовжньою конфігурацією 1 – пучок швидких електронів, 2 – кристал, 3 – збуджена область, 4 – випромінювання (в)

Найбільш поширеними на сьогодні є **інжекційні напівпровідникові лазери**, в яких при пропусканні струму в прямому напрямі через $p-n$ перехід має місце інжекція нерівноважних носіїв. Існують так звані **гомоструктурні** і **гетероструктурні** інжекційні лазери. У перших лазерах для створення $p-n$ переходу використовується один, а в других – декілька напівпровідників.

3.3.2. Принцип дії і конструкція інжекційного лазера

У чистих бездомішкових напівпровідникових матеріалах отримати одночасну виродженість електронів і дірок практично неможливо. Якщо ввести в кристал певні домішки, які легко віддають електрони – *донори* (які створюють рівні в забороненій зоні поблизу дна зони провідності), то можна створити напівпровідники *n*-типу. Так само можна створити напівпровідники *p*-типу, атоми яких легко приймають електрони – *акцептори*, створюючи енергетичні рівні поблизу верхнього краю валентної зони E_V . У домішкових напівпровідниках *p*-типу і *n*-типу збільшенням ступеня легування досить просто отримати виродженість електронів або дірок. Місце з'єднання напівпровідників *p*- і *n*-типу є електронно-дірчастим (*p-n*) переходом, який характеризується *потенційним бар'єром*. В умовах рівноваги рівні Фермі в *p* і *n* областях *p-n* переходу співпадають. Електрони і дірки будуть рекомбінувати, випромінюючи фотони тільки в перший момент з'єднання, і через малий час (10^{-8} с) процес випромінювання припиниться, оскільки носії заряду перерозподіляться і перейдуть в новий рівноважний стан і рівні Фермі в *p* і *n* областях будуть суміщені.

Все може якісно змінитися, якщо до *p-n* переходу прикласти зовнішню напругу, яка понизить потенційний бар'єр і приведе до інжекції, тобто вприскування електронів з *n*-області і дірок з *p*-області в область електронно-дірчастого переходу (рис. 3.17).

При цьому рівень Фермі для електронів μ_E в області *p-n* переходу виявиться вищим за дно зони провідності, а рівень Фермі для дірок в цій же області напівпровідника виявиться нижчим за стелю валентної зони E_V . Отже, отримаємо одночасно в одній і тій же області *p-n* переходу виродженість електронів і дірок, тобто виконаємо умову інверсії населеностей $\mu_E - \mu_D > \Delta E$.

Умова інверсії в *p-n* переході виконується з тим більшим запасом, чим вище електричне поле в переході, тобто чим більший струм протікає через цей перехід.

Мінімальний струм, при якому підсилення випромінювання за рахунок вимушених переходів рівне його втратам у кристалі напівпровідника, називається *пороговим струмом*.

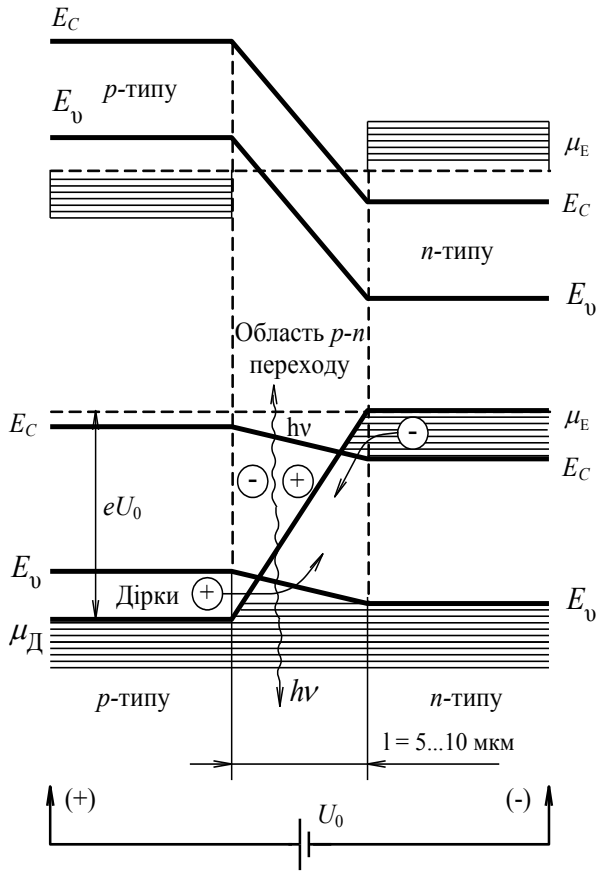


Рисунок 3.17 – Енергетична схема $p-n$ переходу виродженого напівпровідника GaAs до і після включення джерела напруги U_0 в пряму напрямі

Для отримання генерації потрібний позитивний зворотний зв'язок, який зазвичай здійснюється за рахунок віддзеркалення від граней самого напівпровідникового кристала (рис. 3.18) або за рахунок спеціальним чином сколених граней кристала і зовнішніх дзеркал.

Враховуючи умови інверсії населеностей і лінійну залежність коефіцієнта підсилення густини струму, поточного в прямому напрямі через $p-n$ перехід, для порогового значення густини струму отримуємо таку залежність:

$$j_{\text{ПОР}} = \frac{\beta_{\Sigma} + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{r}}{G}$$

Параметри β_{Σ} і G визначаються експериментально при вимірюванні

$j_{\text{ПОР}}$ як функції величин $\frac{1}{L}$ або $\ln \frac{1}{r}$, де L – довжина кристала; r – коефіцієнт віддзеркалення від грані кристала. Коефіцієнт підсилення $G = \frac{B\eta_0\Gamma}{L}$ залежить від температури і ступеня легування активної області B , від внутрішнього квантового виходу η_0 , від ступеня оптичного обмеження Γ , яка рівна частці потоку випромінювання, що знаходиться в межах активного шару, і від товщини активного шару L_0 .

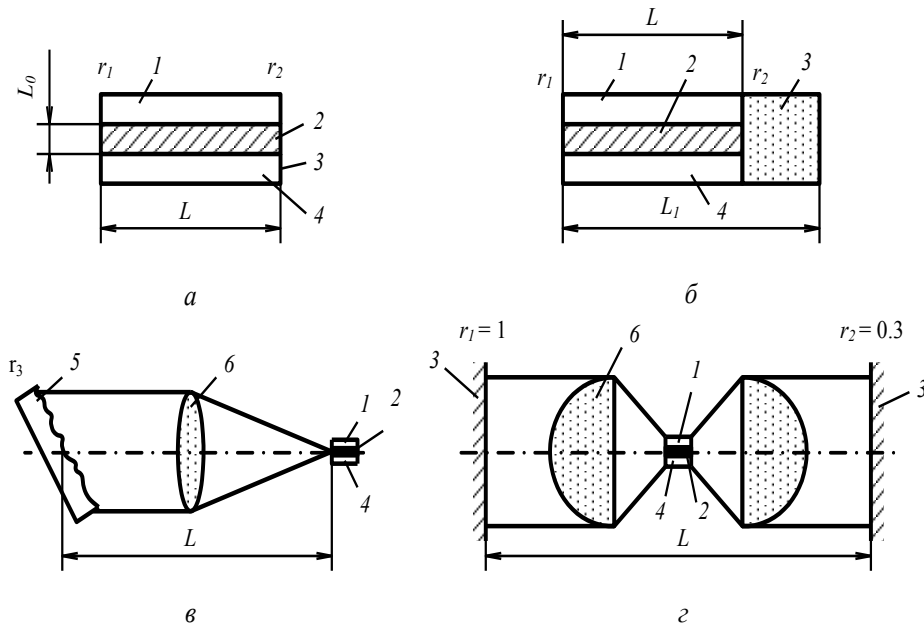


Рисунок 3.18 – Схеми типових резонаторів напівпровідникових лазерів: з внутрішніми дзеркалами звичайний і складений відповідно (а, б); – селективні із зовнішніми дзеркалами і дифракційними решітками (в, г) 1 – кристал p -типу; 2 – p - n перехід; 3 – полірована грань; 4 – кристал n -типу; 5 – дифракційні решітки; 6 – лінзи; r_1, r_2, r_3 – коефіцієнти віддзеркалення; L – довжина резонатора

Найбільш високий ККД (50...80 %) можна отримати від інжекційних лазерів. Від лазерів з електронним збудженням можна отримати ККД 20...30 %. Найбільшу потужність (близько кількох кіловат) отримують в імпульсному режимі генерації. В цьому випадку основним чинником, що обмежує потужність, є руйнування дзеркал резонатора. Це руйнування відбувається

ся зазвичай при досягненні деякої критичної питомої потужності, яка для епітаксialьних $p-n$ переходів в GaAs становить з розрахунку на одиницю ширини діода біля $8 \cdot 10^4$ Вт/м. При роботі поблизу критичного значення вихідної потужності термін служби лазера різко скорочується – це так зване явище катастрофічної деградації. Якщо ж працювати при оптимальних режимах накачування, то термін служби лазера складає тисячі годин.

Коротко опишемо конструкцію інжекційного лазера. Активною речовиною лазера є кристал GaAs n -типу і p -типу сірого кольору, кубічної форми (рис. 3.19, *a*).

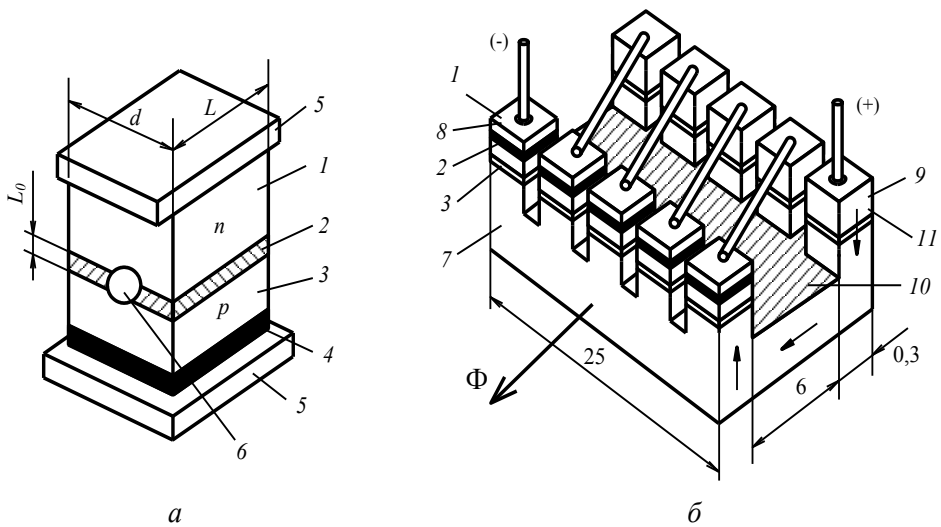


Рисунок 3.19 – Схема конструкції інжекційного напівпровідникового лазера (*a*) і матриці лазерних діодів (*б*)

1, 3 – напівпровідники n - і p -типу, 2 – $p-n$ перехід, 4 – омичний контакт, 5 – теплопровідна плата, 6 – півсферична лунка для концентрації випромінювання, 7 – металізована підкладка, 8 – смужка GaAs-Al_xGa_{1-x}As, 9 – мідна смужка, 10 – металізація, 11 – покриття, що віддзеркалює,

В арсеніді галію $p-n$ перехід зазвичай створюється шляхом дифузії акцепторних домішок (зазвичай Zn або Cd, Mn, Na, Cu) в матеріал, легований донорними домішками (зазвичай Te або Se). Напівпровідник n -типу легують Te до концентрації $1..2 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Глибина залягання переходу складає 2...100 мкм залежно від часу і температури дифузійного відпалу. Цей перехід розташований приблизно посередині між гранями, до яких підводиться елек-

трична напруга. Области p і n мають концентрації, при яких стани електронів і дірок близькі до виродженості (10^{20} см⁻³). Щоб забезпечити хороший контакт з n -областю, кристал GaAs припаюється до молібденової плати (5), покритою шаром золота. На поверхню p -області нанесений сплав золота з сріблом. Підведення струму і відведення тепла від кристала забезпечується спеціальним пристроєм – кристалоутримувачем.

Дві бічні грані кристала паралельні і є відбивачами оптичного резонатора (6; 11), довжина якого становить $h \approx 0,01 \dots 2$ мкм. За рахунок великого показника заломлення $n = 2,4 \dots 3,6$ для діапазону довжин хвиль $\lambda_0 = 2,9 \dots 0,8$ мкм виходить значний 20...40 % коефіцієнт віддзеркалення на межі GaAs кристал-повітря. Поліровані грані, що створюють оптичний резонатор, забезпечують позитивний зворотний зв'язок, необхідний для генерації випромінювання. Якщо зменшити коефіцієнт віддзеркалення шляхом нанесення на поверхню граней $\frac{1}{4} \lambda$ діелектричних покриттів, то кристал працюватиме як активний елемент підсилювача індукованого випромінювання. Резонатори по відношенню до активної речовини можуть бути з внутрішніми і із зовнішніми дзеркалами (рис. 3.18).

Накачування здійснюється або постійним, або імпульсним струмом тривалістю від декількох мікросекунд до декількох десятків часток мікросекунди. Частота повторення імпульсів може складати сотні кілогерц. Коли величина струму досягає приблизно 100 А (при $T = 77$ К), відбувається різке збільшення інтенсивності випромінювання. При $T = 4,2$ К таке збільшення відбувається при $i = 6$ А. Відповідно густини струму становлять близько 10^4 А/см² ($T = 77$ К) і 600 А/см² ($T = 4,2$ К).

Дифракційні властивості випромінювання такі, що випромінюючу грань лазера можна розглядати як щілину, що є джерелом когерентного випромінювання. Розходження пучка випромінювання у вертикальній і горизонтальній площинах рівне відповідно 6° і 1° . Ці значення дуже близькі до дифракційних меж, якщо прийняти товщину p - n переходу близько 20 мкм, а ширину – близько 0,1 мм. Фактичний розмір активної області у вертикальному напрямі рівний приблизно 1 мкм, а ефективна ширина випромінюючої області складає близько 10 мкм. Інші характеристики лазера також сильно залежать

від температури. Так, при зміні температур від 4,2 до 125 K величина порогового струму збільшується в 25 разів. При більших температурах зміна густини струму пропорційна T^3 . При кімнатних температурах густина порогового струму досягає 10^5 А/см². Значення густини порогового струму залежить від ступеня легування напівпровідника.

Площа випромінюючої поверхні кристала напівпровідника складає $0,02 \times 0,1$ мм². При живленні постійним струмом і глибокому охолодженні $T \approx 4$ K такий кристал безперервно випромінює ~ 12 Вт. Збільшення температури кристала приводить до збільшення концентрації нерівноважних носіїв заряду в 30 разів і вони проникають в область $p-n$ переходу на глибину 1...20 мкм. Гранична величина імпульсної потужності визначається стійкістю випромінюючої поверхні напівпровідника до його власного випромінювання.

Критична густина потужності випромінювання $(2..4) \cdot 10^6$ Вт/см². При температурі кристала $T = 300$ K вихідна потужність рівна близько 600 Вт; частота генерації близько 1 кГц, тривалість імпульсу близько 100...200 нс. Взагалі частота генерації індукованого випромінювання може бути збільшена до 100 кГц.

Для збільшення вихідної енергії лазерні діоди конструктивно оформляють у вигляді матриці (рис. 3.19, б). Типові характеристики її при $T = 300$ K такі: імпульсна потужність $P_{\text{вих}} \sim 0,5..1$ кВт, розходження випромінювання $\gamma = (4..6)^\circ$ в площині $p-n$ переходу і $\gamma = (10..20)^\circ$ в перпендикулярній площині. Довжина хвилі $\lambda \cong 0,84..0,89$ мкм. Градієнт довжини хвилі становить $\frac{d\lambda}{dT} = 1,2..1,5$ Å/градус.

Отже, щоб отримати напівпровідниковий інжекційний лазер, необхідно:

- 1) шляхом послідовного легування виростити кристал з $p-n$ переходом;
- 2) знизити потенційний бар'єр шляхом інжекції носіїв заряду, тобто отримати інверсію населеностей $\mu_E - \mu_D > \Delta E$;
- 3) розробити конструкцію і технологію напівпровідникового лазера;
- 4) забезпечити позитивний зворотний зв'язок, створивши резонатор з полірованих граней кристала;
- 5) вибрати схему і спроектувати систему накачування.

3.3.3. Гетеропереходи і гетеролазери

Істотними недоліками гомоструктурних інжекційних лазерів є велика густина порогового струму $(10...100) \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$ і порівняно малий ККД 1...3 %. Потенційні можливості напівпровідникових лазерів у цьому випадку далеко не вичерпуються. Причини цього криються в тому, що частина струму інжекції носіїв в гомоструктурах розтікається у прилеглих до $p-n$ переходу зонах, де коефіцієнт поглинання вищий, ніж в зоні переходу. Значна частина електронів проскакує крізь $p-n$ перехід і не бере участі в рекомбінації. Практично енергії фотонів випромінювання виходить менше внаслідок взаємодії носіїв один з одним, з кристалічною решіткою і домішками, з *екситонами* (елементарними електрично нейтральними збудженнями в напівпровідниках і діелектриках, пов'язаними з утворенням пари електрон-дірка) і т.ін. Тільки мала частина носіїв безпосередньо бере участь в створенні індукованого випромінювання. Збільшення ККД напівпровідникового лазера досягається використанням *гетеропереходів*.

За фундаментальні дослідження гетеропереходів у напівпровідниках і створення серії приладів на гетероструктурах – багат шарових твердих розчинах напівпровідників ученим Ж.І. Алфьорову, В.А. Андрєєву, Д.З. Гарбузову, В.І. Королькову, Д.Н. Третьякову, В.І. Швейкіну в 1972 році була присуджена Ленінська премія СРСР. За цикл робіт у галузі лазерів на основі гетеропереходів в 2000 році Ж.І. Алфьорову була присуджена Нобелівська премія з фізики. Пропозиція про використання гетеропереходів і реалізація гетероструктурного напівпровідникового лазера стала можливою завдяки освоєнню епітаксіальної технології вирощування багат шарових структур на основі твердих розчинів.

Для поліпшення характеристик інжекційних лазерів застосовуються гетероструктури, в яких використовується декілька гетеропереходів і $p-n$ переходів. Так, основний ефект гетеропереходів, що полягає в різкому зниженні порогу генерації при кімнатній температурі, досягнутий за допомогою так званої двосторонньої гетероструктури типу $n \text{ (Al, Ga)As} - p\text{GaAs} - p\text{(Al, Ga)As}$. Густина порогового струму при кімнатній температурі для цієї системи не перевищує 10^3 А/см^2 . Завдяки цьому вдалося вперше отримати безперервну генерацію в інжекційних лазерах при кімнатній температурі.

Успішно застосовується в напівпровідникових лазерах й інша аналогічна гетероструктура (In, Ga) (As, P). Для прикладу, в твердому розчині $Ga_xIn_{1-x}P_{1-y}As_y$ індекси x і y підібрані таким чином, що вплив Ga і As на період кристалічних решіток взаємно компенсується.

Розглянемо типи гетероструктур (рис. 3.20). На рис. 3.20 наведено: *a* – зонні енергетичні діаграми при прямих переходах (стрілками вказаний напрям руху електронів); *б* – залежність показника заломлення n від координати x активного шару. Заштриховані зони – зони вірогідного знаходження електронів.

Існують структури з одним гетеропереходом: 1 – інжектуючий p - n гетероперехід; 2 – одностороння гетероструктура (ОГС) з гетеропереходом, що обмежує дифузію інжекттованих носіїв струму (електронне обмеження) і структури з двома гетеропереходами 3, 4.

ОГС є комбінацією p - n переходу і гетеропереходу p - p типу, розташованого поблизу p - n переходу на відстані, меншій довжини дифузії інжекттованих носіїв. ОГС створюються епітаксіальним нарощуванням легованих шарів на підкладках з протилежним типом провідності і з подальшою дифузією домішок в підкладку для отримання p - n переходу; 3 – двостороння гетероструктура (ДГС), в якій об'єднані переваги перших двох варіантів і, крім того, використано оптичне обмеження; 4 – модифікована двостороння гетероструктура з розширеним оптичним хвилеводом.

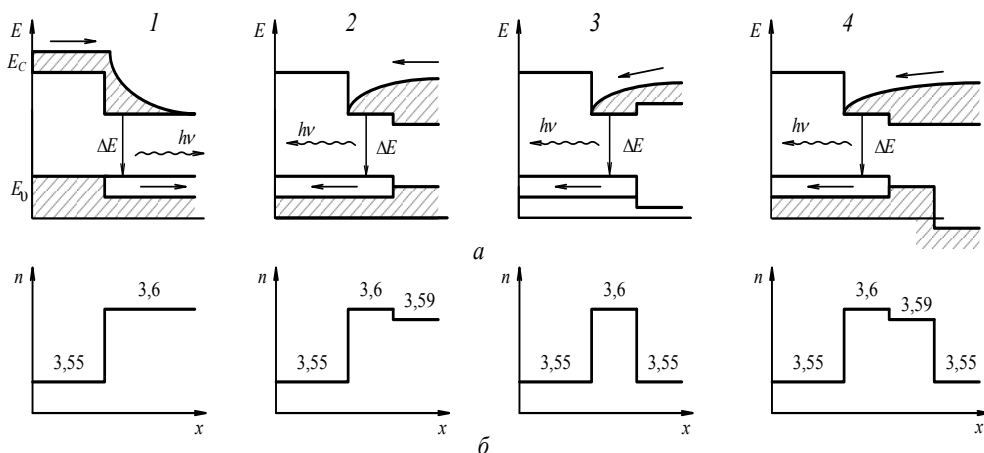


Рисунок 3.20 – Схеми і характеристики гетеропереходів та гетероструктур напівпровідникових лазерів

Наприклад, в ОГС на GaAs на підкладку з електронною провідністю нарощується шар $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ з ширшою забороненою зоною, ніж GaAs. На межі цих матеріалів утворюється $p\text{-}p$ гетероперехід, потенційний бар'єр якого перешкоджає розтіканню інжектованих в GaAs електронів та обмежує обсяг активної області, зумовлюючи так званий ефект електронного обмеження. Це знижує порогову густину струму до $(5-10) \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$ при $T = 300 \text{ K}$.

За цією технологією отримані гетероструктури на $\text{GaAsAl}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ і $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x$, Te. У загальному випадку в гетеропереході є стрибок ширини забороненої зони ΔE , який є сумою розривів $\Delta E = \Delta E_C + \Delta E_v$ в положенні країв зони провідності ΔE_C і валентної зони ΔE_v .

Величини ΔE_C і ΔE_v визначаються цією парою напівпровідників і не залежать в певних межах від зсуву на гетеропереході, від типу провідності легування. Так, для гетеропереходів GaAs-GaP і (Al, Ga)As- GaAs маємо відповідно $\Delta E_C = 0,67 \text{ eV}$ і не більше $0,76 \text{ eV}$, $\Delta E_v = 0,15 \text{ eV}$, і близько 0 eV . Наявність ΔE_C і ΔE_v приводить до виникнення додаткових потенційних бар'єрів в $p\text{-}n$ і $n\text{-}p$ гетеропереходах, а саме: бар'єр для основних носіїв струму широкозонного напівпровідника виявляється на величину ΔE менше, ніж бар'єр для основних носіїв струму вузькозонного напівпровідника. За умови, що $\Delta E_C > 0$ і $\Delta E_v > 0$ ця обставина служить гарантією односторонньої інжекції з широкозонного емітера у вузькозонну базу напівпровідникового діода.

З рис. 3.20 також впливає, що в гетеропереході потенційний бар'єр для інжекції з широкозонного матеріалу зменшений порівняно з гомопереходом на величину розриву відповідного краю зони. Таким чином, при накладенні різниці потенціалів на гетероперехід в прямому напрямі потенційний бар'єр знижується раніше, ніж для гомопереходу. Наприклад, для електронів в $p\text{-}n$ гетеропереході бар'єр знижується, коли зовнішня напруга V_0 при прямому

зсуві менша контактної різниці потенціалів V_C на величину $\frac{\Delta E_C}{e}$ – виникає

свого роду **надінжекція**. Завдяки цьому можна створити концентрацію надмірних носіїв струму, що у багато разів перевищує рівноважну концентрацію цих же носіїв струму в емітері. Для $p\text{-}n$ гетеропереходу максимально досяжна концентрація в невідродженому випадку збільшується в $\exp(\Delta E_C/kT)$ разів,

для n - p гетеропереходу – в $\exp(\Delta E_v/kT)$ разів. Зокрема, експериментально доведено, що надінжекцію можна використовувати для отримання інверсії в невідроджених p - n переходах, коли енергія поглинання носіїв рівна:

$$E_{\text{ПОГЛ}} = P_{\nu C} \bar{N}_{\nu} \bar{P}_C h\nu.$$

Розглянемо поняття «*гетеролазер*». До гетероструктурних лазерів належать напівпровідникові лазери, в яких використовуються оптичні переходи за участю вільних носіїв у багаточастотних складних кристалічних структурах з оптичним обмеженням світла та електронним обмеженням дифузійного розтікання інжектованих носіїв струму.

Двосторонні обмеження гетероструктур (ДГС) знижують пороговий струм $j_{\text{ПОР}} \leq 1 \cdot 10^3$ А/см² шляхом ефектів електронного та оптичного обмеження. У ДГС активна зона знаходиться між двома гетеропереходами: один інжектований, інший обмежує дифузійне розтікання носіїв, наприклад, в ДГС на твердому розчині $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ гетероструктура:

$$\begin{array}{ll} p\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} & \Delta E \cong 1,8 \text{ eV}; \\ n\text{As}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} & \Delta E \cong 1,8 \text{ eV}. \end{array} \quad p\text{Ga}_x\text{As} \quad \Delta E \cong 1,4 \text{ eV};$$

Додаткове зменшення порогового струму в ДГС виходить за наявності в ній оптичного хвилеводу з коефіцієнтом розподілених оптичних втрат $\beta_{\Sigma} \sim (5 \dots 15) \text{ см}^{-1}$ і підсиленням $G_Y \sim 0,01 \text{ см/А}$ при $T = 300 \text{ К}$.

При фіксованій товщині активного шару l_0 за рахунок оптичного $\Gamma = 1$ і електронного обмеження в ДГС порівняно з дифузійним p - n переходом отримуємо перевагу майже на два порядки за коефіцієнтом підсилення ($G_Y \sim 3 \text{ см/А}$) і в два-три рази зменшується рівень втрат $\beta_{\Sigma} = (2 \dots 5) \text{ см}^{-1}$. У ОГС, де здійснюється тільки електронне обмеження, істотно підвищується лише коефіцієнт підсилення ($G_Y \sim 0,3 \dots 0,6 \text{ см/А}$) практично при тому ж рівні втрат $\beta_{\Sigma} = (2 \dots 4) \text{ см}^{-1}$.

На рис. 3.21, а показаний приклад енергетичних зон гетеролазера з подвійним гетеропереходом, створеним з двох речовин: арсеніду галію і GaAlAs (арсеніду галію з домішкою алюмінію).

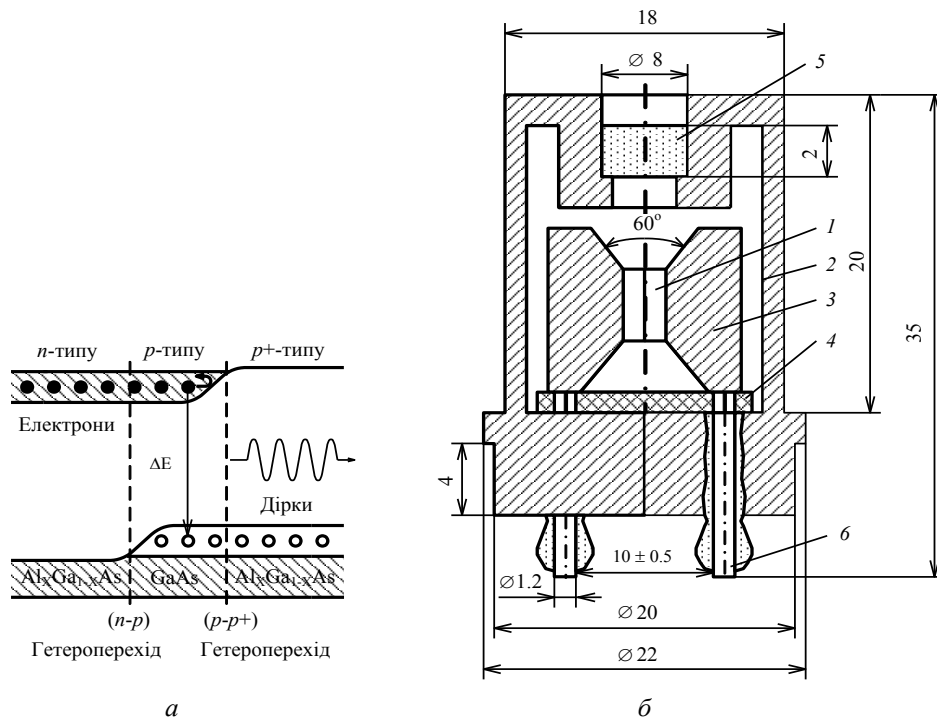


Рисунок 3.21 – Схема енергетичних зон (а) і конструкції напівпровідникового лазерного діода (б): 1 – кристал; 2 – корпус; 3 – утримувач; 4 – фланець; 5 – вікно; 6 – виводи

Такі дві речовини мають різні показники заломлення та ширину забороненої зони, що ефективно обмежує інжекцію збудження і випромінювання світла зоною переходу. Іншими словами, стрибок показника заломлення забезпечує віддзеркалення генерованого світла знову у зону переходу. А різниця в розмірах забороненої зони ΔE утримує носії у цій зоні.

У цьому випадку ДГС складається з трьох компонентів: напівпровідник p -типу з GaAs знаходиться між компонентами $p+$ і n -типу з $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Цю подвійну гетероструктуру поміщують на підкладці з GaAs з електронною провідністю, зверху на електричному контакті встановлюють шайбу з GaAs з дірчастою провідністю. Такий $n-p$ гетероперехід заважає діркам переміщатися в зону n -типу, що не дозволяє також електронам інжектуватись в зону переходу. У $p-p+$ гетеропереході через збільшення ширини забороненої зони ΔE створюється потенційний бар'єр, який віддзеркалює інжектовані електрони та

обмежує рекомбінаційне випромінювання зоною переходу. Порогова густина струму в такій гетероструктурі зменшується до $j \sim 2 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$, що приблизно в 20 разів менше, ніж у гомолазерах. При температурі 300 K такі гетеролазери мають потужність біля (5...7) мВт на довжині хвилі $\lambda = 0,82 \text{ мкм}$ з пороговим струмом збудження до 300 мА.

Ефективність інжекційних лазерів як в імпульсному, так і в безперервному режимах роботи обмежується, головним чином, тепловим впливом – умовами нагріву найактивнішої речовини і тепловідведення. При пропусканні через p - n перехід струму кристал поступово нагрівається. Разом із збільшенням температури збільшується і величина порогового струму. Аналіз теплофізичних процесів аналогічний відповідним процесам для активних речовин твердотільних імпульсних лазерів. Кристал в основному нагрівається в результаті втрат потужності при невивипромінюючій рекомбінації електронно-дірчастих пар $P_{\text{РЕК}} = IU_0(I - \eta_B)$ та омічного нагріву при протіканні через напівпровідник струму інжекції $P_{\text{ОМ}} = I^2 R$. Тепло, що виникає, поширюється в активному шарі p - n переходу відповідно з моделлю перенесення тепла, математично описуваною рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial l^2} + \frac{1}{l} \cdot \frac{\partial T}{\partial l} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}.$$

До переваг напівпровідникових інжекційних гетеролазерів можна віднести: малі розміри, пряме перетворення енергії електричного струму на когерентне випромінювання, можливість генерації безперервного і імпульсного індукованого випромінювання, великий ККД, значну питому потужність з одиниці об'єму неохолоджуваної активної речовини і, нарешті, простоту модуляції випромінювання в широкій смузі частот методом внутрішньої модуляції струму інжекції лазерного діода (рис. 3.21).

3.3.4. Плівкові напівпровідникові лазери

Великі надії покладаються на електронне збудження, при якому інверсія населеностей створюється в процесі дії на напівпровідник потоку електронів високої енергії (десятки і сотні кілоелектронвольт). Електрони, проникаючи в глиб кристала на сотні мікрометрів, іонізують на своєму шляху ато-

ми решітки. Порушувані при цьому електрони валентної зони переходять в основному на високі рівні зони провідності так, що їх енергія істотно перевищує енергію забороненої зони E_g . Ці електрони, у свою чергу, іонізують атоми решітки – виникає лавина, що слабшає при віддаленні від поверхні, яка бомбардується, у глиб напівпровідника.

При такому механізмі збудження вільних носіїв значна частина енергії витрачається на електрон-фотонні взаємодії, викликаючи розігрівання кристала. Оцінки показують, що енергія, яка в середньому витрачається на створення одного збудженого електрона, близька до $3E_g$. Це врешті-решт зумовлює теоретично граничне значення коефіцієнта перетворення енергії електронного променя в лазерне випромінювання, близьке до 30...40 %.

Конструктивно напівпровідниковий лазер з електронним збудженням виконується у вигляді електронно-променевої трубки (робоча напруга декілька десятків кіловольт), в яку як екран-мішень поміщається напівпровідник. За характером взаємної орієнтації напрямку електронного променя та осі оптичного резонатора розрізняють напівпровідникові лазери з поперечним і подовжнім накачуванням (рис. 3.22). Лазерний ефект при бомбардуванні швидкими електронами спостерігається в дуже багатьох напівпровідниках: технічно реалізовані лазери зеленого кольору свічення (CdS, $\lambda \approx 0,51$ мкм), отримано інтенсивне червоне (CdSe, $\lambda \approx 0,67$ мкм) і блакитне (ZnSe, $\lambda = 0,46$ мкм) світло. У ближньому інфрачервоному діапазоні спектра перспективні матеріали GaAs і CdTe.

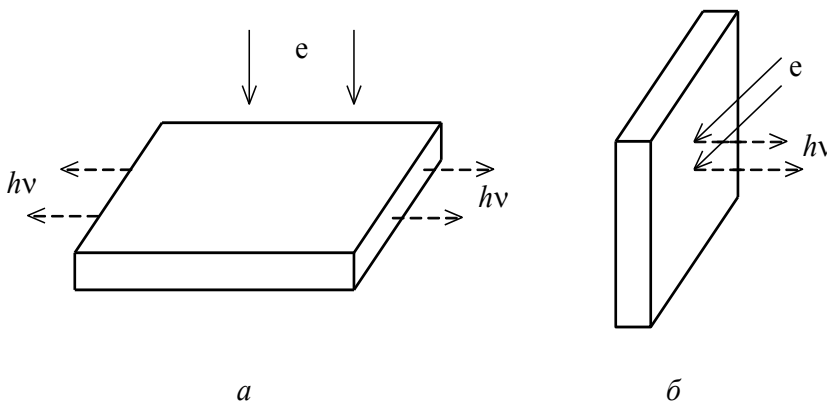


Рисунок 3.22 – Опромінювання напівпровідникового кристала в лазері з електронним збудженням з поперечним (а) і подовжнім (б) накачуванням

Порівняно з інжекційним накачуванням використання збудження електронним променем має такі основні переваги:

- великі потужності випромінювання (безперервні й особливо імпульсні), обумовлені тим, що завдяки глибокому проникненню швидких електронів збуджується значна товща кристала (в $10^2 \dots 10^3$ разів більше, ніж, наприклад, в ДГС-лазері);

- можливість використання ширшого ряду напівпровідникових матеріалів, зокрема з'єднань типу $A^{II}B^{VI}$ обумовлена тим, що в цьому виді напівпровідникового лазера немає необхідності у p - n переході;

- використання таких переваг електронного променя («перехідних» на лазерний промінь), як простота двокоординатного сканування і високошвидкісна (до $\sim 10^{-11}$ с) модуляція;

- можливість керованої перебудови довжини хвилі випромінювання, багатокільрісність, що базується на використанні як мішені вару зонного напівпровідника (напівпровідника, у якого внаслідок плавної зміни складу ширина забороненої зони неоднакова за площею кристала).

Висока ефективність використання енергії електронного променя й особливо мала кутова розбіжність лазерного випромінювання (одиниці градусів) вигідно відрізняють такі напівпровідникові лазери від джерел спонтанного випромінювання.

При створенні систем проєкційного широкоформатного кольорового телебачення (з площею екрана ~ 10 м²) – основної сфери застосування напівпровідникових лазерів з електронним збудженням – вдається отримати в десятки разів більшу яскравість, чим на електронно-променевих трубках з катодолюмінофорними мішенями.

Недоліки лазерів з електронним збудженням такі: необхідність вакуумного об'єму, значні габарити, невисока ефективність (через подвійне перетворення енергії загальний ККД не перевищує 1 %), складність і громіздкість систем живлення (їх об'єм і маса в десятки разів перевищують об'єм лазерної трубки).

Вказані недоліки лазерів з електронним збудженням не дозволяють їм зайняти місце поряд з інжекційними напівпровідниковими лазерами.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Нарисуйте і поясніть модель твердотілого імпульсного лазера.
2. Назвіть умови, необхідні для отримання індукованого випромінювання.
3. Для чого призначені активна речовина, резонатор і система накачування в лазері?
4. Які матеріали використовуються у вигляді активної речовини твердотілих лазерів?
5. Поясніть принцип дії лазера на твердому тілі.
6. Поясніть трирівневу систему накачування активної речовини в твердотілому лазері.
7. Охарактеризуйте основні властивості рубіна – активної речовини твердотілого лазера з трирівневою системою накачування.
8. Поясніть чотирирівневу систему накачування активної речовини в твердотілому лазері.
9. Чим пояснюється низький ККД твердотілих лазерів?
10. Які матеріали використовуються в лазерах з чотирирівневою системою накачування?
11. Охарактеризуйте елементи оптичного накачування лазерних систем: лампи накачування, накопичувальні конденсатори, схеми джерел електроживлення імпульсних ламп.
12. Для чого служать системи охолодження і термостабілізації активної речовини лазерів?
13. Поясніть принцип дії системи глибокого охолодження (кріостата).
14. Поясніть принцип дії замкнутої системи охолодження.
15. Поясніть принцип дії вихрового повітроохолоджувача.
16. Поясніть принцип дії напівпровідникової системи охолодження і термостабілізації.
17. Назвіть основні типи газових лазерів.
18. Від чого залежить довжина хвилі випромінювання газових лазерів?
19. Поясніть принцип дії лазера на нейтральних атомах гелій-неонової суміші.
20. В чому смисл резонансної передачі енергії у газових лазерах під час

збудження активної речовини?

21. Поясніть принцип дії іонного аргонного лазера.
22. Поясніть конструктивні особливості іонного аргонного лазера.
23. Поясніть принцип дії молекулярного CO₂ лазера.
24. Поясніть причини високого ККД CO₂ лазера.
25. Поясніть принцип дії газодинамічного лазера.
26. Поясніть основні процеси в напівпровідниковій активній речовині лазера.
27. Поясніть принцип дії і конструктивні особливості напівпровідникового інжекційного лазера.
28. Яким чином збільшують вихідну потужність випромінювання напівпровідникового інжекційного лазера?
29. Поясніть особливості гетеропереходів у напівпровідниках.
30. Що таке багаточарові структури на основі твердих розчинів у реалізації гетероструктурних напівпровідникових лазерів?
31. Які вчені зробили значний внесок у розробку теорії гетеропереходів у напівпровідниках?
32. За рахунок чого лазери на гетеропереходах можуть працювати при кімнатних температурах?
33. Що визначає термін «надінжекція» в напівпровідникових гетероструктурах?
34. Назвіть переваги лазерів на гетеропереходах.
35. Які матеріали використовуються при виготовленні лазерів на гетеропереходах?
36. Назвіть галузі застосування в сучасній техніці напівпровідникових лазерів на гетеропереходах.
37. Поясніть особливості роботи напівпровідникових лазерів з електронним збудженням.
38. У чому відмінність електронного збудження з поперечним і подовжнім накачуванням?
39. Які недоліки лазерів з електронним збудженням?
40. Назвіть галузі застосування лазерів з електронним збудженням.
41. Плівки яких матеріалів використовують у плівкових лазерах?

4. КВАНТОВІ ПРИЛАДИ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

Для здійснення зв'язку між випромінювачем і фотоприймачем перш за все необхідно, щоб випромінювач і приймач працювали в одній ділянці спектра, з однією і тією ж довжиною хвилі випромінювання. Оптичний канал передає інформацію таким же чином, як і дротяні лінії.

У каналі оптоелектронного зв'язку розрізняють три складові:

– *джерело випромінювання*, яке може працювати як у видимому, так і в невидимому діапазоні спектра. Яскравість випромінювання при цьому регулюється електронним способом. Під час регулювання, шляхом здійснення модуляції, в оптичний канал може закладатися інформація, що передається;

– *оптичне середовище* призначене для механічного зв'язку випромінювача з приймачем (наприклад, усередині оптрона) або здійснення транспортування сигналів від випромінювача до приймача. Середовища бувають газоподібні, рідинні і тверді. За керованістю оптичні середовища підрозділяють на керовані (за допомогою деяких фізичних ефектів), які здійснюють різні види модуляції сигналів, що передаються, і некеровані. Некеровані середовища лише беруть участь в перенесенні оптичних сигналів, іноді змінюючи їх інтенсивність;

– *фотоприймач*, який перетворює оптичний сигнал, що приходить від випромінювача, в електричний, що надходить у навантаження.

Таким чином здійснюється передача сигналів від передавача до приймача з використанням оптичного каналу в аналоговій або цифровій формі.

4.1. ОПТИЧНІ ВИПРОМІНЮВАЧІ

До оптичних випромінювачів, які знаходять застосування в пристроях оптоелектроніки, належать: лампи розжарювання, газорозрядні випромінювачі, електролюмінесцентні випромінювачі, інжекційні світлодіоди, твердотільні, газові і напівпровідникові лазери.

До основних характеристик і параметрів випромінювачів відносяться

такі: яскравість; спектральна, перехідна, частотна, вольт-амперна характеристики; швидкодія випромінювача; спосіб керування або збудження; масогабаритні показники; можливість узгодження з елементами мікроелектроніки, зокрема – інтегральними мікросхемами.

Самими простими випромінювачами є **лампи розжарювання і газорозрядні випромінювачі**.

Вихідна яскравість **лампи розжарювання** регулюється величиною напруги, що підводиться. При цьому яскравість пропорційна четвертому ступеню температури розжарювання. Основною перевагою ламп розжарювання є широкий спектр їх випромінювання, завдяки чому за допомогою світлофільтрів легко виділяють необхідну ділянку, що дозволяє працювати спільно практично зі всіма фотоприймачами. Лампи мають високу питому яскравість і тому використовуються до цих пір.

Газорозрядні випромінювачі керуються струмом. Спектр випромінювання (колір їх свічення) залежить від складу газової суміші, яскравість – від величини струму, що тече в розряді. В цих випромінювачах як робоча використовується ділянка нормального або аномально тліючого газового розряду. До переваг газорозрядних випромінювачів відносять вузьку спектральну смугу випромінювання.

Загальними недоліками ламп розжарювання і газорозрядних випромінювачів є наявність скляної колби, неможливість виконання за інтегральними технологіями, непогодження параметрів живлення випромінювачів з параметрами блоків живлення пристроїв мікросхемотехніки, значна кількість тепла, що виділяється під час роботи.

Умовно-графічні позначення лампи розжарювання і газорозрядного випромінювача наведені на рис. 4.1, позиції *а* і *б* відповідно.

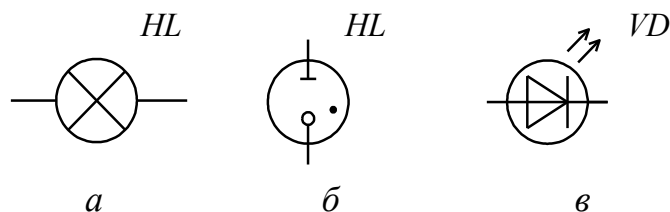


Рисунок 4.1 – Умовні графічні позначення випромінювачів

Електролюмінесцентні випромінювачі (ЕЛВ) працюють як на постійній, так і на змінній напрузі. Випромінювачі бувають *порошкові* і *плівкові*.

У *порошкових* випромінювачах світлова маса у вигляді порошку напівпровідникового матеріалу розташована між двома електродами (рис. 4.2). Випромінювачі працюють на змінній напрузі 200–300 В. Спектр випромінювання задається хімічним складом порошку.

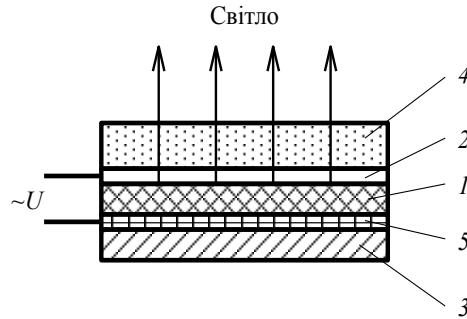


Рисунок 4.2 – Чарунка електролюмінесцентного випромінювача:

1 – світлова маса; 2 – прозорий електрод; 3 – підкладка;
4 – скляна підкладка; 5 – непрозорий електрод

Плівкові електролюмінесцентні випромінювачі – (тонкоплівкові випромінювачі ТПВ) працюють як на змінній (до 200 В), так і на постійній (до 20 В) напрузі (рис. 4.3).

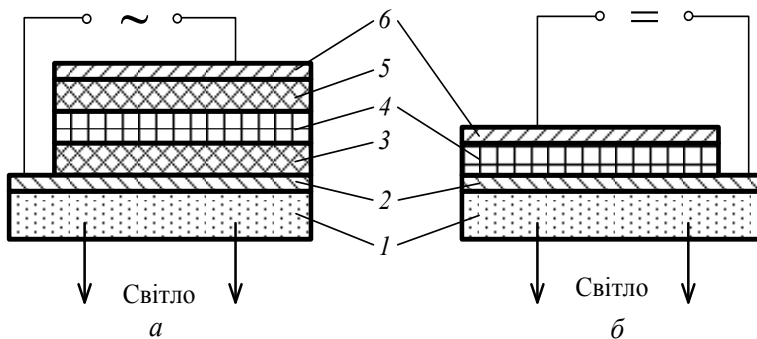


Рисунок 4.3 – Схема тонкоплівкових випромінювачів,

що працюють на змінній (а) і постійній (б) напрузі:
1 – підкладка; 2 – прозорий електрод; 3, 5 – шари діелектрика;
4 – плівка люмінофора; 6 – непрозорий електрод

Колір свічення випромінювача визначається хімічним складом люмінофорів. Використовується синє (450 нм), жовте (580 нм), червоне (670 нм) свічення. Як люмінофори застосовують ZnS, CdS й інші матеріали. Прозорий електрод виконується з SnO₂, InO або у вигляді тонкої металевої сітки.

Переваги електролюмінесцентних випромінювачів полягають в можливості виконання їх за інтегральною технологією, узгодженні з пристроями інтегральної схемотехніки за рівнями електроживлення.

Електролюмінесцентні випромінювачі знаходять застосування як елементи аварійного освітлення, в знакових оптичних індикаторах.

До недоліків електролюмінесцентних випромінювачів відносять невелику швидкодію і залежність характеристик від часу – процес старіння.

Підвищення швидкодії можливе з використанням **інжекційних світлодіодів**, що є дуже зручними випромінювачами. На сьогодні освоєна практично вся видима ділянка спектра, а також інфрачервона і ближня ультрафіолетова. В світлодіоді випромінювання виникає у процесі рекомбінації дірок та електронів при прямому зсуві електронно-дірчастого переходу. Інжекційні світлодіоди виготовляють з GaP, GaAs, SiC й інших матеріалів.

Струм, що проходить крізь світло діод, містить дві складові: випромінювальну i_{λ} і безвипромінювальну $i_{\text{НВ}}$:

$$i_{\text{СВ}} = i_{\lambda} + i_{\text{НВ}} \cdot$$

Яскравість свічення залежить від величини прямого струму. Дуже широко використовуються світлодіоди інфрачервоної ділянки спектра, оскільки в цій ділянці ККД має найбільше значення, а світло недоступне людському оку. Конструктивно світлодіод складається з кристала з *p-n* переходом в корпусі і зовнішніми виводами. Можливий безкорпусний варіант світлодіода, а також використання світлодіодів у складі інтегральних мікросхем. Поширені три конструктивні виконання кристала інжекційних світлодіодів (рис. 4.4): плоский (рис. 4.4, *a*); планарний (рис. 4.4, *б*); півсферичний (рис. 4.4, *в*).

Основними характеристиками і параметрами інжекційних світлодіодів є: діаграма спрямованості випромінювання – залежність яскравості випромінювання від величини тілесного кута; вольт-амперна характеристика; характеристика яскравості; номінальний прямий струм; пряма напруга; найбільший постійний струм; найбільша зворотна постійна напруга; колір свічення та ін.

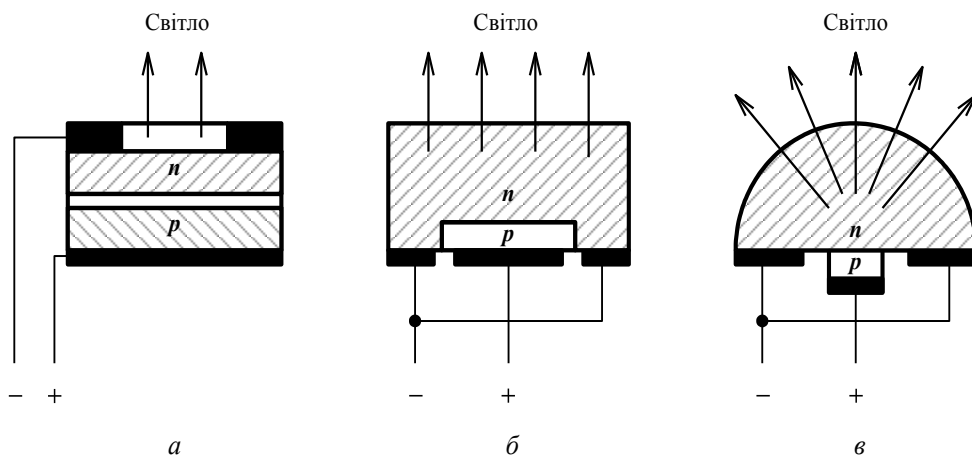


Рисунок 4.4 – Конструкція кристалів світлодіодів

Чисельно діаграма спрямованості характеризується кутом випромінювання, який буває повним або половинним. Щоб знайти кут випромінювання з початку координат проводять лінію дотику з характеристикою на рівні половини максимальної яскравості. Графік 1 (рис. 4.5) відповідає широкій діаграмі спрямованості, графік 2 – вузькій діаграмі спрямованості. Необхідна діаграма спрямованості залежить від конкретного споживача інформації та формується за допомогою лінз, діафрагм і т. ін.

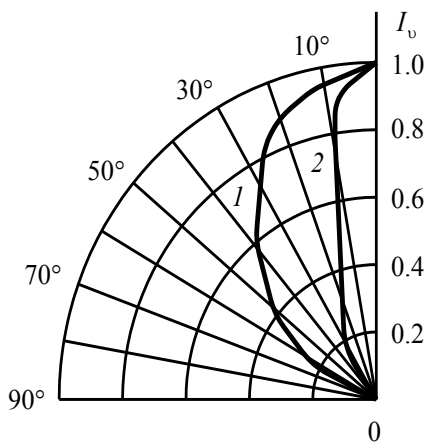


Рисунок 4.5 – Діаграми спрямованості випромінювання:
1 – широка діаграма, 2 – вузька діаграма

З погляду електричних ланцюгів важливе значення має вольт-амперна характеристика світлодіода (рис. 4.6).

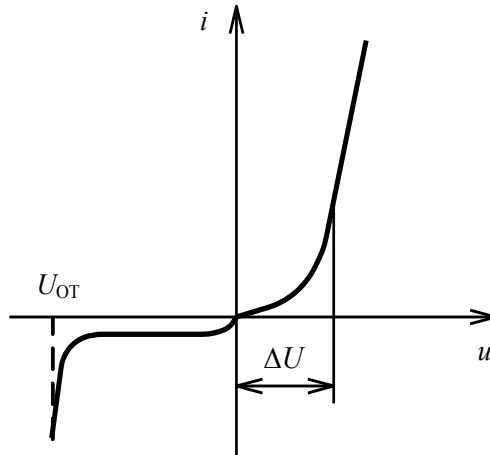


Рисунок 4.6 – Вольт-амперна характеристика інжекційного світлодіода

Відмітною особливістю вольт-амперної характеристики світлодіода є велике пряме падіння напруги $\Delta U = 2\text{--}4$ В, причому падіння напруги залежить від матеріалу діода, і мала допустима зворотна напруга $U_{OT} = 10\text{--}13$ В (рис. 4.6).

Світлодіод – це слабкострумовий і низьковольтний прилад, робочий струм його становить одиниці і десятки міліампер. Світлодіод завжди вмикається в електричний ланцюг зі струмообмежуючим резистором.

В даний час дуже часто використовуються багатоколірні світлодіоди, що мають два або три кольори свічення. Конструктивно вони є кристалом, в якому виконані відповідно два або три випромінюючі переходи, що мають одну спільну точку (наприклад, точку анодів) і два або три виводи керування. Введенням потрібної домішки змінюють напівпровідниковий базовий матеріал і відповідно довжину хвилі випромінювання. Умовне графічне позначення світлодіода наведено на рис. 4.1, в.

Принцип дії, конструктивні особливості та характеристики твердотільних, газових і напівпровідникових лазерів детально розглянуто в третьому розділі цього посібника.

4.2. ФОТОПРИЙМАЧІ

До фотоприймачів належать вакуумні і газонаповнені фотоелементи, фотоелектронні помножувачі, фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристори, фототиристорні модулі.

Основними характеристиками і параметрами фотоприймачів є такі: світлова, спектральна, вольт-амперна характеристики; коефіцієнт підсилення, швидкодія, коефіцієнт узгодження з випромінювачем та інші. Найважливішою вимогою до фотоприймача є високий ступінь відповідності спектральної характеристики фотоприймача спектральній характеристиці випромінювача.

У даний час *вакуумні і газонаповнені фотоелементи* практичного застосування не знаходять. Проте використовуються *фотоелектронні помножувачі* в тих галузях науки і техніки, які працюють з дуже слабкими вхідними оптичними сигналами. У квантовій електроніці фотоелектронні помножувачі застосовують, наприклад, в лазерних вимірниках швидкості.

Фоторезистор – це безперехідний фотоприймач, що виконується з германієвого або кремнієвого напівпровідника з власною, або домішковою провідністю.

При попаданні на прилад світла від випромінювача опір фоторезистора зменшується, в ланцюзі з фоторезистором і джерелом живлення протікає струм, пропорційний освітленості фоторезистора.

Опір фоторезистора є складною функцією від декількох параметрів:

$$z = f(u, B, \lambda, t^{\circ}, t, \omega_B),$$

де u – прикладена напруга, B – яскравість випромінювання, λ – довжина хвилі, t° – температура, t – час, ω_B – частота живильної напруги.

До основних характеристик і параметрів фоторезистора належать такі:

- 1) світлова характеристика – залежність фотоструму i_{Φ} від освітленості Φ (рис. 4.7) при різних значеннях живильної напруги;
- 2) вольт-амперна характеристика (рис. 4.8) при різній величині зовнішнього світлового потоку Φ ;
- 3) спектральна характеристика – залежність фотоструму i_{Φ} від довжини хвилі випромінювання λ .

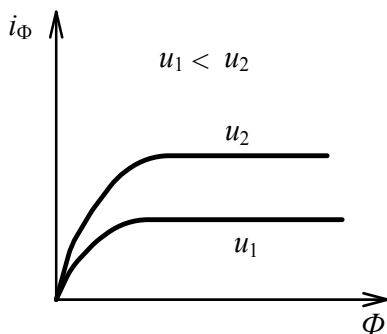


Рисунок 4.7 – Світлова характеристика фоторезистора

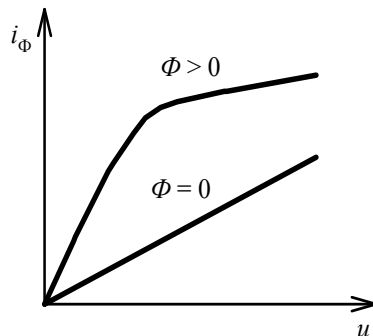


Рисунок 4.8 – Вольт-амперні характеристики фоторезистора

Істотними недоліками фоторезисторів є наявність темнового струму (характеристика при $\Phi = 0$ на рис. 4.8), тобто наявність фотоструму за відсутності зовнішнього світлового потоку, залежного від температури, і невисока швидкодія (табл. 4.1). Швидкодія фоторезистора залежить від освітленості приладу: чим більше освітленість, тим вище швидкодія.

Як правило, фоторезистори виготовляються за інтегральною технологією. На рис. 4.9 наведено просту модель інтегрального фоторезистора.

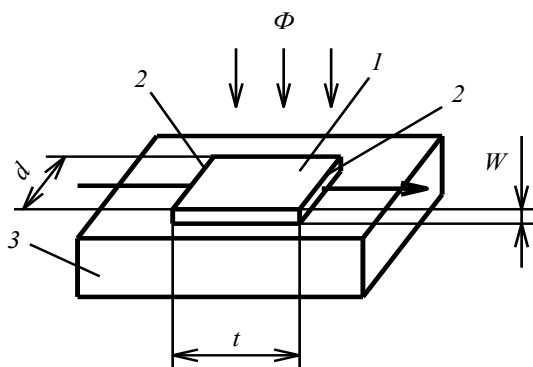


Рисунок 4.9 – Проста модель фоторезистора:

1 – фоточутлива напівпровідникова плівка; 2 – омичні контакти; 3 – діелектрична підкладка; d – ширина плівки; W – товщина плівки; t – довжина плівки

Найважливішою характеристикою фоторезистора є характеристика його вмикання – залежність зміни опору фоторезистора в часі (рис. 4.10). На цьому рисунку Δt визначає швидкодію фоторезистора (табл. 4.1).

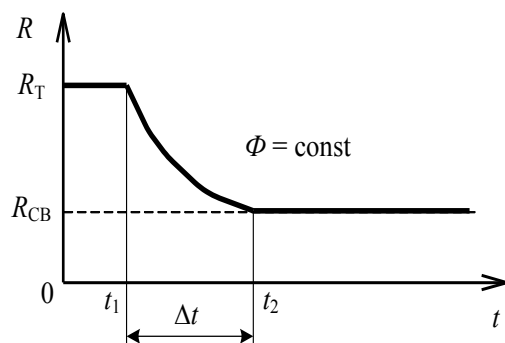


Рисунок 4.10 – Характеристика включення фоторезистора:
 R_T – темновий опір; R_{CB} – світловий опір, Δt – час включення

Фоторезистори знаходять широке застосування в різних ключових схемах, оскільки відношення темного і світлового опорів фоторезистора може досягати величини 10^6 . Окрім цього, фоторезистори застосовують в релаксаційних генераторах і мультівібраторах як елементи, що задають часові параметри.

Таблиця 4.1 – Деякі параметри основних фотоприймачів

Фотоприймач	Коефіцієнт підсилення	Швидкодія, с	Максимальна робоча напруга, В
Фоторезистор	10^3	$10^{-1} - 10^{-3}$	30–150
Фотодіод	10^{-2}	$10^{-7} - 10^{-9}$	10–50
Фотодіод <i>p-i-n</i>	$1-10^{-2}$	$10^{-9} - 10^{-10}$	100–400
Фотодіод Шоттки	$1-10^{-2}$	$10^{-9} - 10^{-11}$	30–100
Гетерофотодіод	$1-10^{-2}$	$10^{-8} - 10^{-10}$	10–100
Лавинний фотодіод	$10-10^4$	$10^{-9} - 10^{-10}$	10–50
Фототранзистор	$10^2 - 10^3$	$10^{-5} - 10^{-6}$	1–50
Фототиристор	$10^2 - 10^4$	$10^{-6} - 10^{-7}$	до 1 кВ

Фотодіод – це одноперехідний напівпровідниковий фотоприймач, що виготовляється з германію Ge або кремнію Si, який може працювати в двох режимах:

- 1) без зовнішнього зсуву;
- 2) із зворотним зсувом електронно-дірчастого переходу.

У першому випадку (рис. 4.11) здійснюється пряме перетворення оптичної енергії в електричну. Електрони і дірки, що генеруються під дією зовнішнього падаючого світла, внутрішнім електричним полем p - n переходу розходяться таким чином, що p -область заряджається позитивно, а n -область – негативно. Між виводами виникає напруга, величина якої визначається освітленістю і шириною забороненої зони напівпровідника (типом матеріалу напівпровідника). Ця напруга становить 1–1,5 В.

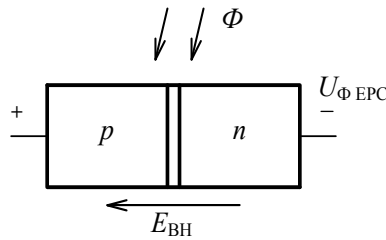


Рисунок 4.11 – Робота фотодіода без зовнішнього зсуву

У другому випадку (рис. 4.12) при зворотному зсуві під дією зовнішнього світла зменшується опір електронно-дірчастого переходу, а зворотний струм фотодіода стає пропорційним напрузі джерела живлення і падаючому світловому потоку. Умовне графічне і буквене позначення фотодіода наведено на рис. 4.13.

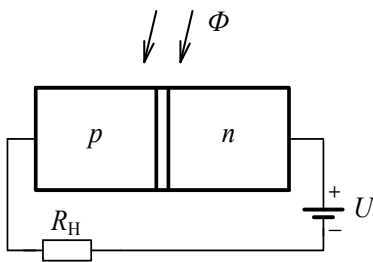


Рисунок 4.12 – Робота фотодіода із зворотним зсувом

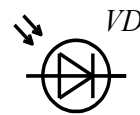


Рисунок 4.13 – Умовне графічне позначення фотодіода

На рис. 4.14 наведено сімейство вольт-амперних характеристик фотодіода при різних рівнях освітленості Φ : $\Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1$.

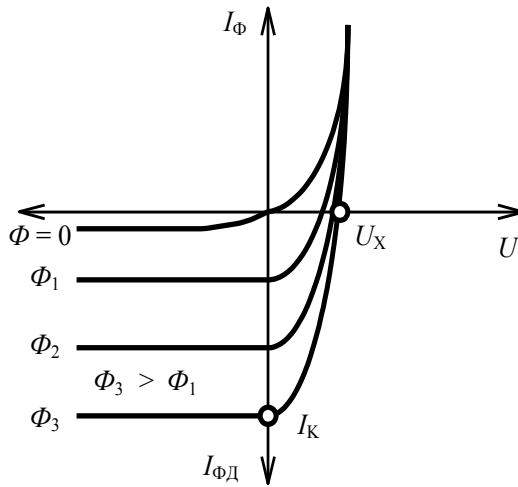


Рисунок 4.14 – Сімейство вольт-амперних характеристик фотодіода

Швидкодія (або час затримки) фотодіода визначається часом переміщення генерованих носіїв від місця генерації до переходу, постійною часу електронно-дірчастого переходу (табл. 4.1). Для збільшення швидкодії використовується лавинний метод генерації носіїв. До переходу прикладається напруга, близька до пробивної, генерація носіїв набуває лавинного характеру. Такий фотодіод називають лавинним фотодіодом. Отримана швидкодія виявляється достатньою для більшості випадків передачі оптичних сигналів. Окрім розглянутих фотодіодів, є спеціальні фотодіоди, що мають підвищену швидкодію. Їх основні параметри наведені в табл. 4.1.

Фототранзистор – це оптоелектронний фотоприймач, що характеризується наявністю внутрішнього підсилення і гнучкістю схемотехніки за рахунок третього керуючого електрода.

Фототранзистори бувають *біполярні*, *польові* та *одноперехідні* (двоелектродний діод).

Домінуючу позицію займає *біполярний фототранзистор* (рис. 4.15), еквівалентна схема якого включає фотодіод і транзистор. Фототранзистор повинен мати зовнішнє вікно для прийому оптичного сигналу. Внутрішній транзистор вмикається за схемою із спільним емітером. У зовнішні електричні ланцюги фототранзистор вмикаються за схемою із спільним емітером і відключе-

ною базою. Як правило, виконується також зовнішнє виведення бази. Біполярний фототранзистор має високу чутливість, легко виконується за інтегральною технологією. Проте фототранзистори мають відносно невисоку швидкодію (табл. 4.1). Біполярні фототранзистори широко застосовуються в різних схемах автоматики, системах керування перетворювачами електричної енергії.

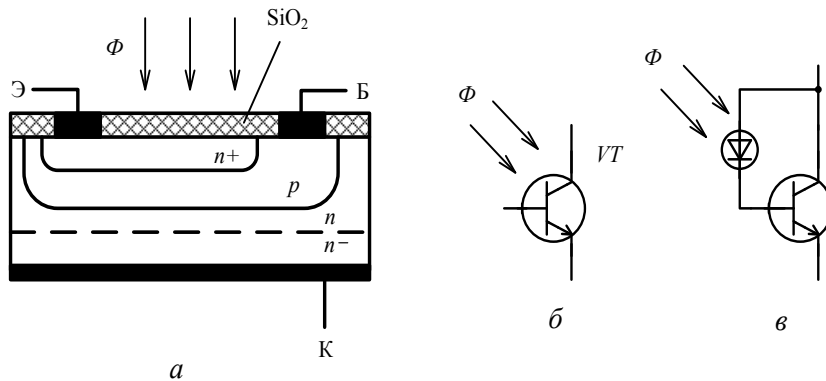


Рисунок 4.15 – Біполярний фототранзистор:
 а – структура фототранзистора; б – умовне графічне позначення;
 в – еквівалентна схема фототранзистора

Вольт-амперні характеристики біполярного фототранзистора наведені на рис. 4.16.

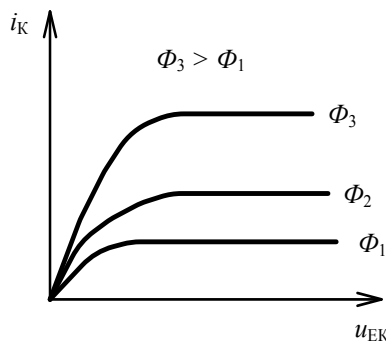


Рисунок 4.16 – Вольт-амперні характеристики фототранзистора

Польові фототранзистори мають високу фоточутливість, широку смугу пропускання. За своїми вихідними і енергетичними характеристиками вони ближче до фоторезисторів. На сьогодні розрізняють два види польових

фототранзисторів (рис. 4.17). У першому варіанті зовнішнє випромінювання через напівпрозорий електрод затвора проникає у зону каналу і генерує в ньому надмірні фотоносії. Наслідком цього є зміна порогової напруги формування інверсійного каналу і крутизни передавальної характеристики, що використовується подальшою схемою обробки сигналу. Другим варіантом є інтегральний фотоприймач, що складається з p - n фотодіода та стокової зони МДН-транзистора. Часто такий фотоприймач називають МДН-фотодіодом.

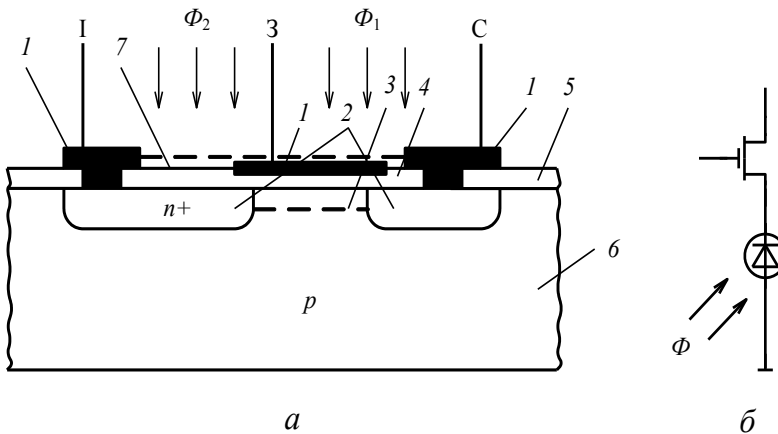


Рисунок 4.17 – МДН-фототранзистор: структура фототранзистора
 1 – металеві електроди витоку, затвора, стоку, 2 – дифузійні зони витоку і стоку,
 3 – канал, 4, 5 – підзатворний і захисний діелектрик, 6 – підкладка,
 7 – антивідбиваюче покриття (а), еквівалентна схема (б)

Високий вхідний опір цих приладів дозволяє їм працювати в різних електронних пристроях з малопотужними джерелами оптичних вхідних сигналів.

Широке використання мають також **одноперехідні фототранзистори**. На рис. 4.18, а наведено структуру одноперехідного фототранзистора, а на рис. 4.18, б – умовно-графічне позначення цього приладу,

Вихідні статичні характеристики, наведені на рис. 4.18, в, показують, що при збільшенні освітленості структури фототранзистора зменшується напруга включення структури, проте, при цьому за рахунок збільшення фотогенерації носіїв в транзисторі збільшується тепловий струм. Одноперехідні фототранзистори широко використовують у схемах увімкнення і вимкнення по

оптичному каналу різних пристроїв автоматики. Ці фототранзистори успішно працюють також у схемах релаксаційних генераторів з плавним регулюванням частоти вихідного електричного сигналу.

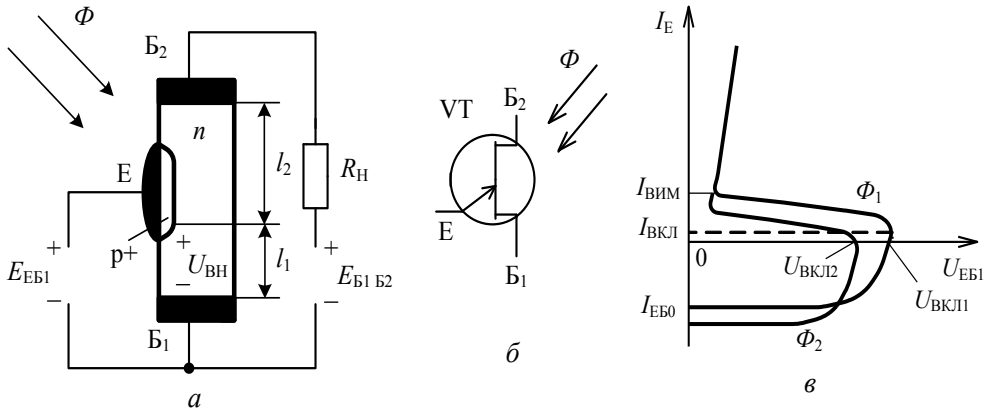


Рисунок 4.18 – Одноперехідний фототранзистор: структура (а); умовно-графічне позначення (б); вихідні статичні характеристики (в)

Фототиристор – це фотоприймач, що має чотири зони з різним типом провідності і три $p-n$ переходи. Цей прилад є аналогом звичайного початковокерowanego тиристора, в якому перехід з непровідного стану в провідний здійснюється при подачі на його структуру оптичного керуючого сигналу. На рис. 4.19, а показана структура фототиристора, а на рис. 4.19, б – його умовне графічне позначення.

Вольт-амперні характеристики фототиристора наведено на рис. 4.19, в, з якого видно, що із збільшенням світлового сигналу Φ , що приходить, зменшується напруга вмикання структури приладу.

Сучасні фототиристори виконуються у вигляді модуля, що містить фототиристор і світлодіод, які виконані у спільному кристалі напівпровідника. Такий прилад має чотири зовнішні виводи: два силових (1 і 2) і два виводи керування (3 і 4) – рис. 4.19, в.

Фототиристори бувають як слабкострумовими, так і силовими, на сотні ампер. Фототиристори знаходять застосування в тих випадках, коли потрібне здійснення гальванічної розв'язки між, наприклад, силовими ланцюгами і ланцюгами керування.

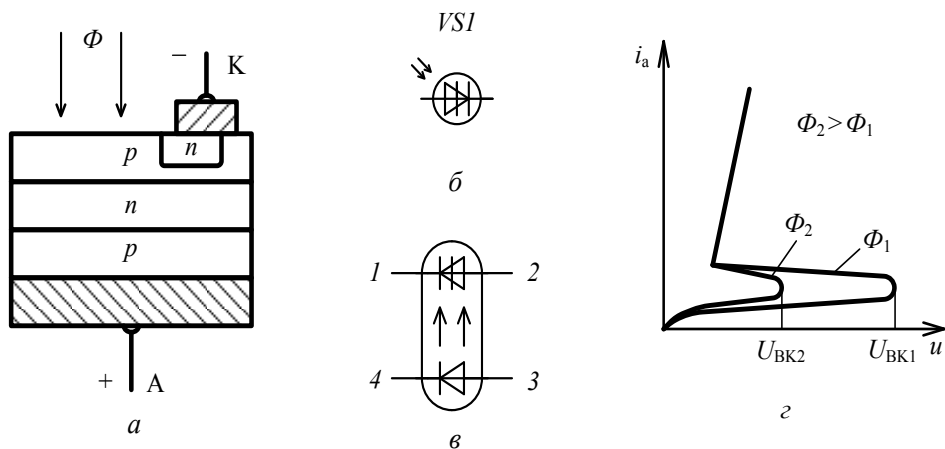


Рисунок 4.19 – Фототиристор: структура фототиристора (а); умовно-графічне позначення (б, в); вольт-амперні характеристики (г)

Фототиристорні модулі – це окремі вузли перетворювальних схем, які керуються електричними сигналами при одночасній гальванічній розв'язці силових ланцюгів і ланцюгів керування за допомогою оптичного каналу.

Фототиристорні модулі виконані в одному корпусі світлодіод і фототиристор (наприклад, модулі ТО 125-12,5-4, ТО 142-80-11 на струми в силовому ланцюзі 12,5 і 80 А відповідно) або окремі вузли, з яких можна збирати силові схеми випрямлячів електричної енергії (рис. 4.2).

Перший модуль (рис. 4.20, а) дозволяє створювати напівкеровані мостові схеми випрямлення (однофазну і трифазну) з керуванням в анодній групі. Другий модуль (рис. 4.20, б) реалізує напівкеровані схеми з керуванням в катодній групі. Модулі виконуються на струми до 1 кА.

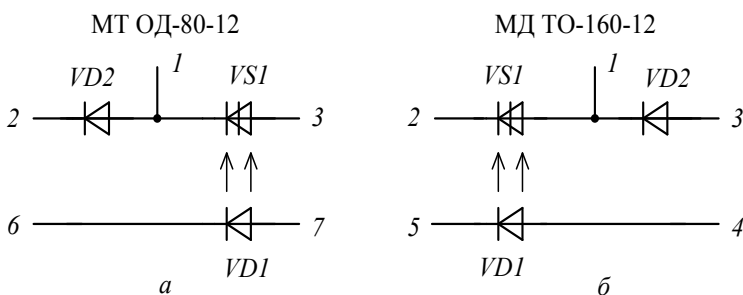


Рисунок 4.20 – Приклад виконання силових модулів фототиристорів

4.3. ОПТРОНИ І ОПТОПАРИ

Оптрони – це прилади, що складаються з випромінювачів і фотоприймачів, оптично і конструктивно зв'язаних між собою, що здійснюють перетворення сигналів за однією з двох функціональних схем: з **внутрішнім електричним зв'язком** (рис. 4.24, *а*) або з **внутрішнім оптичним зв'язком** (рис. 4.24, *б*). Якщо випромінювач і фотоприймач складаються з дискретних елементів, має місце оптопара. Якщо випромінювач і фотоприймач виконані в єдиному кристалі за інтегральною технологією, говорять власне про оптрон.

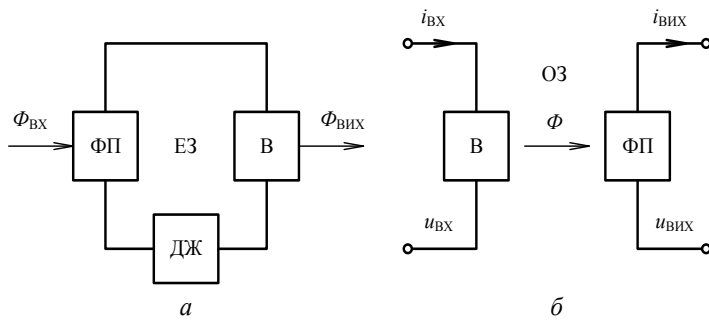


Рисунок 4.21 – Структурні схеми оптронів:
з внутрішнім електричним зв'язком (*а*); з внутрішнім оптичним зв'язком (*б*)

На рис. 4.21 оптрон має в своєму складі: В – джерело світла (випромінювач), ЕЗ – електричний зв'язок, ФП – фотоприймач оптичного випромінювання, ОЗ – оптичний зв'язок.

До основних характеристик оптронів належать входні, вихідні, передавальні характеристики.

Схема рис. 4.21, *а* відповідає оптрону з внутрішнім електричним зв'язком (зовнішнім оптичним), в якому входний і вихідний сигнали оптичні. Якщо ці сигнали різної інтенсивності (вихідний більше входного), маємо підсилювач оптичних сигналів. Якщо входний і вихідний сигнали знаходяться в різних ділянках спектра – маємо спектральний перетворювач.

Схема рис. 4.21, *б* відповідає оптрону з внутрішнім оптичним зв'язком (зовнішнім електричним) і використовується для гальванічної розв'язки електричних ланцюгів, а також для побудови цілого спектра електронних пристроїв на оптронах: підсилювачів, блокінг-генераторів, мультівібраторів, ре-

лаксаційних генераторів, тригерів, логічних схем і т. д.

Оптрони прийнято називати за типом фотоприймача. Як випромінювачі використовують лампи розжарювання і світлодіоди. Фотоприймачі – це фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристри (рис. 4.22).

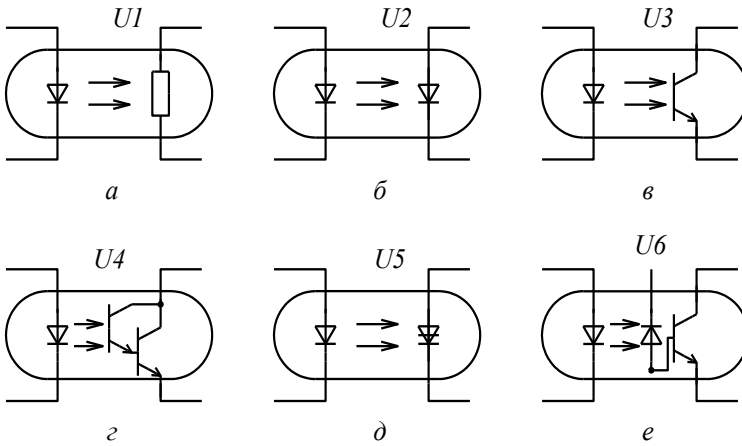


Рисунок 4.22 – Основні типи оптронів: резисторний (а); діодний (б); транзисторний(в, г); тиристорний (д); діодно-транзисторний (е)

На сьогодні оптрони найчастіше виконують за допомогою інтегральних технологій (напівпровідникової і плівкової). При цьому такі оптрони виконуються як корпусними, так і у складі інтегральних мікросхем. Існують **оптоелектронні інтегральні мікросхеми**, що включають оптрони як розділові елементи у вхідних ланцюгах або використовують інші властивості оптронів.

Конструкція оптронів визначається їх функціональним призначенням: залежно від галузі застосування вибирається та або інша конструкція (рис. 4.23).

Рис. 4.23, а відповідає оптрону з максимальним електричним опором вхід–вихід. Випромінювач і фотоприймач розділені діелектричним конструктивом, що нагадує ізолятор в електричних ланцюгах. Такий оптрон і застосовується для гальванічної розв'язки електричних ланцюгів.

Рис. 4.23, б відповідає оптрону, що має максимальний коефіцієнт зв'язку випромінювач–фотоприймач.

Рис. 4.23, в відповідає оптрону з розімкненим оптичним каналом. Може застосовуватися для підрахунку кількості будь-яких виробів, виконувати фу-

нкцію датчика (наприклад, в турнікеті метро).

Рис. 4.23, *г* відповідає оптрону з відбивною поверхнею. Може використовуватися для визначення відстані до об'єкта, визначення прозорості газових і рідинних середовищ як датчик електронного кінцевого вимикача.

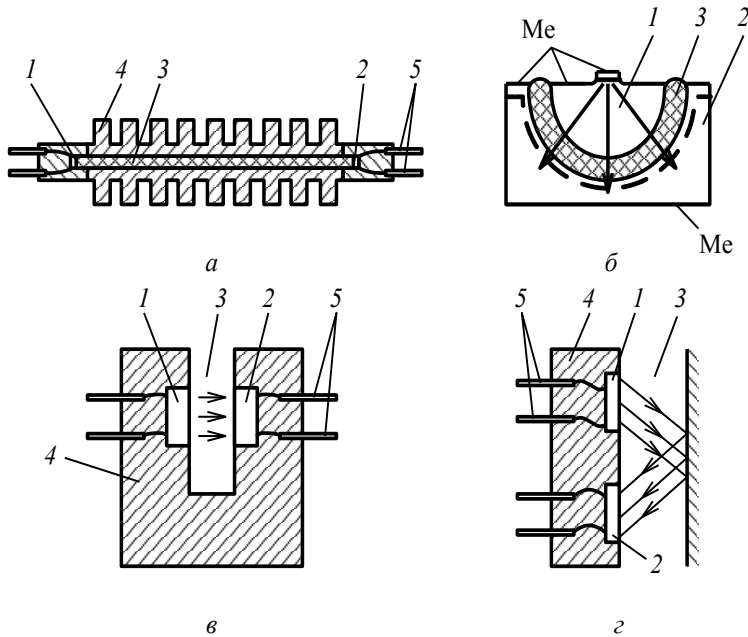


Рисунок 4.23 – Конструктивні різновиди оптронів:
 високовольтний оптоізолятор (*а*); півсферичний енергетичний оптрон (*б*);
 оптопереривник (*в*); відбивний оптрон (*г*); 1 – випромінювач; 2 – фотоприймач;
 3 – оптичне середовище; 4 – корпус; 5 – зовнішні виводи; Me – металеві електроди

Природно, існують й інші конструктивні види оптронів, наприклад, оптоелектронні реле.

Оптоелектронні реле. Промисловість випускає інтегральні гібридні мікросхеми, зокрема – серії КР293, що є оптоелектронними комутаторами сигналів постійного і змінного струмів. За більшістю технічних характеристик і функціональних можливостей вони значно перевершують електромеханічні реле й успішно можуть їх замінити в багатьох галузях техніки. Такі інтегральні схеми прийнято називати *твердотільними реле* [12].

До складу серії КР293 входять тридцять типів мікросхем, об'єднаних у

десять груп (КР293КП1-КР293КП10), кожна з яких утворена трьома типономіналами, позначеними буквеними індексами А, Б, В. Прилади поміщені в пластмасові корпуси.

Як приклад розглянемо мікросхему КР293КП1В (рис. 4.24). Мікросхема має такі основні параметри: пряма вхідна напруга, $U_{ВХ} = 1,2$ В; прямий вхідний струм $I_{ВХ} = 5$ мА; змінна напруга комутації $U_{КОМ} = 400$ В; комутований струм $I_{КОМ} = 80$ мА.

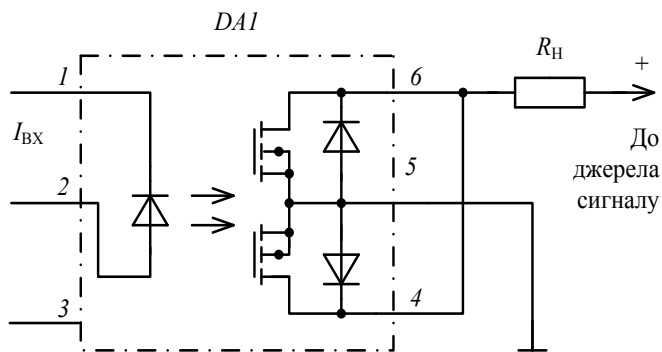


Рисунок 4.24 – Твердотільне реле КР293КП1В

Випромінювач – світлодіод інфрачервоної ділянки спектра. При зниженні робочої напруги можна пропорційно збільшувати робочий струм. Реле, що мають зовнішній вивід середньої точки діодів (вивід 5, рис. 4.24), мають покращені комутаційні характеристики. В цьому випадку шляхом паралельного з'єднання виводів 4 і 6 (рис. 4.24) можна струм, що комутується, збільшити в два рази. Динамічні параметри оптоелектронного реле істотно залежать від величини вхідного струму. В той же час слід знати, що мікросхеми серії КР293 зберігають високі показники надійності, якщо середній вхідний струм не перевищуватиме 20 мА.

Твердотільні реле вимагають дотримання температурного режиму, при якому структура не повинна нагріватися вище 125 °С, причому тепло може надходити як з навколишнього середовища, так і в результаті тепловиділення в самому приладі, в основному у вихідних ланцюгах при протіканні струму навантаження. Зовнішній вигляд реле КР293КП1В показано на рис. 4.25.

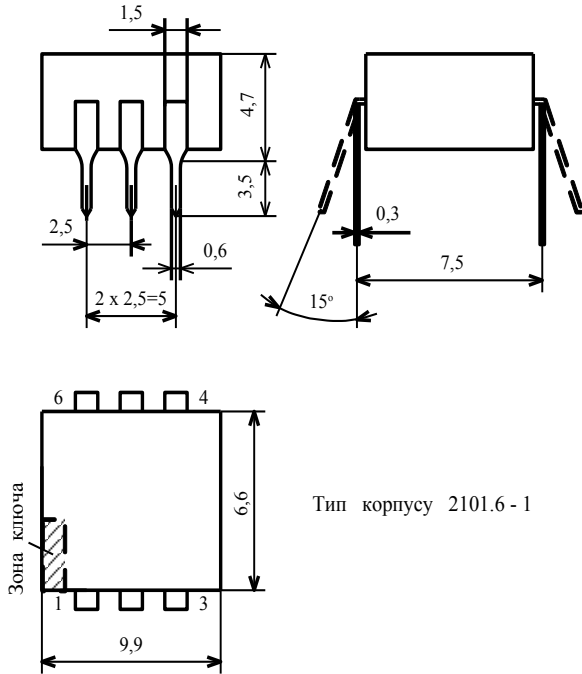


Рисунок 4.25 – Зовнішній вигляд реле КР293КП1В

4.4. ЕЛЕМЕНТИ ОПТИЧНОЇ ІНДИКАЦІЇ

Елементи оптичної індикації призначені для зв'язку людини-оператора з керованою ним машиною. До 90 % інформації людина отримує через оптичний канал. Вживані на сьогодні оптичні індикатори за принципом дії бувають *вакуумні розжарювання, вакуумні люмінесцентні, напівпровідникові, рідкокристалічні і газорозрядні* [8, 11].

У зв'язку з реалізацією цифрового керування загальноприйнятим є відображення інформації за допомогою семисегментних (або фактично восьми-сегментних, з урахуванням елемента, що розділяє розряди) світлових індикаторів. Розташування елементів відображення наведено на рис. 4.26. Подібне розташування елементів дозволяє відображати цифри від 0 до 9, а також ряд букв латинського алфавіту. На рис. 4.26, позиція *a*, наведено умовне позначення сегментів індикатора, а позиція *б* цього рисунку показує електричне підключення індикатора до схеми.

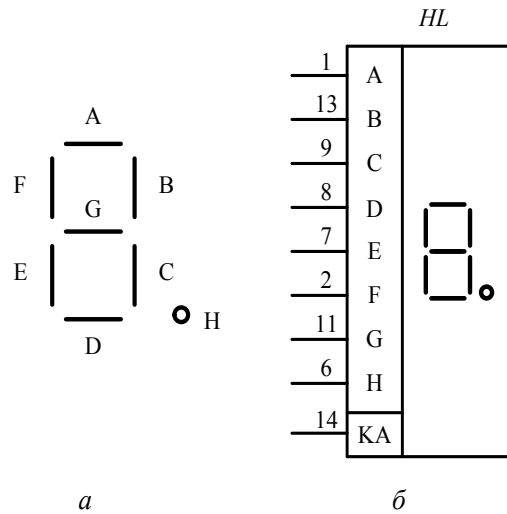


Рисунок 4.26 – Позначення елементів відображення

Вакуумні індикатори розжарювання – це електровакуумні прилади, усередині яких розташовані світловипромінюючі елементи у вигляді ниток розжарювання. У колбі знаходиться основа, на якій розташовані стійки, а між стійками натягнуті вольфрамові спіральки-сегменти. Один з виводів сегментів спільний, решта виводів керуючі. При пропусканні струму через вибраний сегмент в результаті його нагріву в режимі недожару ($t^{\circ} = 1200\text{--}1500$ °C) здійснюється індикація необхідного знака. Колір свічення зазвичай оранжево-жовтий. Застосування світлофільтрів дозволяє вибирати необхідну ділянку оптичного діапазону (колір свічення).

Термін служби таких індикаторів досягає десятків тисяч годин. Інформація добре видна в умовах зовнішнього освітлення індикатора. Серед недоліків вакуумних індикаторів розжарювання відносяться велика споживана потужність з джерела живлення, малий ККД, неможливість виконання індикаторів за інтегральною технологією, наявність скляного балона.

Перевагами цих індикаторів є байдужість до зовнішнього електромагнітного випромінювання і широка діаграма спрямованості випромінювання.

Вакуумні індикатори розжарювання застосовуються в стаціонарних контрольно-вимірних приладах. Типовими представниками цих індикаторів є ИВ-9, ИВ-13, ИВ-19, ИВ-20 та інші.

Вакуумні люмінесцентні індикатори мають один розжарюваний катод і декілька анодів, що відображають необхідний знак. Розрізняють діодний і тріодний режими роботи. Розжарюваний електричним струмом катод є джерелом електронів. Аноди виконуються у вигляді знаковитезуючих сегментів, покритих шаром люмінофора. У балоні є активний газопоглинач для підтримки чистоти вакууму. Стінки балона покривають прозорим струмопровідним шаром, який екранує потік електронів від зовнішніх електричних полів. Як правило, в приладах використовується восьмисегментна форма відображення (рис. 4.26).

В однорозрядних індикаторах використовується діодний режим роботи. При наявності напруги між катодом і необхідним анодом електрони ударяють в анод, покритий шаром люмінофора. Відображається інформація, що відповідає вибраним анодам. Колір свічення задається видом люмінофора (як правило, колір свічення зеленуватий).

У багаторозрядних індикаторах використовується тріодний режим роботи: є третій електрод – сітка, яка забороняє попадання електронів на сусідні розряди, такі, що не працюють у цей момент роботи приладу.

Конструктивно ці індикатори виконуються однорозрядними в лампових балонах, в плоских скляних корпусах із стрічковими виводами (типу ИВ-18), або багаторозрядними в скляних корпусах (ИВ-28А, ИВЛ2-7/5 та інші). На рис. 4.27 наведена схема виводів індикатора типу ИВЛ2-7/5.

Ці прилади працюють з різними видами напруги розжарювання (постійним, змінним й імпульсним), мають високий ККД. Величина анодної напруги і напруги живлення близькі до вихідної напруги блоків живлення інтегральної схемотехніки. Індикатори працюють при однакових величинах анодної і сіткової напруги, що спрощує роботу схеми керування індикатором.

До недоліків цих приладів потрібно віднести меншу порівняно з вакуумними індикаторами розжарювання швидкодію. Термін служби приладів обмежений властивостями люмінофора.

На рис. 4.27 показані з'єднання виводів з електродами індикаторів (номер виводу – найменування електрода): виводи 1, 2, 3 – катод, провідний шар внутрішньої поверхні балона; 2, 22 – сітка розряду 5; 3 – анод-елемент М (точка); 4 – аноди-сегменти 2 розрядів 1, 2, 4, 5; 5 – аноди-сегменти d_1, d_2, d_4, d_5 ; 6, 21 – сітка розряду 4; 7–10 – аноди-сегменти $ж_1, ж_2, ж_4, ж_5$; 11, 19 – сітка ро-

зряду 2; 12 – аноди-сегменти V_1, V_2, V_4, V_5 ; 13 – аноди-сегменти $\bar{b}_1, \bar{b}_2, \bar{b}_4, \bar{b}_5$; 14 – аноди-сегменти a_1, a_2, a_4, a_5 ; 18 – сітки розряду 1; 17 – катод.

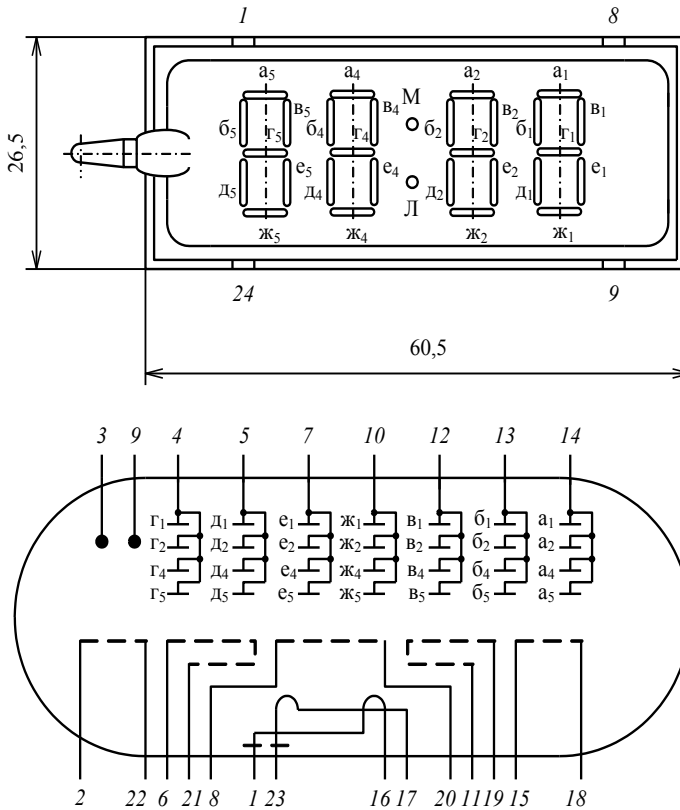


Рисунок 4.27 – Вакуумний люмінесцентний індикатор ИВЛ2-7/5

Вакуумні люмінесцентні індикатори знаходять застосування у стаціонарних і переносних контрольно-вимірювальних приладах різного призначення.

Напівпровідникові індикатори успішно використовуються спільно з різними цифровими пристроями, зокрема – з мікропроцесорними, при відносно невеликих розмірах символу, що відображається ними. Принцип їх дії оснований на здатності електронно-дірчастого переходу випромінювати світло при його прямому зсуві. Конструктивно ці індикатори складаються з декількох випромінюючих $p-n$ переходів, кількість яких рівна кількості елементів відображення. Для отримання високої світлової ефективності напівпровідникових індикаторів необхідно щоб енергія, що звільняється при реком-

бінаціях, в основному витрачалася на випромінювання. При цьому колір свічення визначається початковим матеріалом напівпровідника, а яскравість свічення – струмом, що протікає.

Промисловість випускає окремі корпусні світлодіоди, за допомогою яких можна відображати точку; сегментні знаковинтезуючі індикатори (цифрові і буквені), за допомогою яких можна висвітити необхідну цифру або букву; матричні індикатори, що забезпечують відображення цифр, букв, символів, графіків.

Сегмент виконується у вигляді елемента відображення. Типове розташування сегментів показано на рис. 4.26, *a*. Світлодіоди сегментів мають один спільний вивід (анодів або катодів) і виводи керування. У багаторозрядних індикаторах однойменні сегменти всіх розрядів зазвичай електрично сполучені між собою. Індикація здійснюється або в статичному, або в динамічному режимі. Для обмеження робочих струмів сегментів в їх ланцюги включають зовнішні струмообмежуючі резистори.

У матричних знаковинтезуючих напівпровідникових індикаторах визначення вибраного елемента індикації здійснюється подачею від системи керування напруги на відповідні шини рядків і стовпців матриці. Типовими представниками напівпровідникових індикаторів є індикатори АЛС342, КЛЦ202, АЛС318, КИПЦ26А. На рис. 4.28 наведено схему виводів багаторозрядного напівпровідникового індикатора АЛС318.

Світлодіодні індикатори є слабкострумовими і низьковольтними приладами, лінійні розміри елементів відображення досягають 22 мм і більше.

Перевагами напівпровідникових індикаторів є повне узгодження з елементами і пристроями мікроелектроніки за всіма основними параметрами, а також базова технологія виготовлення, висока яскравість інформації, що відображається.

Недоліки цих індикаторів – недовгий термін служби, пов'язаний з процесами старіння напівпровідникових матеріалів. Необхідно зазначити, що на сьогодні є напівпровідникові матеріали, що забезпечують випромінювання у всьому видимому діапазоні спектра. Галузь застосування напівпровідникових індикаторів – це переносні і стаціонарні контрольно-вимірні прилади різного призначення.

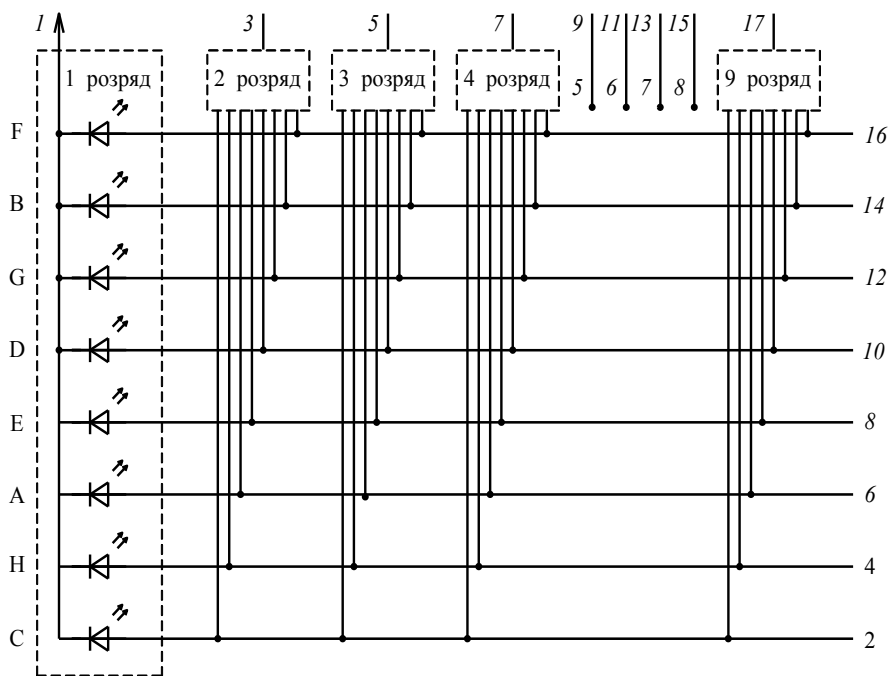


Рисунок 4.28 – Багаторозрядний напівпровідниковий індикатор АЛС318

Рідкокристалічні індикатори належать до пасивних приладів, що самостійно не випромінюють світло. В основу їх роботи покладено властивість деяких речовин змінювати свої оптичні показники (коефіцієнти поглинання, віддзеркалення, розсіювання, показник заломлення або пропускання) під впливом зовнішнього електричного поля. Унаслідок модуляції падаючого світла змінюється колір ділянки індикатора, до якого прикладається електричне поле. В результаті «проступає» зображення, відповідне формі електродів індикатора. Речовини, що володіють вказаними властивостями, називаються **рідинними кристалами (РК)**. Властивості рідинного кристала зберігаються у вузькому температурному діапазоні (-5°C – $+65^{\circ}\text{C}$).

До основних властивостей РК належать такі: оптична анізотропія (різні коефіцієнти заломлення кристала у різних напрямках); нитковидність рідинного кристала (наявність великою і малою оптичних осей); слабкі зв'язки між молекулами, які легко руйнуються електричним полем.

Оскільки рідинний кристал не випромінює світло, а регулює його проходження від стороннього джерела, використовується або зовнішнє світло

(наприклад, сонячне), або світло вбудованих випромінювачів (ламп розжарювання, світлодіодів). Індикатор має дві пари електродів, що за формою повторюють відображуваний знак.

З безлічі електрооптичних явищ, характерних для РК, в пристроях відображення інформації в основному практичне застосування знайшли *ефект динамічного розсіювання*, *твіст-ефект* (ефект скручування) та *ефект гість-господар*. Розглянемо перші два ефекти.

Ефект динамічного розсіювання (рис. 4.29) полягає в тому, що при наявності зовнішньої електричної напруги у РК елементарний осередок між електродами каламутніє, розсіюючи світло.

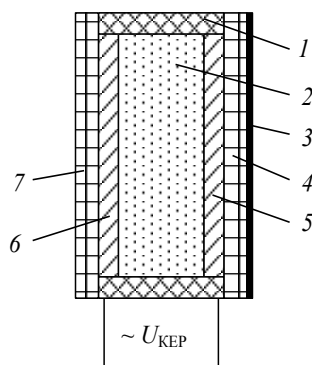


Рисунок 4.29 – Рідкокристалічний індикатор на ефекті динамічного розсіювання:
 1 – прокладка; 2 – рідинний кристал; 3 – покриття, що відбиває; 4 – заднє скло;
 5 – спільний електрод; 6 – прозорі електроди сегментів; 7 – переднє скло

Це обумовлено тим, що при подачі електричного поля до шару РК з негативною анізотропією, молекули орієнтуються уперек поля. Рухомі іони, завдяки яким протікає електричний струм в РК, прагнуть порушити цю орієнтацію. При деякому значенні струму виникає стан турбулентного руху, при якому впорядкованість структури порушується і кристал каламутніє. Живильна напруга при цьому становить одиниці вольт. Час «включення» РК близько 500 мс, а «виключення» – 150–180 мс.

Твіст-ефект (рис. 4.30) полягає в зміні кута обертання площини поляризації під впливом зовнішнього електричного поля. Він спостерігається в РК з позитивною анізотропією. У такому РК, що знаходиться між двома світло-

провідними пластинами, довгі осі молекул паралельні пластинам, а самі молекули «скручені» у спіраль. Шар скрученого РК повертає площину поляризації світла, що проходить, на 90° . При підключенні електричної напруги всі молекули орієнтуються уздовж поля та ефект скручування пропадає. Проступає зображення, відповідне формі пластин.

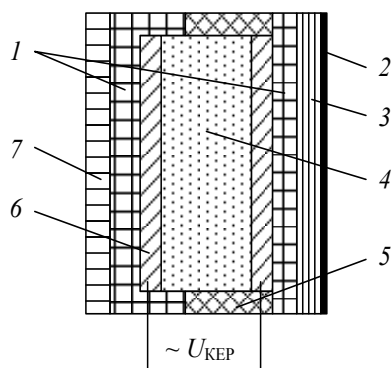


Рисунок 4.30 – Рідкокристалічний індикатор, що діє на ефекті обертання площини поляризації шару рідких кристалів, який зникає під дією електричного поля (твіст-ефект): 1 – скляний осередок; 2 – покриття, що віддзеркалює; 3 – полярізнальна пластина з вертикальною площиною поляризації; 4 – рідкі кристали; 5 – прокладка; 6 – прозорі електроди; 7 – полярізнальна пластина з горизонтальною площиною поляризації

Твіст-ефект належить до чистих польових ефектів. При його використанні практично не споживається струм з джерела. Він забезпечує отримання хорошого контрасту зображення і виявляється при малій напрузі 0,9–1,5 В. Тривалість перехідного процесу при включенні і виключенні становить близько 200 мс.

Живлення рідкокристалічних індикаторів здійснюється змінною напругою або напругою «нуль-максимум». При живленні постійною напругою термін служби індикатора зменшується в 10 разів. Колір рідкокристалічних індикаторів змінюють введенням у кристал спеціальних барвників.

Рідкокристалічні індикатори прості за конструкцією, технологічні у виготовленні, мають низьке енергоспоживання, забезпечують високу контрастність зображення, добре узгоджуються з пристроями мікроелектроніки. З сімейства цих індикаторів можна назвати індикатори для електронних годинників ИЖКЦ1-4/16, індикатори для мікрокалькуляторів ИЖКЦ2-8/7, цифро-

знакові індикатори ИЖКЦ14-4/7 та інші.

Недоліки рідкокристалічних індикаторів – низька швидкодія, вузька діаграма спрямованості їх «випромінювання», підвищена крихкість конструкції індикатора. Сфера застосування – стаціонарні і переносні економічні контрольно-вимірювальні прилади з малопотужними джерелами живлення.

Газорозрядні індикатори потребують великої робочої напруги (десятки і сотні вольт), проте дозволяють легко створювати індикатори великих розмірів, аж до газорозрядних екранів. Індикатори працюють в режимі живлення постійною напругою, використовуючи ділянки **нормального та аномального тліючого** розряду, або з використанням високочастотної живильної напруги. У першому випадку потрібний зовнішній резистор для обмеження струму розряду, в другому випадку розряд сам себе обмежує.

За конструктивними особливостями газорозрядні індикатори діляться на три групи: **знакові** (переважно цифрові), **тиратронні** індикатори (шкальні) і **матричні газорозрядні панелі**. Практично всі індикатори є комбінацією діодних газорозрядних проміжків (рис. 4.31). Струм у такому розрядному проміжку обмежений резистивним навантаженням, а робоча точка приладу визначається перетином прямої навантаження з вольт-амперною характеристикою (рис. 4.31, а). Світловипромінюючим елементом є зона розряду, прилегла до катода. Як газове наповнення застосовують інертні гази, які слабо реагують з внутрішніми деталями приладу. Це забезпечує великий термін служби індикаторів. Умовно-графічне позначення газорозрядного індикатора наведено на рис. 4.31, б.

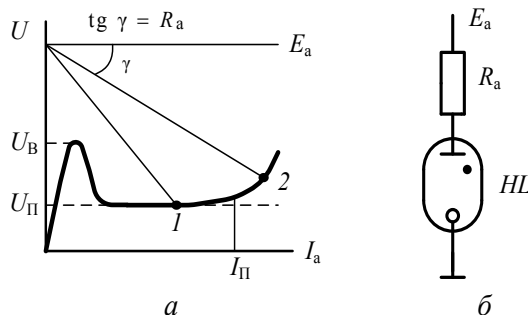


Рисунок 4.31 – Газорозрядний індикатор:
визначення робочої точки на вольт-амперній характеристиці (а);
схема включення та умовно-графічне позначення (б)

Колір свічення визначається газовим складом, проте високу яскравість свічення у видимій зоні спектра забезпечує, зокрема, неон і його суміші з іншими інертними газами.

Яскравість свічення задається величиною струму, що протікає. Оскільки основні лінії випромінювання неону лежать в оранжево-червоному діапазоні спектра, то цим в основному й обмежується колір свічення більшості газорозрядних індикаторів.

На рис. 4.32 наведено вольт-амперну характеристику самостійного газового розряду. Як правило, в цілях індикації використовується ділянка нормального тліючого розряду – зона 2.

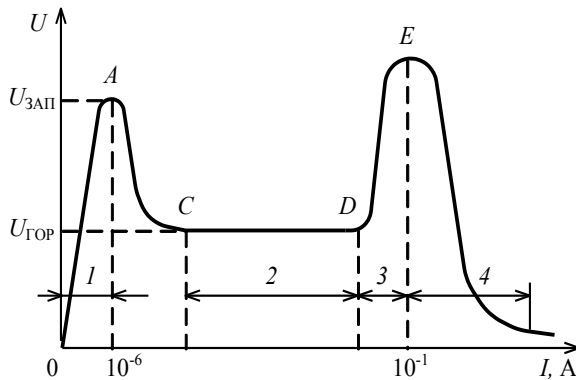


Рисунок 4.32 – Вольт-амперна характеристика газорозрядного проміжку між двома електродами: 1 – темний розряд; 2 – нормальний тліючий розряд; 3 – аномальний тліючий розряд; 4 – дуговий розряд

Знакові індикатори є найбільш простими, конструктивно включають декілька катодів (за кількістю елементів відображення: форма катода повторює бажаний знак) і один або декілька анодів, які вводяться у прилад для вирівнювання напруги запалювання розряду щодо анодів для різних катодів. Подібні індикатори завдяки звичності зображення знаків знайшли свого часу широке застосування в різних контрольно-вимірних приладах з великим розміром знака, що відображався (ИН1-ИН7, ИН-12А, ИН12-Б).

Тиратронні індикатори відрізняються малою потужністю керування, наявністю декількох входів, що дозволяє ефективно організувати матричну адресацію, а також мають внутрішню пам'ять. Ці індикатори мають керуючі

сітки. Індикатори здатні запам'ятовувати інформацію, оскільки розряд у них зберігається до тих пір, поки є напруга хоч би на одному з анодів. Важливою особливістю тиратронних індикаторів є те, що для керуючих сіток вони є джерелом струму, напрям якого міняється залежно від стану тиратрона.

Тиратронні індикатори застосовуються як одиничні елементи відображення при створенні багаторозрядних індикаторів (МТХ-90). Застосування знаходять також матричні індикатори (ИТМ1, ИТМ2), сегментні індикатори (ИТС1), що дозволяють відображати арабські цифри, а також багатоеlementні (40 елементів) індикатори для відображення буквено-цифрової інформації (ИВГ-1-5×8Л).

Матричні газорозрядні панелі мають велику кількість світловипромінюючих елементів, що утворюються на перерізах ортогональних електродів. Вони працюють як на постійному струмі, так і на змінному. Матричні панелі дозволяють отримувати **кольорове зображення** «телевізійним» способом. Ці індикатори використовуються для відображення інформації великого обсягу на екрани великої площі, наприклад, на табло стадіонів, залізничних вокзалів, як інформаційний рядок, що «біжить», різної рекламної інформації.

Підводячи підсумок викладеному необхідно зазначити, що не існує **універсальних світлових індикаторів**. У кожному конкретному випадку вибирається той або інший тип індикатора залежно від технічних й економічних вимог, що до нього пред'являються. Так, якщо потрібна економічність роботи індикаторів, вибирають рідкокристалічні або напівпровідникові. Якщо потрібна висока яскравість зображення і широка діаграма спрямованості випромінювання, вибирають газорозрядні індикатори. Потребу у довго тривалості роботи задовольняє використання вакуумних індикаторів розжарювання.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Яке призначення оптичних випромінювачів і фотоприймачів?
2. Назвіть основні випромінювачі оптоелектроніки і галузь їх раціонального застосування.
3. Поясніть принцип дії газорозрядних випромінювачів і ламп розжарювання.
4. В чому особливості електролюмінесцентних випромінювачів?

5. Назвіть основні характеристики і параметри інжекційних світлодіодів.
6. Які вимоги пред'являються до діаграм спрямованості оптичного випромінювання?
7. Перерахуйте основні фотоприймачі і вкажіть галузь їх раціонального застосування.
8. Поясніть принцип дії фоторезисторів.
9. Поясніть принцип дії фотодіодів, два режими їх підключення в електричній ланцюг.
10. Поясніть принцип дії фототранзисторів, укажіть їх основні характеристики і параметри.
11. Поясніть принцип дії фототиристора.
12. Що таке силові фототиристорні модулі?
13. Поясніть призначення та конструктивні особливості оптронів і оптопар в електроніці.
14. Поясніть особливості і галузі застосування оптоелектронних (твердотільних) реле.
15. Які функції виконують елементи світлової індикації?
16. Назвіть основні типи оптичних індикаторів, що використовуються, і галузі їх раціонального використання.
17. Поясніть принцип дії вакуумних світлових індикаторів.
18. Поясніть принцип дії та особливості застосування напівпровідникових світлових індикаторів.
19. У чому переваги і недоліки рідкокристалічних світлових індикаторів?
20. Поясніть фізичні ефекти, що лежать в основі роботи рідкокристалічних індикаторів.
21. Поясніть принцип дії газорозрядних світлових індикаторів.
22. Наведіть умовно-графічні позначення вивчених приладів оптоелектроніки.
23. Порівняйте вивчені світлові індикатори за основними характеристиками і параметрами.
24. Поясніть принципи керування багаторозрядними світловими індикаторами.
25. У чому зручність семисегментних елементів відображення інформації?

5. ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРІВ У НАУЦІ

5.1. ЛАЗЕРНІ ВИМІРНИКИ ШВИДКОСТІ

Однією з важливих проблем газової динаміки є визначення поля швидкостей при обтіканні моделей різних тіл турбулентним потоком газу, а також отримання візуальної картини процесу обтікання [1, 14]. Ця проблема вирішується різними способами. Наприклад, швидкість потоку газового середовища визначається за допомогою манометрів з насадками, які реєструють величину тиску, і термоанемометрів, а візуалізація здійснюється тіншовим методом. Як правило, в потік, який оточує модель, вводиться дріт, що нагрівається електричним струмом, і за ступенем його охолодження визначається швидкість газу в цій точці. Недолік цих методів полягає в кінцевих розмірах датчиків, які самі збурюють аналізований об'єм потоку, що негативно позначається на точності вимірювання і якості візуальної картини.

З розвитком лазерної техніки з'явилася можливість створення пристроїв для вимірювання вектора швидкості рухомого середовища, що використовують зрушення частоти ефекту Доплера, утворюваного при розсіянні пучків випромінювання лазера рухомими частинками середовища [1, 5].

Цей принцип покладений в основу роботи *лазерних доплерівських вимірників швидкості* (ЛДВШ) – перспективних пристроїв, що мають ряд переваг порівняно з традиційними вимірниками: відсутність спотворення потоку в точці вимірювання, оскільки метод неконтактний; широкий динамічний діапазон вимірюваних швидкостей (10^{-6} – 10^6 м/с); хороший просторовий дозвіл (10^{-10} см³); безпосереднє вимірювання швидкості, що не вимагає подальшої математичної обробки інформації.

До істотних обмежень принципу вимірювання необхідно віднести те, що досліджуване середовище повинно бути оптично прозорим і містити частинки, що розсіюють світло, оптимальних розмірів та з оптимальними оптичними властивостями.

Широкі можливості лазерних вимірників швидкості особливо яскраво

виявляються при дослідженні газових і рідинних потоків з малими поперечними розмірами, коли відомі методи із застосуванням трубок надмірного тиску або термоанемометрів непридатні.

Допплерівський лазерний метод дозволяє вимірювати швидкості турбулентних потоків газу і рідини, повітряних потоків, що містять краплі води і тверді частинки (двофазні потоки), гіперзвукових потоків і швидкості рухомих поверхонь, що розсіюють світло.

При використанні оптичних пристроїв у дослідженнях простору біля моделі потрібно передбачати додаткові заходи, спрямовані на зменшення або повне усунення впливу вібрації. Таким чином, при побудові ЛДВШ потрібно враховувати вказані обмеження, вибираючи оптимальні співвідношення параметрів схеми і середовища, а також вібраційні умови роботи приладу.

Ефект Доплера, використовуваний у цих пристроях, полягає в зміні довжини хвилі (частоти), яка спостерігається при русі джерела випромінювання відносно приймача. Цей ефект характерний для будь-якого хвильового процесу поширення світла, радіохвиль, звуку і має таке пояснення. Якщо джерело коливань з періодом T_0 нерухоме відносно приймача, то довжина хвилі λ , що сприймається приймачем, рівна добутку швидкості світла c на період коливань T_0 . Якщо ж джерело, наприклад, наближається до спостерігача (або спостерігач до джерела) зі швидкістю v , то довжина хвилі λ зміниться:

$$\lambda = (c - v) T_0 = \lambda_0 (1 - v/c).$$

Спостерігач зареєструє довжину хвилі $\lambda < \lambda_0$, причому відносна зміна довжини хвилі рівна:

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}.$$

Все різноманіття різних схем лазерних доплерівських вимірників швидкості можна розділити на два типи: схеми з опорним променем і диференціальні схеми.

Перша установка ЛДВШ *за схемою з опорним променем* була розроблена в середині 60-х років (рис. 5.1).

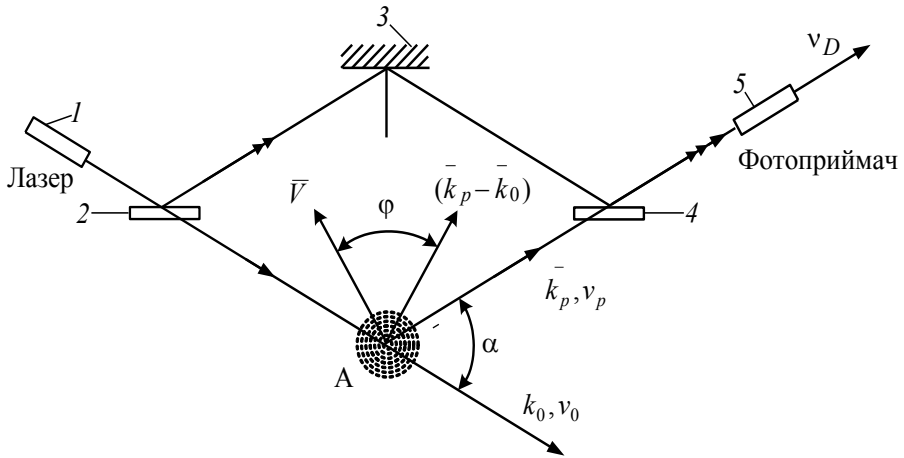


Рисунок 5.1 – Схема ЛДВШ з опорним променем

Установка працює таким чином. Промінь газового лазера 1 з частотою випромінювання ν_0 і хвильовим вектором $\bar{k}_0 = 2\pi/\lambda_0$ падає на частинки середовища в точці А, які рухаються в аналізованому просторі з швидкістю \bar{v} і розсіюють світло. Розсіяні промені з частотою ν_p і хвильовим вектором $\bar{k}_p = 2\pi/\lambda_p$ збираються на фотокатоді приймача. Частина початкового пучка лазера відхиляється напівпрозорим дзеркалом 2, відбивається дзеркалом 3, потім потрапляє на напівпрозоре дзеркало 4 і поєднується з розсіяним випромінюванням. Якщо на чутливому шарі фотокатода 5 хвильові фронти обох пучків співпадають, то вихідний струм фотоприймача міститиме компоненту різницевої частоти (5.1):

$$\nu_D = \nu_p - \nu_0. \quad (5.1)$$

Таким чином, отримують корисний сигнал доплерівської частоти.

Визначимо, як зміниться частота при розсіянні випромінювання на частинці, що переміщається з швидкістю v в потоці оптично прозорого середовища. Фронт хвилі опорного променя від нерухомого джерела з частотою ω_0 при попаданні на частинку розсіюється, причому розсіяне випромінювання має частоту:

$$\omega_p = \omega_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right).$$

Частинка, змінюючи фронт хвилі, стає як би рухомих в просторі джерелом вторинного розсіяного випромінювання, і нерухомий фотоприймач вже сприйматиме сигнал розсіяною частинкою випромінювання з доплерівською частотою:

$$\omega_D = (\omega_p - \omega_0) = -\omega \frac{v}{c}.$$

Вважаючи $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi c}{\lambda} = kc$, отримаємо:

$$\omega_D = (\omega_p - \omega_0) = -kv = (k_p - k_0)c.$$

З векторного трикутника, утвореного хвильовими векторами \bar{k}_p , \bar{k}_0 і \bar{k} , слідує $\bar{k} = (\bar{k}_p - \bar{k}_0)$ або, враховуючи той факт, що бісектриса кута α між векторами \bar{k}_p і \bar{k}_0 майже перпендикулярна вектору різниці \bar{k} , то:

$$\bar{k} \cong 2k_0 \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Оскільки скалярний добуток векторів $(\bar{K} \cdot \bar{V})$ рівний:

$$(\bar{K} \cdot \bar{V}) = \bar{K} \cdot \bar{V} \cos \varphi = 2k_0 v \sin \frac{\alpha}{2} \cos \varphi,$$

то, враховуючи показник заломлення середовища n , знаходимо частоту доплерівського сигналу:

$$\nu_D = \frac{2n}{\lambda_0} v \sin \frac{\alpha}{2} \cos \varphi,$$

де φ – кут між векторами \bar{v} і \bar{k} .

Звідси, чим більша площа фотокатода приймача, тим в меншому тілесному куті захоплюється випромінювання, що накладає обмеження на прийом сигналу, який несе інформацію про швидкість. Ця умова вимагає поєднання на фотокатоді хвильових фронтів з точністю до часток довжини хвилі, тому така схема критична при налагоджуванні.

Насправді, мають місце нерівні значення потужності опорної і розсіяної хвилі. Потрібні певні оптимальні співвідношення потужності цих випромінювань, тобто необхідно вводити додаткові оптичні елементи для ослаблення енергії опорної хвилі.

Аналіз існуючих схем ЛДВШ показав, що для отримання інформації про вектор швидкості частинок повітряного потоку, що оточує модель складної конфігурації в аеродинамічній трубі, у зв'язку із специфікою роботи такої труби доцільно використовувати *диференціальну схему* з розсіянням назад (рис. 5.2).

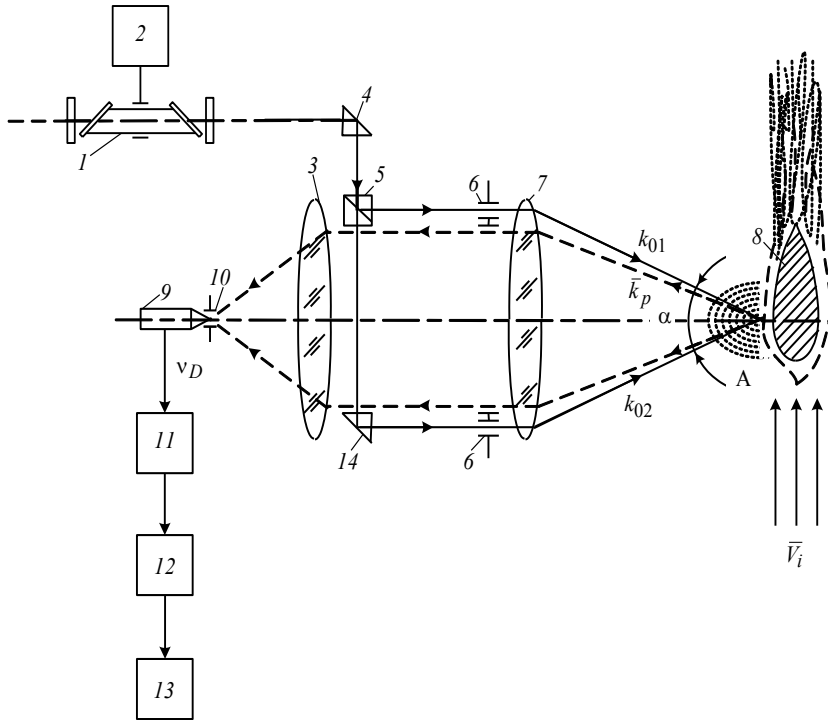


Рисунок 5.2 – Диференціальна схема ЛДВШ з розсіянням назад

Згідно зі схемою промінь газового лазера 1 типу ЛГ-106М за допомогою набору призм 4, 5, 14 ділиться на два паралельних промені, які, пройшовши через діафрагми 6, фокусуються об'єктивом 7 в аналізованому об'ємі потоку оптично прозорого середовища поблизу моделі 8. Сигнал, що несе інформацію про швидкість потоку, визначається гетеродинуванням випромінювань, збуджених загальним центром розсіювання і утвореними двома накладеними розсіяними випромінюваннями приблизно однакової інтенсивності. В області перетину двох випромінювань утворюється інтерференційна картина з чергуванням максимумів і мінімумів інтенсивності через період:

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2 n \sin \alpha / 2}.$$

Це так зване співвідношення Брегга. Зображення інтерференційної картини далі фокусується об'єктивами 7 і 3 на фотоприймачі 9 в напрямі $\overline{k_P}$. Допплерівське зрушення частоти від опромінюючої хвилі світла, що описується вектором $\overline{k_{01}}$ в напрямі $\overline{k_P}$, матиме величину:

$$v_{D1} = \overline{v}(\overline{k_P} - \overline{k_{01}}) / 2\pi,$$

а від $\overline{k_{02}}$ в тому ж напрямі величину:

$$\overline{k_P} : v_{D2} = \overline{v}(\overline{k_P} - \overline{k_{02}}) / 2\pi.$$

Оскільки обидва розсіяні випромінювання породжуються загальним джерелом розсіяння, вони майже суміщені за єдиним напрямом. Тому наведений ними струм фотоприймача має доплерівську частоту:

$$v_D = \frac{\overline{v}}{\Lambda} = \frac{2n}{\lambda_0} \overline{v} \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Остаточно при $n = 1$ маємо:

$$\overline{v} = v \overline{e_v} = \frac{v_D \lambda_0 \overline{e_v}}{2 \sin \alpha / 2},$$

де α – кут між хвильовими векторами $\overline{k_{01}}$ і $\overline{k_{02}}$; $\overline{e_v}$ – одиничний вектор швидкості.

Величина доплерівського зрушення частот не залежить від напрямку спостереження $\overline{k_P}$, оскільки при його зміні кожна окрема частота v_{D1} і v_{D2} збільшується або зменшується на однакову величину і різницева частота $v_D = v_{D1} - v_{D2}$ залишається постійною.

Тому розглянута схема з розсіянням назад найбільш придатна для проведення вимірювань швидкості потоку. Випробування ЛДВШ, зібраного за диференціальною схемою з використанням розсіяного назад випромінювання, виявили деякі особливості юстирування оптичного блока з довгим фокусом.

Виявилось, що при жорсткому кріпленні розділових призм спостерігається просторовий зсув осей однієї призми відносно другої і головної оптичної осі; різко погіршується якість зображення; мають місце розмиви зобра-

ження у фокальній площині об'єктива; з'являються відблиски, відбиті від елементів конструкції; зменшується інтенсивність розсіяного світла.

Вказані особливості визначили такі вимоги до конструкції оптичного блока ЛДВШ: діапазон юстирувальних переміщень розділових призм повинен забезпечувати оптимальну якість фокусування об'єктива; необхідне роздільне юстирування кожної призми; повинні бути вжиті конструктивні заходи, що знімають відблиски розсіяного світла і що забезпечують сумісну зборку і центрування декількох оптичних елементів в єдиному корпусі приладу.

5.2. ЛАЗЕРНІ ДАЛЕКОМІРИ

Серед численних галузей застосування оптичних квантових генераторів перспективним є створення лазерних систем вимірювання дальності і кутових координат різних рухомих об'єктів (лідарів) [1, 14].

З розвитком нових, високоінтенсивних джерел випромінювання, зокрема, імпульсних твердотільних лазерів, лазерні далекоміри набули значного поширення. Вони використовуються у бортових системах керування літальними апаратами, в метеорології і геодезії, застосовуються для картографування Місяця і т.ін.

Вузька спрямованість і висока монохроматичність лазерного випромінювання дозволяє створювати спектральну і просторову густину енергії, порівнянну з аналогічною характеристикою радіолокаторів НВЧ діапазону довжин хвиль.

Системи лазерної локації мають переваги порівняно з радіолокаторами: більшу точність вимірювання доплерівського зрушення частот, кращий дозвіл, більшу точність визначення координат спостережуваного об'єкта. Лазерні далекоміри мають функціональну схему, аналогічну схемі радіолокатора. Відмінність полягає в основному в електронних схемах прийому та обробки оптичного сигналу і характеристиках випромінювача й антен (рис. 5.3).

Доречно відзначити, що задовго до появи радіолокаторів і лазерів академіком О.О. Лебедєвим (1936 р.), основоположником оптичної локації і світлодалекометрії, був запропонований і практично реалізований метод вимірювання дальності з реєстрацією імпульсів світла, віддзеркалених від об'єкта.

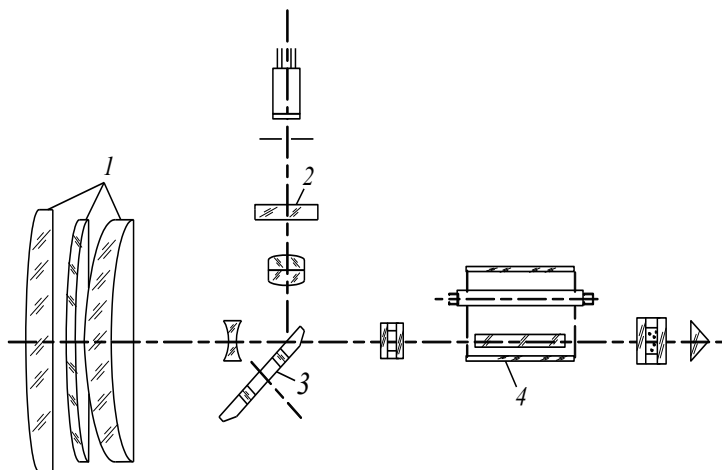


Рисунок 5.3 – Типова оптична схема лазерного далекоміра:
 1 – об'єktiv приймача-передавача; 2 – об'єktiv фотоприймача;
 3 – комутатор; 4 – лазер-випромінювач

Існує декілька основних методів вимірювання дальності до нерухомих і рухомих об'єктів. **Перший** з них – імпульсний метод. Він оснований на вимірюванні проміжку часу, необхідного для проходження імпульсу випромінювання до об'єкта і назад за кількістю імпульсів n_i , що калібруються:

$$\tau_{3H} = n_i \cdot T = 2 \cdot D / c ,$$

де T – період калібрувального імпульсу; D – відстань до об'єкта; c – швидкість світла.

Похибка вимірювання дальності в цьому випадку приблизно можна оцінити похибкою вимірювання часу $\Delta\tau_{3H}$:

$$\Delta D = \left(D \frac{\Delta c}{c} + \frac{1}{2} c \Delta\tau \right) \approx \frac{1}{2} c \Delta\tau_{3H} .$$

Другий метод – метод внутрішньобазового вимірювання дальності – оснований на визначенні кута ψ між напрямками зондуючого і віддзеркаленого випромінювання за наявності жорсткої бази:

$$D = B \cdot ctg\psi \approx B \cdot \psi .$$

Інтерференційний метод вимірювання дальності є **третім** методом. Він базується на створенні інтерференційної схеми, в якій вимірювана відстань визначається різницею ходу двох змішуваних променів:

$$D = \frac{N \lambda_0}{2 n_a},$$

де N – порядок інтерференції; n_a – показник заломлення атмосфери.

Останні два методи на сьогодні застосовуються порівняно рідко через флуктуацію випромінювання, що поширюється в атмосфері.

Нарешті, **четвертим** є фазовий метод вимірювання дальності, оснований на реєстрації запізнювання фази модульованого сигналу при подвійному проходженні вимірюваної відстані:

$$D = \frac{c}{2f_M}(M + \varphi/2\pi),$$

де f_M – частота модуляції; M – ціле число повних фазових циклів.

Дальність до об'єкта у цьому випадку є функцією різниці фаз і частоти модуляції випромінювання, де M – ціле число повних фазових циклів у загальному зрушенні фаз φ (або ціле число довжин хвиль $\lambda_0 = c/f_M$, що укладаються на відстані $2D$); $\varphi/2\pi$ – дробова частина фазового циклу $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. Для визначення числа M вимірювання D проводять на декількох частотах.

5.3. ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРІВ У ФІЗИЦІ І ХІМІЇ

Винахід і подальші розробки лазерів спиралися на фундаментальні дослідження у галузі фізики і (меншою мірою) хімії. Природно, що необхідно розглянути застосування лазерів у фізиці і хімії [4, 5, 14].

У фізиці використання лазерів, з одного боку, привело до відкриття абсолютно нових галузей дослідження, а з іншого – значно сприяло розвитку деяких галузей, що вже існують. Потрібно також визнати, що вивчення властивостей лазера і взаємодії лазерного випромінювання з речовиною є напрямом дослідження у фізиці, що розвивається.

Особливо цікавим прикладом нової галузі дослідження є **нелінійна оптика**. Висока інтенсивність лазерного пучка дозволяє спостерігати явища, обумовлені нелінійним відкликом середовища. Відзначимо, зокрема, такі процеси, як генерація гармонік і вимушене розсіяння.

Генерація гармонік полягає в тому, що відповідні речовини при падінні на них лазерного пучка з частотою ν можуть випромінювати новий когерент-

ний пучок з частотою 2ν (друга гармоніка), 3ν (третя гармоніка) і т.д.

Процес вимушеного розсіяння характеризується тим, що падаючий лазерний пучок з частотою ν , взаємодіючи з наявним в середовищі збудженням з частотою ν_q (наприклад, з акустичною хвилею), приводить до виникнення когерентного випромінювання з частотою $\nu - \nu_q$ (стоксове розсіяння). Різниця енергій падаючого фотона $h\nu$ і фотона, що випромінюється $h(\nu - \nu_q)$, передається тому ж збудженню в середовищі.

Особливо важливими прикладами вимушеного розсіяння є вимушене комбінаційне розсіяння (у випадку, що найчастіше зустрічається, воно пов'язане із збудженням, відповідним власним коливанням окремої молекули речовини) і вимушене розсіяння Манделштама – Бріллюєна (тут квантами збудження речовини є акустичні звукові хвилі). Обидва процеси – генерація гармонік і вимушене розсіяння – можуть мати високу ефективність перетворення (десятки процентів). Тому на практиці для отримання інтенсивних когерентних пучків з частотами, відмінними від частоти падаючого пучка, застосовують і генерацію гармонік, і вимушене розсіяння (зокрема, комбінаційне розсіяння, оскільки воно дозволяє отримати велике зрушення частоти).

У фізиці і хімії важливе значення мають вимірювання характеристик різних середовищ після того, як вони піддалися дії коротких світлових імпульсів. Ці вимірювання вимагають великого дозволу в часі. Застосування лазерів істотно збільшує можливості таких вимірювань.

Дійсно, якщо звичайні джерела світла дозволяють отримувати імпульси тривалістю до 0,1 нс, то сучасні лазери можуть випромінювати імпульси тривалістю до 0,1 пс. Завдяки використанню таких імпульсів можна виконувати вимірювання процесів, що швидко проходять, з високим дозволом у часі, що приводить до нових можливостей для дослідження широкого кола явищ. Оскільки у фізиці, хімії і біології багато важливих процесів протікають в пікосекундному діапазоні, то застосування лазерів приводить до нових досягнень.

Існує ще одна галузь досліджень, яка завдяки застосуванню лазера не тільки розширила свої колишні можливості, але й отримала абсолютно нові ідеї. Це є *спектроскопія*. Для деяких лазерів вдається звузити смугу генерації до десятків кілогерц (у видимому та ІЧ-діапазонах спектра), що дозволяє проводити спектроскопічні вимірювання з роздільною здатністю, яка на багато

порядків (від 3 до 6) перевищує дозвіл, що досягається за допомогою звичайних спектроскопічних методів.

Поява лазерів привела також до розвитку нового напрямку, а саме *нелінійної спектроскопії*, в якій дозвіл спектральних ліній може стати набагато більшим за межу, обумовлену ефектами, пов'язаними з доплерівським розширенням. Це відкрило шлях новому і детальнішому вивченню структури речовини.

У *хімії* лазери застосовуються як в цілях діагностики, так і для отримання незворотних хімічних змін (лазерна фотохімія). Що стосується методів діагностики, то необхідно особливо згадати резонансне комбінаційне розсіювання і когерентне антистоксове комбінаційне розсіювання. Ці методи дають важливу інформацію про структуру і властивості багатоатомних молекул (наприклад, значення частоти активних романівських коливань, обертальних констант, постійної ангармонічності). Когерентне антистоксове комбінаційне розсіювання можна використовувати також для вимірювання концентрації (і температури) різних молекулярних з'єднань в деякому обмеженому об'ємі простору. Це знаходить своє застосування при глибокому дослідженні плазми та електричного розряду – процесів згоряння в полум'ї.

Мабуть, найцікавішим (або принаймні, що обіцяє стати таким) хімічним застосуванням лазера є *фотохімія*. Проте необхідно мати на увазі, що через високу вартість лазерних фотонів промислове використання лазерної фотохімії буде виправдано лише при дуже високій ціні кінцевого продукту.

Таким випадком є *розділення ізотопів* (зокрема, урану і дейтерію). Основна ідея тут полягає в тому, щоб лазерний пучок вибірково зрушував тільки ті ізотопи, які необхідно виділити. Ці ізотопи, що знаходяться у збудженому стані, неважко відрізнити і, отже, відокремити (можливо, хімічними методами) від небажаних з'єднань, що залишилися в незбудженому стані.

Наприклад, у разі використання урану застосовуються такі два методи.

1. Фотоіонізація частинок (^{235}U), які необхідно виділити, світлом відповідної довжини хвилі після того, як ці частинки були випромінювально переведені в деякий збуджений стан. Іонізовані таким чином ізотопи збирають разом, прикладаючи необхідну постійну напругу. У цьому методі сировина береться у вигляді атомарного газу.

2. Вибіркова дисоціація молекулярної сполуки урану (наприклад, гексафториду урану). При цьому молекулярне з'єднання вибірково переводять в коливальний збуджений стан тільки одного ізотопного складу (в цьому випадку $^{235}\text{UF}_6$), а потім за допомогою подальшого оптичного накачування добиваються його дисоціації. У цьому випадку гексафторид урану використовується у вигляді молекулярного струменя при низькій температурі.

Здійснення *термоядерного синтезу* і використання його в мирних цілях дозволять людству отримати необмежене джерело енергії. Головна проблема при виробництві енергії шляхом термоядерного синтезу полягає в тому, щоб отримати і потім утримати плазму, що складається з важких ізотопів водню (дейтерій D і тритій T). Для того щоб могла йти сильно екзотермічна реакція синтезу ($D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$, де n – нейтрон), плазма повинна мати достатньо високу температуру ($T = 10^8$ К). Існують два принципові підходи до рішення задачі отримання й утримання плазми.

По-перше, це добре відоме магнітне утримання, коли плазма малої щільності утримується більш-менш тривалий час усередині спеціальної «магнітної пляшки» (токамак).

По-друге, можна здійснити інерційне утримання плазми. В останньому методі, який з'явився пізніше, дейтерій-тритієва плазма миттєво нагрівається й утримується власною інерцією. Це означає, що протягом короткого часу, до того як відбудеться гідродинамічне розлітання плазми, в результаті достатньої інтенсивної термоядерної реакції повинна вивільнитися велика кількість енергії (вибухова реакція).

Припускають, що лазери дозволяють здійснити інерційне утримання плазми, оскільки лазерне випромінювання може забезпечити швидке розігрівання плазми [5, 14]. Рідинний дейтерій і тритій містяться в мікросферах розміром один міліметр в діаметрі та опромінюються лазером, що має достатньо високу енергію й імпульс, щоб ініціювати протікання ($D + T$) – реакції (мікробибух).

Як показали складні обчислення, для ефективного виробництва термоядерної енергії потрібний не тільки нагрів такої мікросфери до дуже високої температури, але і стиснення плазми, що утворюється в ній, до густини, яка приблизно в 10^4 раз більше, ніж густина початкової рідини. Для цього потрібно щоб нагрівання мікросфери з паливом було сферично симетричним, а ла-

зерне випромінювання мало спеціальний розподіл в часі. Під дією випромінювання в мікросфері відбуваються такі явища.

Спочатку під дією попереднього імпульсу внаслідок випаровування зовнішнього шару мікросфери навколо її поверхні утворюється хмара розрідженої плазми. Ця хмара потім опромінюється більш-менш симетрично іншим потужнішим імпульсом. Подальше поглинання енергії зовнішньою зоною мікросфери приводить до сильного розлітання речовини за рахунок випаровування її з поверхні, що проводить сильне стиснення мікросфери. У момент максимального стиснення повинен прийти найбільш інтенсивний імпульс, щоб провести власне реакцію синтезу.

У своїй простішій формі лазерний термоядерний реактор повинен складатися з камери згоряння, в центр якої інжектуються мікросфери з швидкістю декілька штук у секунду. Кожна з мікросфер опромінюється лазерним імпульсом високої енергії, що приводить до мікрровибуху з виділенням енергії. Під час реакції синтезу енергія вивільняється у формі кінетичної енергії нейтронів (близько 14 MeV), заряджених частинок та електромагнітного випромінювання.

Щоб отримати електричну енергію, навколо камери згоряння повинна бути поміщена оболонка (бланкет) з рідкого літію, яка поглинатиме енергію термоядерної реакції. Літій циркулює уздовж теплообмінників, які виробляють пару, використовувану надалі стандартним чином.

Лазер, за допомогою якого можна здійснити описаний вище мікрровибух, повинен мати довжину хвилі десь між 250 і 2000 нм, енергію імпульсу $1 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^6$ Дж, тривалість імпульсу $5 \cdot 10^{-9} - 10 \cdot 10^{-9}$ с і, отже, пікову потужність більше 200 ТВт. Він повинен генерувати з частотою повторення імпульсів, рівною декільком герцам, і, отже, повинен забезпечувати середню потужність ~ 10 МВт. Лазер також повинен мати ККД близько 1 % і потребувати для живлення не менше 1 ГВт електричної потужності.

Незважаючи на величезні технічні й інженерні труднощі, пов'язані з розв'язанням такої задачі, проекти створення великих лазерних установок для термоядерного синтезу розвиваються у декількох країнах, але найактивніше в США і Російській Федерації.

Всі ці лазери працюють за схемою підсилювача потужності задавального генератора (МОРА, від англ. Master oscillator power amplifier). Лазерний

імпульс формується генератором малої потужності, який дозволяє з достатнім ступенем точності керувати просторовими і часовими параметрами імпульсу. Це випромінювання за допомогою дільників розщеплюється на декілька пучків, кожний з яких посилюється. Посилені пучки прямують потім по радіально-симетричних шляхах на мішень.

У США є лазерні установки, що дають імпульси з енергією близько 20 кДж і піковою потужністю 20-50 ТВт. Це системи, що використовують CO₂ лазери і лазери на неодимовому склі, з шістьма пучками у випадку CO₂ лазера (системи «Геліос») і з двадцятьма пучками у випадку лазера на неодимовому склі (система «Аргус»).

Будуються системи, що дають на порядок більші енергію і потужність (система «Нова» з підсилювачами на неодимовому склі і система «Антарес» з підсилювачами на CO₂). У Росії створена установка з 256 пучками, що використовує лазер на неодимовому склі (лазерна установка «Дельфин»).

Деякі з цих лазерів вже використовувалися для ініціації термоядерних реакцій з декількома типами мішеней. Було зареєстровано велику кількість нейтронів, що вказує на виникнення термоядерної реакції. Спостерігалось також стиснення мішені. Проте отримувані результати ще далекі від того, щоб термоядерна енергія була рівна енергії, що підводиться до лазера. Природно, існують й інші галузі застосування лазерів і лазерної техніки в науці. Це біологія і теоретична медицина, оптична обробка і запис інформації, пам'ять великого обсягу і багато що інше.

5.4. ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРІВ ДЛЯ ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Можливість використання лазерного променя для зв'язку через атмосферу викликала спочатку дуже великий ентузіазм, оскільки лазери в принципі мають дві важливі переваги. По-перше, це широка смуга частот, а кількість інформації, що передається цією несучою хвилею, пропорційна ширині її смуги частот [5, 7, 8, 14].

При переході від мікрохвильового до оптичного діапазону збільшується частота несучої хвилі приблизно в 10⁴ разів, що дозволяє використовувати значно ширшу смугу частот.

По-друге, це мала довжина хвилі випромінювання. Оскільки довжина хвиль лазерного випромінювання приблизно в 10^4 разів менша довжин хвиль, типових для мікрохвильової техніки, можна сказати, що при одному і тому ж діаметрі пучка розбіжність світлового випромінювання в 10^4 разів менша мікрохвильового. Для отримання тієї ж розбіжності антена оптичної системи (дзеркало або лінза) може мати набагато менші розміри.

Проте обидві ці переваги зводяться до нуля, оскільки в умовах поганої видимості світло швидко затухає в атмосфері. Тому застосування лазерів у відкритому зв'язку (без використання хвилеводу) обмежилося двома (хоч і дуже важливими) випадками.

Одним з них є здійснення космічного зв'язку між двома супутниками або між супутником і наземною станцією, розташованою в особливо сприятливих кліматичних умовах. У цьому випадку використовується або Nd : YAG-лазер (із швидкістю передачі інформації до 10^9 біт/с), або CO₂-лазер (із швидкістю передачі до $3 \cdot 10^8$ біт/с). Хоча CO₂-лазер має більшу ефективність, він вимагає складнішої детектуючої системи і має той недолік, що довжина хвилі його випромінювання приблизно в 10 разів більша, ніж довжина хвилі Nd : YAG-лазера. Іншим випадком застосування лазера є здійснення зв'язку на малих відстанях, наприклад при передачі інформації усередині будівлі. Тут найбільший інтерес становлять напівпровідникові лазери.

Проте дуже привабливим у галузі оптичного зв'язку на сьогоднішній час використання *оптичних хвилеводів* (волоконної оптики). Явище направленої поширення світла уздовж волокон відоме вже багато років. Проте раніше оптичні хвилеводи використовувалися на дуже коротких відстанях, як правило, в медичних приладах для ендоскопії. В кінці 60-х років минулого століття загасання в кращих оптичних стеклах становило близько 1000 дБ/км. З тих пір завдяки вдосконаленню технології виготовлення оптичних волокон зі скла і кварцу у випадку кварцу вдалося отримати загасання менше ніж 0,2 дБ/км (нижня межа визначається релеевським розсіянням усередині матеріалу волокна).

Таке низьке загасання енергії в оптичних хвилеводах відкриває великі можливості для їх використання у телекомунікації. Типова волоконно-оптична система зв'язку складається з джерела світла, пристрою оптичного узгодження, що направляє світло у волокно, і приймача (фотодіода), що встановлюється на

кінці лінії зв'язку і також узгодженого з оптичним хвилеводом.

Уздовж лінії зв'язку розташовують ретранслятори, причому відстань між ними може становити 2–130 км і більш. Ретранслятор складається з приймача і випромінювача. Як джерела світла використовуються твердотільні або напівпровідникові лазери на подвійній гетероструктурі. На сьогодні час експлуатації цих лазерів доведений до 10^6 годин.

Хоча до цих пір найбільшого поширення набули лазери на GaAs, привабливішим є застосування лазерів на гетеропереходах, в яких активним шаром лазера є складний четверний сплав $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. У цьому випадку p - і n -області переходів складаються з простого бінарного з'єднання InP, і, використовуючи сплав при $y = 2,2x$ можна добитися того, що решітка четверного сплаву буде узгоджена з InP. Вибираючи відповідним чином величину x , можна отримати довжину хвилі випромінювання, рівну або 1,3 або близько 1,6 мкм відповідно до двох мінімумів поглинання в кварцовому волокні.

Залежно від діаметра d серцевини оптичний хвилевод може бути як одномодовим ($d = 1$ мкм), так і багатомодовим ($d = 50$ мкм). У лініях зв'язку, експлуатованих у теперішній час, швидкість передачі інформації в яких досягає 50 Мбіт/с, застосовують, як правило, багатомодові оптичні хвилеводи. У системах, призначених для роботи з більшими швидкостями передачі, мабуть, краще підходять одномодові оптичні хвилеводи.

Приймачем зазвичай є лавинний фотодіод, хоча можливе також і використання p - i - n – діода з відповідною підсилювальною мікросхемою. Застосування оптичних хвилеводів у зв'язку не обмежується дорогими системами телекомунікації. Для передачі інформації на коротші відстані, наприклад, усередині будівлі, на борту літака або корабля, використовуються некогерентні світлодіоди, узгоджені з багатомодовим оптичним хвилеводом.

5.5. ЛАЗЕРИ В ПРОЦЕСАХ ВИМІРЮВАНЬ І КОНТРОЛЮ

Такі властивості лазерів, як спрямованість, яскравість і монохроматичність, зробили їх корисними для безлічі методів вимірювання і контролю в промисловості при керуванні верстатами і в будівництві [5, 14]. Крім цих питань, розглянемо також застосування лазерів у геодезичних вимірюваннях і

для контролю за чистотою навколишнього середовища.

У промисловості лазери знайшли найбільше застосування для **юстирування і вирівнювання конструкцій**.

Висока спрямованість випромінювання лазерів дозволяє використовувати їх як ідеальний інструмент для створення прямої еталонної лінії при установці і вирівнюванні деталей в літакобудуванні і в будівництві, наприклад, при зведенні будівель, мостів або тунелів. Тут лазер у багатьох випадках замінив оптичні інструменти, що застосовувалися раніше, такі, як коліматори або телескопи. Для цих цілей зазвичай застосовують He-Ne лазер малої потужності (1-5 МВт) з випромінюванням у видимому діапазоні. У багатьох випадках юстирування і вирівнювання проводять за допомогою напівпровідникових датчиків, виконаних у вигляді квадрантів.

Коли лазерний пучок (заштрихована зона на рис. 5.4) виявляється ідеально зцентрованим, фотоструми від чотирьох датчиків *A*, *B*, *C* і *D* співпадають.

Положення лазерного пучка на приймачі визначається значенням фотоструму, вимірним від кожного квадранта. При цьому установка і вирівнювання зводяться до простих електричних вимірювань, що дозволяє уникнути суб'єктивної оцінки оператора (що часто було причиною помилок при використанні колишніх оптичних систем). Точність установки, що досягається на практиці, у виробничих умовах коливається приблизно від 5 мкм (на відстані близько 5 м) до 25 мкм (на відстані близько 15 м).

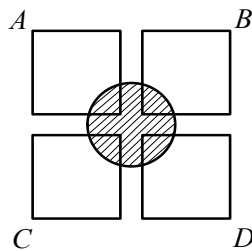


Рисунок 5.4 – Використання квадрантного детектора для юстирування

Лазери також використовують для **вимірювання відстаней** (див. також розділ 5.2). При цьому залежно від того, які доводиться вимірювати відстані, застосовуються різні методи. Короткі відстані (до 50 м) зазвичай вимірюють за допомогою інтерферометричних методів, використовуючи як джерело сві-

тла стабілізований за частотою He-Ne лазер. Середні відстані (до 1 км) вимірюють за допомогою телеметричних методів, використовуючи модульоване за амплітудою випромінювання He-Ne або GaAs-лазерів. Ще більші відстані визначають, вимірюючи час прольоту віддзеркаленого об'єктом короткого (можливо, декілька десятків наносекунд) світлового імпульсу від Nd:YAG- або CO₂-лазера.

Інтерферометричні методи вимірювання відстаней зазвичай основані на використанні інтерферометра Майкельсона. За допомогою дільника лазерний пучок розщеплюється на вимірювальний та опорний пучки. Опорний пучок віддзеркалюється нерухомим дзеркалом, тоді як вимірювальний – дзеркалом, прикріпленим до об'єкта, відстань до якого потрібно зміряти.

Обидва відбиті пучки потім знову з'єднуються, інтерферують, і їх результуюча амплітуда вимірюється детектором. Якщо об'єкт зрушується уздовж напрямку лазерного пучка на відстань $\lambda/2$, де λ – довжина хвилі лазера, то інтерференційний сигнал проходить від максимуму через мінімум знову до максимуму.

Отже, використовуючи відповідний електронний пристрій, що відлічує інтерференційні смуги, можна отримувати дані про зсув об'єкта. Цей метод вимірювання, зазвичай застосовуваний у цехах прецизійної обробки деталей, дозволяє вимірювати відстані з відносною похибкою, рівною одній мільйонній.

Необхідно відзначити, що за допомогою такого методу відстань можна зміряти лише відносно деякого початкового положення. Перевага інтерферометричного методу полягає в тому, що він дозволяє отримувати результати швидко, з високим ступенем точності і його легко сумістити з автоматичними системами керування.

Телеметричний метод з амплітудною модуляцією застосовується для вимірювання великих відстаней. У цьому випадку лазерний пучок He-Ne- або GaAs-лазера модулюється за амплітудою і відстань визначається за різницею фаз між випущеним і віддзеркаленим лазерними пучками. Відносна похибка тут також складає одну мільйонну (1 мм на 1 км відстані). Цей метод знаходить застосування у геодезії і картографії. Відстані більше одного кілометра визначаються за часом прольоту короткого лазерного імпульсу (10–50 нс), що випромінюється рубіновим або Nd : YAG-лазером в режимі модуляції добро-

тності або TEA-CO₂ лазером. Ці вимірювання становлять інтерес головним чином для військової техніки (лазерний далекомір). Серед невійськового застосування потрібно відзначити вимірювання відстані від Землі до Місяця (з точністю близько 20 см) і локацію супутників.

Інша сфера, в якій знайшли застосування такі властивості лазерів, як спрямованість і монохроматичність, – це *вимірювання концентрації різних забруднень* в атмосфері.

Традиційний спосіб вимагає взяття проби (що не завжди просто здійснити) і проведення відповідного хімічного аналізу. Такий спосіб не дозволяє швидко отримати необхідні дані і важко піддається автоматизації.

У лазерному методі досліджувана ділянка атмосфери опромінюється відповідним лазерним пучком, а світло, розсіяне цією ділянкою атмосфери, збирається телескопом і піддається аналізу.

Відповідна система отримала назву «Оптичний радар» або «Лідар» (від англ. Light detection and ranging). При взаємодії лазерного випромінювання з атмосферним забрудненням відбувається декілька явищ, а саме – пружне розсіяння, комбінаційне розсіяння, флуоресценція і поглинання. Кожне з цих явищ використовується для виявлення і вимірювання концентрації великої кількості різних атмосферних забруднювачів (SO₂, NO₂, NO і т. ін.). Для цих цілей застосовуються як рубіновий лазер, так і Nd : YAG-лазер з подвоювачем частоти, лазери на барвниках і різні лазери, що генерують в середній ІЧ-зоні (HF, DF, CO₂).

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Поясніть призначення лазерних вимірників швидкості.
2. Назвіть традиційні способи вимірювання швидкості і їх основні недоліки.
3. В якій галузі науки і техніки використовують лазерні доплерівські вимірники швидкості ЛДВШ?
4. Поясніть суть ефекту Доплера.
5. Поясніть дію установки ЛДВШ за схемою з опорним променем.
6. Назвіть динамічний діапазон швидкостей, вимірюваних за допомогою ЛДВШ.

7. Поясніть дію установки ЛДВШ за диференціальною схемою з розсі-
янням назад.
8. Поясніть переваги і недоліки кожного з розглянутих методів вимірю-
вання швидкостей.
9. Які властивості повинні мати середовища при використанні в них
ЛДВШ?
10. Які існують вимоги до конструкції оптичного блока ЛДВШ?
11. Назвіть галузі застосування лазерних далекомірів.
12. Охарактеризуйте і поясніть типову оптичну схему лазерного дале-
коміра.
13. Охарактеризуйте способи вимірювання відстані до об'єктів.
14. Поясніть суть імпульсного методу визначення відстаней.
15. Яким чином застосовуються лазери в нелінійній оптиці?
16. Поясніть призначення лазерів у спектроскопії.
17. Поясніть застосування лазерів у сучасній хімії.
18. В чому особливості застосування лазерів для оптичного зв'язку?
19. Що таке «оптичні хвилеводи»?
20. Які лазери застосовуються для оптичного зв'язку?
21. У чому полягають особливості застосування лазерів у процесах ви-
мірювання і контролю?
22. Що таке лазерне юстирування і вирівнювання конструкцій?
23. У чому полягає суть застосування квадрантного детектора для юс-
тирування?
24. Як використовують лазери для вимірювань малих відстаней?
25. Як вимірюють концентрації різного забруднення в атмосфері?
26. У чому суть термоядерного синтезу?
27. Які існують способи отримання та утримання плазми?
28. Поясніть призначення лазера в термоядерному синтезі.

6. ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРІВ У ТЕХНІЦІ

6.1. ОПТИЧНА ГОЛОГРАФІЯ

Голографія – це метод отримання зображення об'єктів, оснований на реєстрації інтерференційної картини, що утворюється в результаті суперпозиції предметної та опорної хвилі на світлочутливому матеріалі. Отримана інтерферограма називається *голограмою*. На ній відсутні елементи, що хоч би віддалено нагадують оригінал, проте записана повна інформація одночасно про амплітуду і фазу хвиль, розсіяних об'єктом [1, 14].

Дифракція опорного випромінювання на голограмі приводить до відновлення предметної хвилі, тобто зображення об'єкта.

У наявності інформації про фазу та амплітуду полягає принципова відмінність голографії від методу фотографії, де реєструється інформація тільки про амплітуду.

Метод голографії був вперше запропонований англійським фізиком Д. Габором. У 1948 році Д. Габор, займаючись поліпшенням якості зображення в електронних мікроскопах, відкрив новий метод відновлення амплітуди і фази світлових хвиль. Він запропонував реєструвати голограму за допомогою електронного пучка, а для отримання зображення освітлювати її пучком видимого світла.

Незважаючи на значні зусилля, очікувана якість зображення з дозволом близько 1 ангстрема так і не була досягнута. Коли Габор проводив свої перші експерименти, джерела світла не задовольняли умовам когерентності, і якісні голограми отримати не вдалося.

Друге народження голографії відноситься до 1962–1963 років, коли Ю. Денисюк, Е. Лейт, Ю. Упатнієкс застосували для неї лазери і методи лазерної техніки. Лазери поставили голографію на міцний практичний фундамент.

Принцип голографії можна сформулювати таким чином. Це двоетапний (іноді безлінзовий) процес отримання об'ємного зображення об'єкта.

На *першому етапі* повна інформація, пов'язана з фазою та амплітудою світлових хвиль, розсіяних об'єктом, записується на голограмі інтерференційною картиною, що виникає як результат взаємодії опорної і

предметної хвиль.

На *другому етапі* для відновлення зображення об'єкта голограму освітлюють опорним пучком світла. Унаслідок дифракції випромінювання на голограмі утворюється об'ємне зображення об'єкта. Отримання голограми обов'язково вимагає когерентності випромінювання, що в оптичному діапазоні довжин хвиль забезпечується застосуванням бажано одномодових лазерів.

Спробуємо подати математичну модель процесу голографії і просту модель голограми. Допустимо, що на світлочутливий шар фотопластики падають дві хвилі: опорна \bar{E}_O і предметна \bar{E}_Π . Комплексні амплітуди цих хвиль в площині голограми запишуться таким чином:

$$\begin{aligned}\bar{E}_O &= A_O(x, y)e^{j\varphi_O(x, y)}, \\ \bar{E}_\Pi &= A_\Pi(x, y)e^{j\varphi_\Pi(x, y)}.\end{aligned}\quad (6.1)$$

Сумарна комплексна амплітуда поля випромінювання в площині голограми:

$$\bar{E}_O + \bar{E}_\Pi = A_O(x, y)e^{j\varphi_O(x, y)} + A_\Pi(x, y)e^{j\varphi_\Pi(x, y)}.$$

Як відомо, розподіл освітленості ε інтерференційної картини пропорційний квадрату модуля комплексної амплітуди:

$$\begin{aligned}\varepsilon(x, y) &= a(E_O + E_\Pi)^2 = a(E_O + E_\Pi)(E_O + E_\Pi)^* = \\ &= a(E_O E_O^* + E_\Pi E_\Pi^* + E_\Pi E_O^* + E_O E_\Pi^*),\end{aligned}$$

де * – за рахунок зовнішньої експозиції.

Або, враховуючи (6.1), отримуємо:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= a\left[A_O^2 + A_\Pi^2 + A_O A_\Pi e^{j(\varphi_\Pi - \varphi_O)} + A_O A_\Pi e^{-j(\varphi_\Pi - \varphi_O)}\right] = \\ &= a\left[A_O^2 + A_\Pi^2 + 2A_O A_\Pi \cos(\varphi_\Pi - \varphi_O)\right].\end{aligned}\quad (6.2)$$

Залежність (6.2) є рівнянням голограми. Мінімальна і максимальна освітленість інтерферограми визначаються відповідно до умов:

$$(\varphi_\Pi - \varphi_O) = 2\pi; \quad \varphi_\Pi = \varphi_O;$$

$$\varepsilon_{\min} \sim a(A_O - A_\Pi)^2;$$

$$\varepsilon_{\max} \sim a(A_O + A_\Pi)^2,$$

де a – коефіцієнт пропорційності.

Контрастні ділянки голограми порівняно просто визначити, якщо відомі ε_{\min} і ε_{\max} :

$$k = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}} = \frac{2A_0 A_{\Pi}}{A_0^2 + A_{\Pi}^2}.$$

Відстань між інтерференційними смугами (період) у випадку запису простої голограми – дифракційних решіток з світлими і темними смугами, що рівномірно чергуються, отриманих при реєстрації двох плоских хвиль, визначається:

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2 \sin \Theta},$$

де Θ – кут між опорним і предметним променями.

Величина експозиції $H_0 = \varepsilon t_E$ (взаємодія випромінювання, що проникає ззовні, з фоточутливим матеріалом називається зовнішньою експозицією, внутрішня експозиція визначається розсіянням випромінювання у фотоемульсії) визначається як:

$$\begin{aligned} H_0 &= a [A_0^2 + A_{\Pi}^2 + 2A_0 A_{\Pi} \cos(\varphi_{\Pi} - \varphi_0)] \cdot t_E = \\ &= a t_E (A_0^2 + A_{\Pi}^2) \cdot [1 + k \cos(\varphi_{\Pi} - \varphi_0)], \end{aligned}$$

де t_E – час експонування.

При відновленні зображення об'єкта коефіцієнт пропускання проявленої голограми є лінійною функцією експозиції $\tau = \tau_0 + \tau_1 \varepsilon t_E$. Це буде справедливо, якщо використовувати лінійну ділянку характеристики чутливості фотоемульсії пластинки.

Освітлюючи голограму опорною хвилею, отримаємо:

$$\tau \cdot E_0 = [\tau_0 + \tau_1' (A_0^2 + A_{\Pi}^2)] E_0 + \tau_1' A_0^2 E_{\Pi} + \tau_1' E_0^2 E_{\Pi}^* = \omega_0 + \omega_{+1} + \omega_{-1}, \quad (6.3)$$

де $\tau_1' = a \tau_1 t_E$.

Знайдений розподіл поля відповідає таким джерелам випромінювання. Перший доданок $\omega_0 = [\tau_0 + \tau_1' (A_0^2 + A_{\Pi}^2)] E_0$ – це хвиля, яка поширена у напрямі опорної хвилі. Це так звана хвиля нульового порядку, яка проходить через голограму без спотворення ω_0 (рис. 6.1).

Другий доданок $\omega_{+1} = \tau_1' A_0^2 E_{\Pi}$ – це хвиля плюс першого порядку. Вона утворює уявне зображення реєстрованого об'єкта в тому місці, де він знаходився у момент отримання голограми. Спостерігач, що сприймає її, бачитиме об'єкт таким, що висить за голограмою, як у звичайному дзеркалі.

Третій доданок ω_{-1} рівняння (6.3) є хвилею мінус першого порядку. Це

хвиля, зв'язана з початковою предметною хвилею. Вона поширюється під деяким кутом до хвилі, що освітлює голограму, по іншу сторону від хвилі нульового порядку. Ця хвиля утворює дійсне зображення, яке є псевдоскопічним зображенням, тобто таким, що має конфігурацію початкового об'єкта, який «вивернутий навиворіт». Його також можна спостерігати, оскільки воно розташоване перед голограмою.

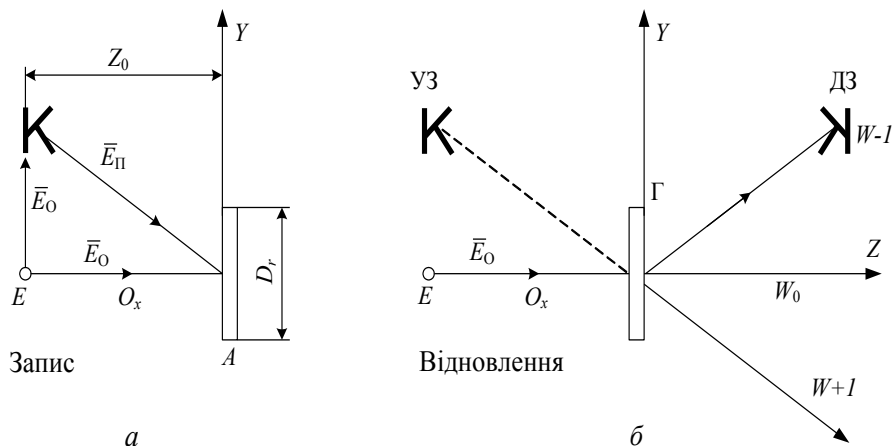


Рисунок 6.1 – Модель двоетапного голографічного процесу: запису голограми (а) і відновлення голограми (б) об'єкта К; E – джерело світла – лазер; E_0 – опорна хвиля; E_{π} – предметна хвиля; УЗ – уявне зображення; ДЗ – дійсне зображення; Г – голограма

Розглянемо основні властивості голограми. Унікальною властивістю є те, що **кожна ділянка голограми містить інформацію про весь об'єкт**. І якщо голограму розбити на декілька ділянок, то кожна з них дозволяє створити повне зображення об'єкта. Правда, при цьому якість зображення погіршується, оскільки відбувається розподіл світлового поля $\vec{E}(x, y)$ на поверхні голограми і змінюється роздільна здатність.

Наступна цікава властивість голограми полягає у можливості **спостереження голограми на різних довжинах хвиль**. Запис голограми відбувається на коротких хвилях (наприклад, на рентгенівських), а відновлення – у видимому діапазоні довжин хвиль, що дуже цінно для мікроскопії, оскільки дає значне збільшення. Але при цьому необхідно пам'ятати, що при відновленні зображення об'єкта можливі спотворення.

Найчудовішою властивістю голограми є **об'ємність зображення об'єкта** – наслідок реєстрації на голограмі просторової структури хвиль з

їх фазами і амплітудами. Причому, фаза кодується відносною густиною, а амплітуда – контрастом інтерференційної картини. Реєстрація фазових співвідношень, що приходять від різних точок об'єкта, дає інформацію про відносні відстані до різних точок об'єкта, чого немає у звичайній фотографії. Це і визначає об'ємність зображення, яке можна спостерігати і навіть фотографувати з різних точок простору. Відзначимо, що на отриманих знімках можна відзначити паралакс і глибину різкості ближнього і дальнього планів – обов'язкові характеристики об'ємності.

Ще одна унікальна властивість голограми полягає в тому, що *на одній фотопластині можна послідовно зафіксувати декілька зображень різних об'єктів* і кожне з них відновлювати без особливих перешкод і незалежно від інших зображень. На цій властивості базується розробка оптичних запам'ятовуючих пристроїв. Якщо практично освоїти цю властивість, то це дозволить створити голографічний кольоровий та об'ємний кінематограф.

Все різноманіття схем запису голограм і відновлення зображень практично можна звести до двох класичних: *осьових схем* реєстрації (голографія Габора – Френеля), які використовують опорний промінь, що пройшов крізь предмет без розсіювання співвісно з розсіяним пучком, і *позаосьових схем* запису з розділенням опорного і предметного пучка. Цей метод і схему запропонували у 1962 році Е. Лейт і Ю. Упатнієкс.

При отриманні осьової голограми лазерне випромінювання розширюють за допомогою об'єктива, що складається з пари лінз Л1, Л2 (рис. 6.2).

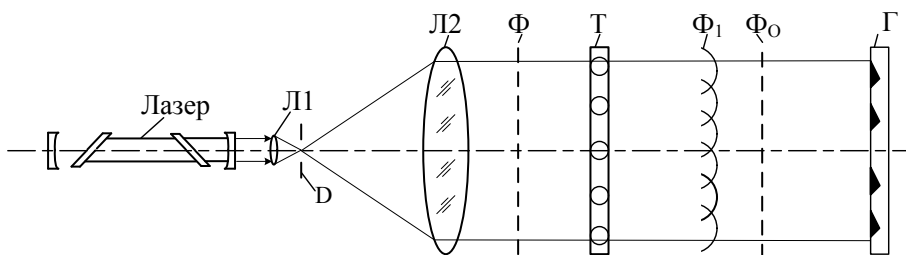


Рисунок 6.2 – Осьова голограма: Л1 і Л2 – лінзи конденсора; D – діафрагма; Т – об'єкт запису; Г – голограма; Ф, Ф₀, Ф₁ – фронти хвиль

Діафрагма D пропускає тільки центральну дифракційну пляму першої лінзи Л1, що дозволяє отримати достатньо плоский фронт хвилі Ф. Ця хвиля освітлює прозорий предмет Т, наприклад, транспарант, який вносить

до хвильового фронту деякі спотворення.

Можна уявити, що хвиля, яка поширюється після предмета, складається з плоскої хвилі Φ_0 – неспотвореної, опорної хвилі, і хвилі спотвореної Φ' , після дифракції на елементах предмета.

Отримана голограма з'явиться результатом інтерференції хвиль Φ_0 і Φ' . Оптичні шляхи опорної і хвиль після дифракції мало відрізняються і різниця їх ходу невелика, що дозволяє застосувати джерело з невеликою часовою когерентністю. Інтенсивність опорного пучка при відновленні, як правило, більше інтенсивності пучка після дифракції. Тому яскравість відновленого зображення невисока. Крім цього, паразитні хвилі не нульових порядків накладаються на опорну хвилю і сильно погіршують якість отриманого зображення.

Відсутність просторового розділення опорного і предметного пучків є основним недоліком цієї схеми.

Позаосьова схема голографії є записом на фотографічному шарі пластинки картини інтерференції предметної хвилі, розсіяної об'єктом, з комплексною амплітудою $A_{\Pi} \exp(j\varphi_{\Pi})$ і когерентної з нею опорної хвилі $A_0 \exp(j\varphi_0)$. Як правило, роблять так, щоб два інтерферовані пучки мали спільне джерело випромінювання. Це досягається просторовим розділенням пучка за допомогою напівпрозорих пластин – світлоділників, призм і дзеркал. Ділення лазерного променя зручно виконувати за допомогою багаточарового діелектричного дзеркала, коефіцієнт віддзеркалення якого можна змінювати в широких межах поворотом дзеркала відносно падаючого променя (рис. 6.3).

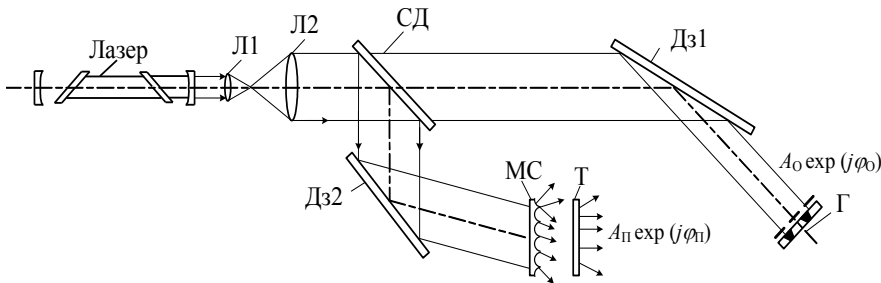


Рисунок 6.3 – Позаосьова голограма: Л1, Л2 – лінзи конденсора; СД – світлоділник; Дз1, Дз2 – дзеркала; МС – матове скло; Т – об'єкт запису (тіло); Г – голограма

Таке розділення повністю усуває взаємні перешкоди між дійсним та уявним зображенням. Хвилі дифрагують під різними кутами, не накладаються одна на одну і не створюють перешкоди спостереженню. Цим позаосьові голограми помітно відрізняються від голограм Габора, в яких повністю розділити дифраговані хвилі майже не вдається.

Наведемо деякі специфічні вимоги до процесу голографії, до джерела випромінювання і фотоматеріалів, виконання яких необхідне для отримання хороших голограм. На якість зображення інтерферограми впливають в основному дві причини: механічна жорсткість елементів голографічної установки і здатність випромінювання створювати стабільну та контрастну інтерференційну картину. Випромінювання, що здатне це зробити, повинно бути когерентним в часі і в просторі.

Залежно від властивостей фотографічного шару пластинки якість інтерференційної картини і, отже, якість відновленого зображення буде різною. Тому характеристики фотоматеріалів мають також важливе значення в голографії.

Основною характеристикою фотоматеріалів є частотно-контрастна, яка однозначно визначає роздільну здатність фотоматеріалу, тобто кількість інтерференційних ліній, записаних на одиниці довжини пластинки. Роздільна здатність фотоемульсії в голографії повинна бути значно більшою, ніж у фотографії, де задовольняються часто величиною 60 ліній/мм. Найбільш поширеними фотоматеріалами для голографії були «Микрат» і «469 F Кодак» з роздільною здатністю 1500–2000 ліній/мм. Фотоемульсії повинні мати дрібнозернисту структуру і бути однорідними. Зернистість фотоемульсії істотно впливає на якість зображення, створюючи шкідливий фон у результаті розсіяння опорної хвилі світла на проявлених зернах.

Іншою важливою характеристикою емульсії є чутливість ε_T . Як правило, підвищення роздільної здатності фотографічного шару супроводжується падінням його чутливості. Для вказаних вище фотоемульсій і He-Ne лазера чутливість становить 10^{-4} – 10^{-6} Дж/см².

У теперешній час ведуться інтенсивні дослідження і пошуки реверсивних фотоматеріалів, що допускають перезапис інформації. До таких матеріалів належать магнітні плівки, сегнетоелектричні і електрооптичні кристали, фотонапівпровідники, термопластичні плівки і т.ін.

Інший приклад нових матеріалів для запису голограм – термопластичні носії – плівки (ТПН). На ТПН записуються також фазові голограми, які

можна відновлювати як на просвіт, так і на віддзеркалення. Чутливість ТПН значно вища за чутливість кристалів, а роздільна здатність досягає 1000 штрихів/мм і більше. Термопластичний шар при нагріванні до температури 100–105 °С розм'якшується і деформується, повторюючи розподіл заряду на його поверхні. Ця властивість ТПН використовується таким чином.

Структура плівки містить термопластичні смоли, фотоприймальний і прозорий провідний шар окислу олова на лавсановій або скляній основі. Провідний шар створює електричний контакт з фотонапівпровідниковим шаром, а також служить своєрідним акумулятором тепла на стадії проявлення ТПН. На поверхню термопластика наноситься однорідний електричний заряд електронним променем або спеціальним пристроєм коронного розряду. Потім проектується інтерференційна картина. Це запис голограми. В освітлених ділянках відбувається розрядка фотонапівпровідникового шару і зменшення електричного потенціалу. Причому розподіл зарядів відповідає записаній інтерференційній картині. Через деякий час (0,1 с) потенціал поверхні ТПН змінюється: в освітлених ділянках збільшується, а неосвітлених – набуває початкової величини.

Прояв проводиться швидким нагрівом ТПН до температури 100 °С. Нагрів розм'якшує термопластик. Під дією поверхневих сил натягнення ТПН деформується, створюючи на поверхні рельєф відповідно до локального розподілу зарядів. При охолодженні до нормальної температури (20 °С) термопластик твердіє, зберігаючи фазову голограму, відповідну отриманому фазовому рельєфу.

Стирання всієї записаної інформації проводиться нагріванням ТПН до 110 °С, вибіркове стирання – лазерним випромінюванням або електронним променем.

За схемою запису і за товщиною шару фотоемульсії, в якому записується інтерференційна картина, голограми можуть бути розділені на плоскі, об'ємні і кольорові.

Плоскі (тонкошарові) **голограми** – це зазвичай тонкі світлочутливі плівки емульсії із зареєстрованою в них інтерферограмою, що наносяться на скло. Їх структура схожа на дифракційні решітки з періодом $\Lambda = \lambda_0 / \sin \Theta$. Плоска голограма характеризується функцією амплітудного пропускання дифрагуючої хвилі випромінювання – $\tau(x; y)$. При проходженні хвилі одиничної амплітуди через задану елементарну ділянку голограми, подібну до дифракційних решіток, безпосередньо за голограмою

утворюються хвилі нульового і першого порядків: $\tau \cdot E_0 = \omega_0 + \omega_{+1} + \omega_{-1}$. Останні два члени в (6.3) математично описують дифрагування хвилі $\omega_{\pm 1}$ порядку. Оскільки товщина плівки набагато менша відстані між двома сусідніми максимумами Λ системи смуг інтерференційної картини, то при проходженні паралельного опорного пучка через плоску голограму фронт хвилі розбивається на кілька по-різному спрямованих дифракційних пучків, похилих по відношенню до падаючого пучка під різними кутами $\pm \Theta$; $\pm 2\Theta$; $\pm 3\Theta$; ...; $\pm m\Theta$, де $\sin \Theta = \lambda_0 / \Lambda$. Один з цих пучків спрямований так, як і падаючий, але інтенсивність його набагато більше інших пучків.

Якщо проводиться запис предмета складної конфігурації на плоскій голограмі, то кожна точка предмета утворює на голограмі свою систему смуг різного розташування і ширини. У цій ситуації отримуємо плоску голограму, тотожну складним, нерегулярним дифракційним решіткам. При відновленні за голограмою мають місце дві сферичні хвилі, які одночасно створюють уявне і дійсне зображення предмета однакової інтенсивності. Відзначимо, що позаосьові схеми голографії, як правило, утворюють плоскі голограми.

Об'ємні (товстошарові) **голограми** – це спеціальні інтерференційні структури, у яких відстані між сусідніми поверхнями почорніння набагато менші товщини шару ($\Lambda \ll \Delta$). Чим більше товщина шару, тим більше в нім утворюється поверхонь почорніння і тим точніше виходить відтворення предмета. Поверхні почорніння – це, по суті, просторові зміни показника заломлення шару. На відміну від плоскої голограми, в об'ємній голограмі необхідно відзначити дві властивості.

Відновлення зображення об'єкта проводиться не обов'язково випромінюванням лазера, а в світлі будь-якого немонахроматичного джерела випромінювання. При цьому відновлюється тільки одне зображення, дійсне або уявне, залежно від того, з якого боку голограма освітлюється. Вперше у 1962 році об'ємні голограми і метод їх запису запропонував Ю.Н. Денисюк.

Кольорова голограма є накладенням інтерференційних картин трьох довжин хвиль $\lambda_{\text{ч}}$; $\lambda_{\text{ж}}$; $\lambda_{\text{с}}$ на одній фотопластині.

Відомо, що будь-яке кольорове враження у спостерігача можна створити поєднанням трьох основних кольорів – червоного, жовтого і синього – певним чином підібравши інтенсивності пучків. На одній чорно-білій

фотопластині накладенням трьох інтерферограм отримують трикомпонентну голограму – складну інтерференційну картину з трьох опорних і трьох предметних пучків.

При відновленні кольорового зображення предмета цю складну голограму поміщають в місце експозиції й освітлюють одночасно трьома опорними пучками з довжинами хвиль $\lambda_{\text{ч}}$; $\lambda_{\text{ж}}$; $\lambda_{\text{с}}$. Кожний з пучків, проходячи через голограму, створює три дійсних і три уявних зображення – всього 18 зображень, з яких тільки три точно співпадають у просторі і створюють кольорове зображення предмета.

Решта зображень є «фантомними» зображеннями, що погіршують якість відновлення. Щоб поліпшити якість, фантомні зображення необхідно рознести подалі один від одного, що досягається вибором довжини хвилі пучків і кутового розміру предмета. Взагалі фантомні зображення можна віднести до незвичайних особливостей голографії – це явище, коли голограма відновлює деталі предмета, яких бракує, за малою його частиною.

На сьогодні ведуться інтенсивні дослідження різного практичного застосування методів голографії, і серед фахівців спостерігається оптимізм щодо результатів цих досліджень. Список можливого застосування голографії достатньо значний: це голографічне кіно і телебачення, голографічна мікроскопія і звукобачення, розпізнавання образів і запам'ятовуючі пристрої в ЕОМ, це також інтерференційний контроль і дефектоскопія, системи запису, кодування і зчитування інформації і так далі і багато чого іншого.

6.2. ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ЛАЗЕРНИМ ПРОМЕНЕМ

6.2.1. Дія лазерного променя на речовину

Якщо спрямувати на поверхню якогось твердого матеріалу, наприклад металу, промінь потужного лазера та уявити, що інтенсивність променя поступово зростає (за рахунок збільшення потужності лазера або за рахунок фокусування випромінювання), будуть спостерігатись такі фізичні процеси [14].

Коли інтенсивність променя, зростаючи, досягне значення 10^5 Вт/см², почнеться плавлення металу. Поблизу поверхні, безпосередньо під світловою плямою, виникне область рідкого (розплавленого) металу. Поверхня, що обмежує цю зону від твердого металу (її називають поверхнею розплаву), поступово переміщується в глиб матеріалу у міру поглинання ним сві-

тлової енергії. При цьому площа поверхні розплаву збільшується і, отже, теплота починає інтенсивніше відводитися в глибинні зони матеріалу за рахунок теплопровідності. У результаті встановлюється незмінна (для цієї інтенсивності випромінювання) поверхня розплаву (рис. 6.4).

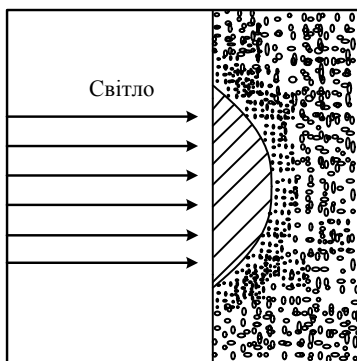


Рисунок 6.4 – Плавлення металу під дією лазерного променя

Підвищимо інтенсивність лазерного променя до 10^6 – 10^7 Вт/см². Тепер одночасно з плавленням відбуватиметься інтенсивне випаровування (кипіння) матеріалу. Частина речовини перетвориться на пару, унаслідок чого на поверхні металу виникне лунка, почнеться процес формування отвору або розрізу (рис. 6.5).

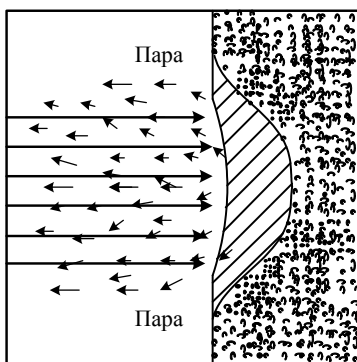


Рисунок 6.5 – Інтенсивне випаровування металу

Коли інтенсивність променя досягне приблизно 10^9 Вт/см², світло почне сильно іонізувати пару речовини, перетворюючи її на плазму. Виникнувши, плазма перегородить подальший доступ лазерного випромінювання до поверхні матеріалу – адже світло інтенсивно поглинається плазмою (рис. 6.6).

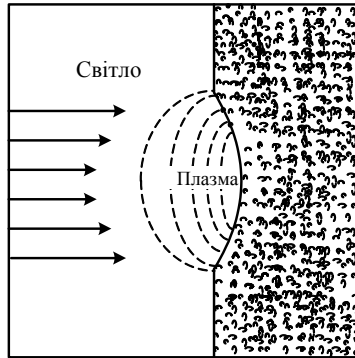


Рисунок 6.6 – Утворення плазми

При обробці матеріалів лазерним променем важливо, щоб не виникала плазма. Значить, інтенсивність променя не повинна бути надмірно великою.

Говорячи про дію лазерного променя на речовину, ми поки мали на увазі концентрацію світлової потужності лише в просторі (адже інтенсивністю променя є потужність, віднесена до одиниці площі його перерізу). Треба, проте, враховувати і концентрацію потужності в часі. Її можна регулювати, змінюючи тривалість одиночних лазерних імпульсів або частоту їх проходження (якщо генерується послідовність імпульсів).

Припустимо, що інтенсивність достатня для того, щоб метал не тільки плавився, але і кипів; при цьому випромінюванням лазера є одиночні імпульси тривалістю 10^{-7} с.

У цьому випадку у матеріалі поглинається значна світлова енергія за дуже короткий час. За такий час поверхня розплаву просто не встигає переміститися вглиб матеріалу. У результаті ще до того, як розплавиться скільки-небудь помітна маса речовини, почнеться її інтенсивне випаровування. Іншими словами, основна частина світлової енергії лазерного імпульсу, що поглинається речовиною, витрачається у подібних умовах не на плавлення, а на випаровування. На практиці при заданій енергії лазерного імпульсу часто буває доцільно завчасно потурбуватися про збільшення його тривалості, щоб забезпечити достатній час для переміщення поверхні розплаву вглиб деталі.

Залежно від виду обробки і властивостей матеріалу треба використовувати випромінювання з цілком певними енергетичними і часовими характеристиками. Якщо, наприклад, для зварювання підходять відносно менш інтенсивні і в той же час триваліші імпульси (тривалістю 10^{-2} – 10^{-3} с),

то для пробиття отворів, де важливе інтенсивне випаровування матеріалу, підходять інтенсивніші і коротші імпульси (10^{-4} – 10^{-6} с).

6.2.2. Особливості «лазерних свердел»

Роботу лазерних свердел розглянемо на прикладі конструкції годинників. На циферблаті є напис, наприклад, «23 камені».

Йдеться про рубінові камені, використовувані в годинниковому механізмі як підшипники ковзання. При виготовленні таких підшипників потрібно висвердлити в рубіні (матеріалі в дуже твердому і в той же час крихкому) отвори строго циліндрової форми діаметром всього 0,1–0,05 мм. Багато років ця операція виконувалася механічним способом з використанням свердел, виготовлених з тонкого дроту діаметром 40–50 мкм. Таке свердло робить в хвилину до 30 000 обертів й одночасно здійснює при цьому близько 100 поворотно-поступальних переміщень. Для свердлення одного каменя потрібно до 10–15 хвилин.

З появою лазерів з 1964 року малопродуктивне механічне свердлення отворів у годинникових каменях стало замінюватися лазерним свердленням. Зрозуміло, термін «лазерне свердлення» не потрібно розуміти буквально. Лазерний промінь не свердлить отвір – він його пробиває за рахунок інтенсивного випаровування матеріалу.

На сьогодні лазерна пробивка отворів в рубінових годинникових каменях є звичайною справою. Для цієї мети застосовуються імпульсні твердотільні лазери, наприклад лазери на склі з неодимом. Отвір в камені (при товщині заготовки 0,5–1 мм) пробивається серією з декількох лазерних імпульсів, що мають енергію 0,1–0,5 Дж і тривалість близько 10^{-4} с. Продуктивність роботи лазерної установки в автоматичному режимі приблизно один камінь за секунду. Це в тисячу разів швидше за продуктивність механічного свердлення.

Щоб отримати тонкий або якнайтонший дріт із золота, міді, бронзи, вольфраму й інших металів, застосовують технологію простягання (волочіння) дроту крізь отвори дуже малого діаметра. Ці отвори (канали волочіння) висвердлюють в матеріалах, що мають особливо високу твердість, наприклад у надтвердих сплавах. Найбільш твердий, як відомо, мінерал алмаз. Тому краще всього протягувати тонкий дріт крізь отвір в алмазі (крізь так звані діамантові фільтери).

Тільки діамантові фільтери дозволяють отримувати дріт діаметром

всього 10 мкм. Для свердління одного тонкого отвору в такому надтвердому матеріалі, яким є алмаз, потрібно до 10 годин безперервної роботи механічним свердлом. Зате зовсім неважко «пробити» цей отвір серією з декількох потужних лазерних імпульсів. Як і пробиття отворів в годинникових каменях, ця операція виконується за допомогою імпульсних твердотільних лазерів.

Канал волочиння у діамантовій фільері має складний профіль. Він показаний на рис. 6.7, *a*. Лазерними імпульсами пробивають чорновий канал в діамантовій заготівці. Потім, обробляючи канал ультразвуком, шліфуючи і поліруючи, надають йому необхідний профіль.

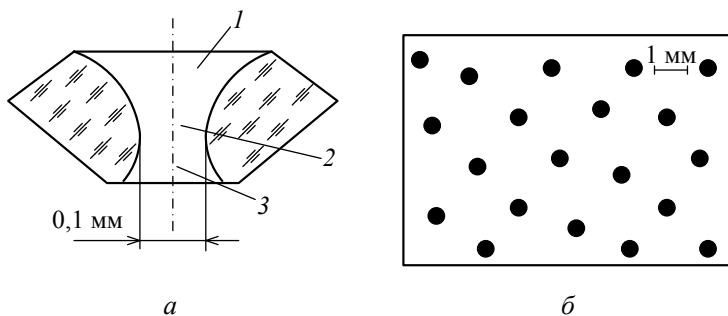


Рисунок 6.7 – Лазерне свердлення отворів:

профіль каналу волочиння в діамантовій фільері (*a*)

1 – вхідний отвір; 2 – робоча частина каналу; 3 – вихідний отвір;
отвори, пробиті лазерним випромінюванням в пластині глиноземної кераміки (*б*);

Лазерне свердлення широко застосовують для отримання отворів не тільки в твердих і надтвердих матеріалах, але і в матеріалах, що відрізняються підвищеною крихкістю.

Як приклад вкажемо на підкладки мікросхем, що виготовляються з глиноземної кераміки. Через високу крихкість кераміки механічне свердлення отворів в них виконують, як правило, на «сирому» матеріалі. Обпалюють кераміку вже після свердлення. При цьому відбувається деяка деформація виробу, спотворюється взаємне розташування висвердлених отворів. При використанні «лазерних свердел» можна спокійно працювати з керамічними підкладками, які вже пройшли обпалення. Тому вказаної вище проблеми тут не виникає. За допомогою лазерів пробивають дуже тонкі отвори у кераміці – діаметром всього 10 мкм. Механічним свердленням такі отвори отримати просто не можна. Для лазерної пробивки

отворів в керамічних підкладках застосовують імпульсні CO_2 лазери (при діаметрі отвору близько 0,1 мм і більше) та імпульсні лазери на рубіні або гранаті з неодимом (для отворів меншого діаметра). На рис. 6.7, б показані із збільшенням отвори діаметром 0,3 мм, пробиті в пластині глиноземної кераміки завтовшки 0,7 мм за допомогою CO_2 лазера.

Наведені приклади наочно демонструють переваги лазерного свердлення. Це перш за все можливість отримання отворів у дуже твердих або дуже крихких матеріалах, а також можливість отримання дуже тонких отворів (діаметром до 10 мкм). Відношення глибини пробитих лазером тонких отворів до їх діаметра досягає (порівняно з іншими методами свердлення) рекордно великих значень; глибина отвору може перевищувати його діаметр в 10–50 разів. У всіх випадках лазерне свердлення відрізняється високою продуктивністю. Нарешті, на відміну від звичайних свердел, «лазерні свердла» не ламаються і не зношуються.

На рис. 6.8 показано лазерну установку для свердлення отворів.

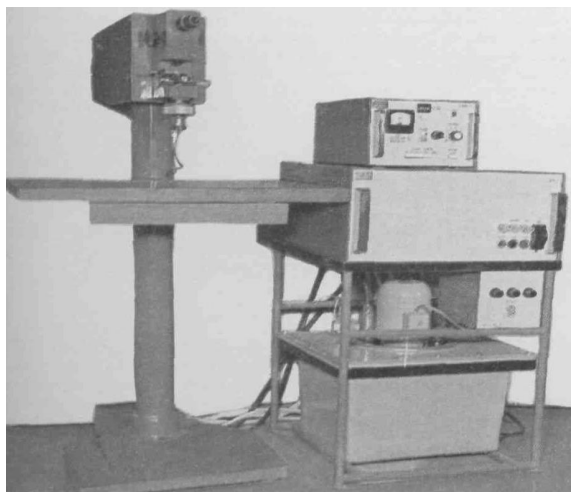


Рисунок 6.8 – Лазерна установка для свердлення отворів

6.2.3. Лазерне зварювання

Розвиток лазерного зварювання пройшов два етапи. Спочатку розвивалося точкове зварювання – на основі імпульсних твердотільних лазерів на рубіні і на склі з неодимом. З появою потужних CO_2 лазерів і лазерів на гранаті з неодимом, що дають безперервне випромінювання або послідовність імпульсів, що часто повторюються, стало розвиватися шовне зварю-

вання з глибинним проплавленням до декількох міліметрів (і навіть сантиметрів). Приклади точкового лазерного зварювання такі: з'єднання нікелевого контакту і клеми з нікелевого сплаву на підкладці транзистора, приварювання тонких мідних дротів один до одного або до клем, взаємне з'єднання мікроелектронних компонентів.

Шовне лазерне зварювання, з використанням безперервного випромінювання потужністю близько 100 Вт, застосовується для герметизації корпусів приладів, приварювання наконечників до лопаток газових турбін, приварювання ріжучих кромки із загартованої сталі до полотни металоріжучих пилок і т.д. Швидкість такого зварювання досягає декількох метрів за хвилину; ширина шва 0,5 мм.

У теперішній час застосовується шовне зварювання випромінюванням потужністю 1–10 кВт. При цьому міцність зварних з'єднань (ширина шва становить декілька міліметрів) досягає рівня міцності зварюваного матеріалу. Здійснюється автоматичне лазерне зварювання кузовів автомобілів, зварювання листів титану та алюмінію на суднобудівних верфях, зварювання газопроводів. На автозаводах за допомогою CO₂ лазера потужністю 5 кВт проводять автоматичне лазерне зварювання карданних валів автомобілів. Термін служби валів підвищився у три рази. Поширюється також лазерне зварювання неметалічних матеріалів. Для зварювання деталей із звичайного скла використовуються лазери потужністю 100 Вт, для зварювання кварцу – потужністю 300 Вт.

Лазерне зварювання успішно конкурує з добре відомими способами зварювання електродугою, за допомогою електронного пучка. Воно має ряд переваг, які роблять його у багатьох випадках переважним або навіть єдиною можливістю.

Про деякі унікальні особливості лазерного зварювання ми вже говорили. Додатково відзначимо, що при лазерному зварюванні немає контакту із зварюваним зразком, а тому немає небезпеки його забруднення якими-небудь домішками. На відміну від електронного зварювання, для якого потрібний вакуум, лазерне проводиться в атмосфері. Лазерне зварювання дозволяє здійснювати швидко і з високою точністю локальне проплавлення в окремій точці або уздовж заданої лінії. Зона, яка піддається тепловій дії, має дуже малі розміри, що важливо у тих випадках, коли зварювання проводиться у безпосередній близькості від чутливих до нагріву елементів.

6.2.4. Зварювання через скляні перегородки

Припустимо, що усередині електронно-променевої трубки (кінескопа) сталася аварія – перегорів або обірвався якийсь дріт, порушився контакт. Трубка вийшла з ладу. На перший погляд полумку не можна виправити: це відбулося у вакуумі, усередині скляного балона, і ніякому зварникові туди не проникнути. Проте в нього легко може проникнути лазерний промінь. Направляючи промінь у потрібну точку крізь скло вакуумного балона і належним чином його фокусуючи, можна здійснити необхідний зварювальний ремонт (рис. 6.9).

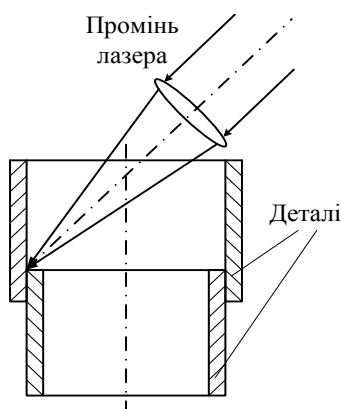


Рисунок 6.9 – Лазерне зварювання в труднодоступному місці

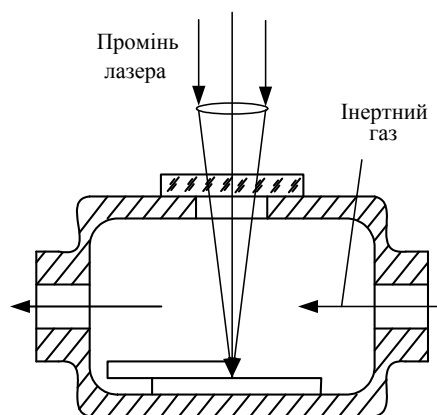


Рисунок 6.10 – Лазерне зварювання в камері, заповненій інертним газом

Тут виявляється одна з унікальних особливостей лазерного променя – можливість проводити зварювання через прозору для світла перегородку, у тому числі – у вакуумному об'ємі і взагалі в різних труднодоступних місцях.

Лазерне зварювання через прозору перегородку застосовують не тільки для відновного ремонту електровакуумних приладів. Великий практичний інтерес становить зварювання тих або інших елементів мікроелектроніки в камері, заповненій інертним газом. У цьому випадку запобігають реакції окислення (рис. 6.10).

6.2.5. Використання лазерів при виготовленні мікросхем

Розвиток мікроелектроніки органічно пов'язаний із вдосконаленням технології виготовлення мікросхем. Велику допомогу може надати тут лазерний промінь. Спочатку лазери застосовували лише для мікрозварюван-

ня. Так, за допомогою рубінового лазера приварювали виводи до контактів на кремнієвих пластинках, тонкі дроти до тонких плівок. Потім почали застосовувати CO₂ лазери для пробиття отворів у керамічних підкладках для мікросхем (про що вже розповідалося).

У теперішній час лазерний промінь все частіше використовують для підганяння параметрів тонкоплівкових схем і для виготовлення окремих елементів мікросхеми. За допомогою лазера можна цілком виготовити плівкову мікросхему – зі всіма конденсаторами, індуктивностями, що входять у неї. Застосовуючи промінь лазера, можна виготовити фотошаблон, що призначається для травлення мікросхем, або шаблон для напилювання компонентів мікросхеми на підкладку. У всіх цих випадках використовується ефект випаровування матеріалу під дією потужного лазерного випромінювання.

Припустимо, що на діелектричну підкладку мікросхеми нанесена напилюванням тонка металева плівка. Переміщаючи уздовж поверхні плівки сфокусовану на неї лазерну пляму, можна випарувати певні ділянки плівки і тим самим створити потрібний «рисунок» мікросхеми.

Як приклад наведемо конкретну лазерну установку на основі дії лазера в безперервному режимі на гранаті з неодимом. Лазер генерує регулярну послідовність світлових імпульсів з частотою 400 імп./с. Тривалість окремого імпульсу 10^{-7} с, потужність до 1 кВт. Лазерний промінь фокусують в пляму діаметром 10 мкм. При переміщенні пучка відбувається випаровування вузької смуги металевої плівки; швидкість переміщення лазерного пучка дорівнює 2 мм/с. Смуги на поверхні підкладки виявляються практично повністю очищеними від металу.

6.2.6. Різання матеріалів лазерним променем

Лазерним променем можна різати практично будь-який матеріал. Це – тканина, папір, дерево, гума, пластмаса, кераміка, листовий азбест, скло, листи металу і т.ін.

При цьому можна отримувати акуратні розрізи за складними профілями. Під час лазерного різання займистих матеріалів можна обдувати місце розрізу струменем інертного газу: у цьому випадку виходить гладкий, необпалений край зрізу.

Як приклад на рис. 6.11, *a* показано процес вирізування квадратних отворів у листі неіржавіючої сталі завтовшки 0,5 мм за допомогою CO₂ ла-

зера. На рис. 6.11, б наведено виконаний лазерним променем розріз слюдяного листа завтовшки 3 мм з достатньо складним профілем.

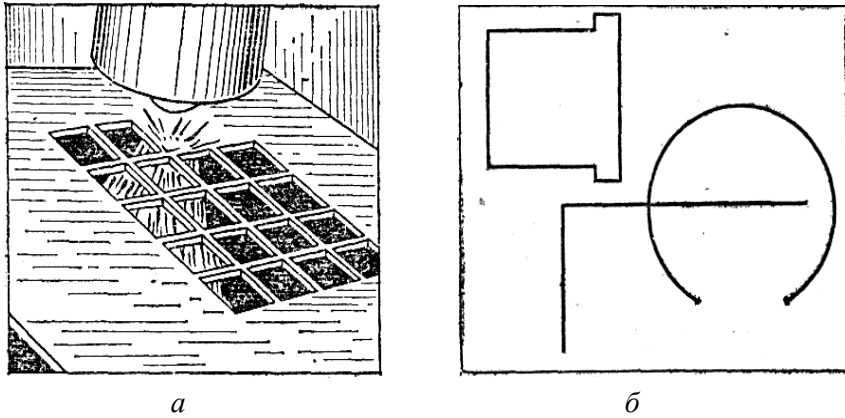


Рисунок 6.11 – Лазерне різання матеріалів

Для різання використовуються безперервно генеруючі лазери або лазери, що генерують послідовність світлових імпульсів з високою частотою проходження. Необхідна потужність випромінювання залежить від матеріалу, що розрізається, і товщини заготовки.

Наприклад, для різання дошок товщиною 50 мм застосовується CO_2 лазер потужністю 200 Вт; ширина розрізу становить 0,7 мм. Для різання листів фанери завтовшки 25 мм застосовується CO_2 лазер потужністю 8 кВт; швидкість різання 1,5 м/хв. Різання скла при товщині 10 мм вимагає більшої потужності випромінювання – до 20 кВт. Лазерне різання металів може проводитися випромінюванням потужністю всього 100–500 Вт, якщо при цьому обдувати матеріал, що розрізається, струменем кисню. В цьому випадку використовують термін «газолазерне різання».

Схему різачка для такого різання показано на рис. 6.12. Значна частина енергії, що витрачається на процес різання, отримується тут за рахунок екзотермічних реакцій, в які вступають метал і кисень; інакше кажучи, за рахунок теплоти, яка виділяється при горінні металу в струмені кисню. Крім того, струмінь кисню здуває і відносить із зони різання розплави і продукти згоряння металу, а також охолоджує ділянки металу, прилеглі до зони різання. Використання струменя кисню при лазерному різанні не тільки знижує вимоги до потужності лазера, але одночасно збільшує глибину і швидкість різання, дозволяє отримувати якісну кромку.

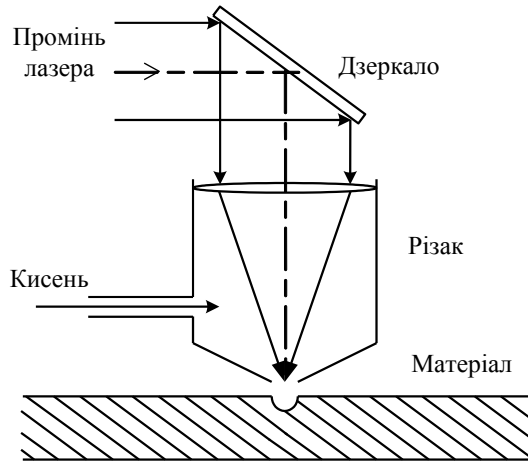


Рисунок 6.12 – Газолазерне різання матеріалів

Щоб продемонструвати, наскільки широко використовується сьогодні лазерне різання, приведемо два практичні приклади, що мають відношення до абсолютно різних областей господарства.

Перший приклад – лазерне різання і розкрій тканин на сучасній ткацькій фабриці. Пристрій включає CO_2 лазер у безперервному режимі потужністю 100 Вт, систему фокусування і переміщення лазерного променя, ЕОМ і систему для натягнення і переміщення тканини. В процесі різання лазерний промінь переміщається по поверхні тканини з швидкістю до 1 м/с. Діаметр сфокусованої світлової плями рівний 0,2 мм. Переміщеннями лазерного променя і тканини керує ЕОМ. Подібний пристрій дозволяє, наприклад, протягом години розкрити матеріал для 50 костюмів. Розкрій проводиться не тільки швидко, але і з дуже високою точністю. При цьому забезпечується добра якість країв розрізу.

Інший приклад – застосування лазерного різання в авіаційній промисловості і, зокрема, при виробництві космічних літальних апаратів. За допомогою лазерів здійснюють автоматизоване розрізання листів титану, сталі, алюмінію. CO_2 лазер в безперервному режимі потужністю 3 кВт розрізає лист титану із швидкістю 3,5 м/хв при товщині листа 5 мм і із швидкістю 0,5 м/хв при товщині 50 мм. Використовуючи кисневий струмінь (у методі газолазерного різання), можна отримати приблизно той же результат при істотно меншій потужності лазера: 100–300 Вт.

6.2.7. Сучасні лазерні технології

Раніше ми ознайомилися з деякими випадками застосування лазерного випромінювання, що мають унікальний характер: пробивка тонких отворів у твердих і крихких матеріалах, мікрозварювання мініатюрних деталей, зварювання через прозору перешкоду і в труднодоступних місцях. Природно, що в подібних випадках у лазерного променя фактично немає конкурентів. Проте і в звичайних ситуаціях, де поки що переважають традиційні технології обробки матеріалів, лазерний промінь починає завойовувати міцні позиції. Отже, вже сьогодні можна говорити про виникнення і розвиток лазерної технології.

Від багатьох нових і новітніх промислових технологій лазерна технологія вигідно відрізняється двома перевагами. По-перше, вона надзвичайно багатогранна, охоплює найрізноманітніші процеси обробки матеріалів. По-друге, вона виключно перспективна. Ми є свідками поки що перших кроків лазерної технології. Але кроки ці дуже вражаючі.

Сучасна лазерна технологія включає різання матеріалів, пробиття отворів, зварювання, різні види термообробки, скрайбування, маркування і ряд інших процесів обробки матеріалів. Вражає виняткова різноманітність не тільки процесів обробки, але й оброблюваних матеріалів. Лазерним променем можна обробляти практично будь-який матеріал.

6.2.8. Термообробка

Коли лазерний промінь падає на поверхню металу, швидко нагрівається тонкий приповерхневий шар у тому місці, куди спрямований промінь. У міру переміщення променя на інші ділянки поверхні відбувається швидке охолодження нагрітої ділянки. Це використовують для гартування поверхневих шарів, що дозволяє істотно підвищити їхню міцність. *Лазерне гартування* дозволяє вибірково збільшувати міцність саме тих ділянок поверхні, саме тих деталей, які найбільшою мірою піддаються зносу. Так, лазерне гартування застосовують в автомобільній промисловості – для зміцнення головок циліндрів двигунів, направляючих клапанів, шестерень, розподільних валів тощо.

Для підвищення твердості поверхні застосовують також *лазерне легування*. Легувальні присадки у вигляді порошку заздалегідь наносять на оброблювану поверхню. При опромінюванні лазером відбувається плавлення і взаємне перемішування легувального порошку і матеріалу деталі в

межах тонкого приповерхневого шару.

Термообробку зазвичай проводять CO₂ лазером у безперервному режимі потужністю близько 1 кВт. Останніми роками з'явилися нові лазерні технологічні процеси, що належать до термообробки.

Один з таких процесів – *лазерне остеклювання металів*. Якщо дуже швидко охолодити нагріту лазерним променем поверхню металу, то виникне тонкий приповерхневий аморфний (склоподібний) шар, що відрізняється високою міцністю і корозійною стійкістю. Охолодження поверхні металу повинно відбуватися зі швидкістю не меншою 10⁸ град. за секунду.

Інший приклад – *поверхнєве зміцнення металів* ударними хвилями при використанні лазерів, що генерують послідовності імпульсів. При інтенсивності випромінювання 10⁹–10¹⁰ Вт/см² у поверхні металу утворюється шар плазми. Плазма поширюється назустріч лазерному променю; в результаті народжується ударна хвиля. Оскільки промінь є послідовністю імпульсів, виникає послідовність ударних хвиль. Піковий тиск на поверхню досягає сотень атмосфер. Дія на металеву деталь виявляється у цьому випадку такою ж, як при холодній обробці металу тиском.

До інших процесів обробки можна віднести такі. При обробці крихких матеріалів (кераміки, скла, кремнію) широко застосовують *скрайбірування* – нанесення на поверхні матеріалу канавок або пробивка ряду близько розташованих отворів, після чого матеріал легко надломлюється і розколюється уздовж лінії скрайбірування. Добре відомий всім приклад скрайбірування – використання алмазу при розрізанні скла. У даний час широко розвивається лазерне скрайбірування на основі застосування CO₂ лазерів, що працюють в безперервному режимі або режимі імпульсів, що повторюються.

Лазери знаходять широке застосування при *маркуванні* різних промислових виробів в тих випадках, коли вироби мають малі розміри або дуже крихкі, а також якщо потрібна висока швидкість маркування.

Відзначимо *лазерну зачистку дротів* в авіаційній промисловості, що також відрізняється високою надійністю. Тут використовується той факт, що випромінювання CO₂ лазера добре поглинається органічним матеріалом (ізоляцією дроту) і віддзеркалюється від поверхні металу. Лазер забезпечує високу чистоту поверхні і не робить шкідливої дії на метал дроту (не відбувається обрив дроту).

Перспективи лазерних технологій полягають в такому:

- різноманітність можливих процесів обробки і різноманітність оброблюваних матеріалів (включаючи матеріали, які взагалі не піддаються звичайній механічній обробці);
- висока швидкість виконання операцій з обробки матеріалу;
- можливість автоматизації операцій і, як наслідок, істотне підвищення продуктивності праці;
- висока якість обробки (міцність зварних швів, гладкість зрізів, відсутність забруднень оброблюваної поверхні);
- можливість високоточної прецизійної обробки;
- селективність (вибірковість) дії, коли обробляються лише певні ділянки поверхні, а сусідні ділянки не піддаються при цьому яким-небудь діям;
- можливість здійснення дистанційної (на відстані) обробки матеріалу;
- можливість виконання ряду унікальних операцій.

6.3. ЛАЗЕРНІ ГІРОСКОПИ

Лазерний гіроскоп – це лазер з кільцевим резонатором. Такий резонатор містить три або більше дзеркал, розташованих в одній площині так, щоб випромінювання циркулювало по замкнутому контуру [1, 14].

На рис. 6.13 схематично показаний лазерний гіроскоп з резонатором з трьох дзеркал. Траєкторія випромінювання в резонаторі відповідає периметру рівностороннього трикутника.

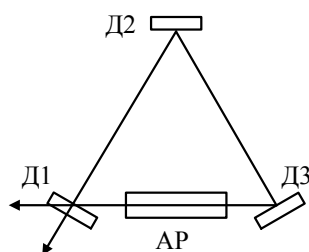


Рисунок 6.13 – Лазерний гіроскоп з резонатором з трьома дзеркалами (Д1–Д3) та активною речовиною АР

У лазері з кільцевим резонатором генеруються дві біжучі світлові хвилі, що розповсюджуються усередині резонатора назустріч одна одній. Одна оббігає резонатор в напрямі за годинниковою стрілкою, а інша – у зворотному напрямі.

Нехай ν – частота цих хвиль. Припустимо тепер, що лазерний гіроскоп знаходиться на платформі, яка обертається з кутовою швидкістю Ω навколо осі, перпендикулярній площині резонатора, – її називають віссю чутливості лазерного гіроскопа (рис. 6.14). У цьому випадку частоти біжучих та генерованих хвиль виявляються різними.

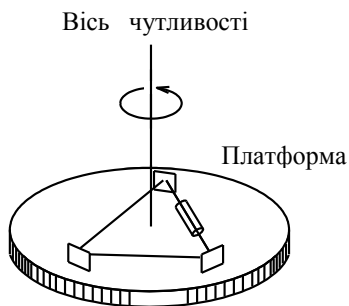


Рисунок 6.14 – Лазерний гіроскоп на платформі, що обертається

Хвиля, що оббігає резонатор у напрямі, який співпадає з напрямом обертання платформи, має частоту:

$$\nu_1 = \nu(1 - 2\Omega S/cL),$$

а зустрічна хвиля має частоту:

$$\nu_2 = \nu(1 + 2\Omega S/cL).$$

У цих формулах: S – площа багатокутника (у цьому випадку – трикутника), по периметру якого поширюється випромінювання, L – довжина периметра, c – швидкість світла.

Зсув частоти хвиль в кільцевому резонаторі, що обертається, можна розглядати як прояв ефекту Доплера.

З наведених співвідношень випливає, що різниця частот зустрічних біжучих світлових хвиль рівна:

$$f = \nu_2 - \nu_1 = 4\nu\Omega S/cL.$$

Ці хвилі виводяться з резонатора, з'єднуються одна з одною і потрапляють у фотоприймач. В результаті інтерференції хвиль фотоприймач реєструє коливання світлової інтенсивності з частотою f (це є частота биття). Вимірюючи f , можна розрахувати кутову швидкість.

Таким чином, лазерні гіроскопи можуть використовуватися (і дійсно широко використовуються) як вимірники кутової швидкості тіл, що обертаються. Діапазон вимірюваних ними кутових швидкостей дуже широкий

– приблизно від 10^{-6} до 10 рад/с; похибка вимірювання до 10^{-8} рад/с. Лазерні гіроскопи можуть вимірювати навіть кутову швидкість обертання Землі.

У сучасних конструкціях лазерних гіроскопів зазвичай застосовується резонатор з трьома дзеркалами; як активне середовище використовують суміш гелію і неону.

Гіроскоп виготовляють з суцільної заготовки кварцу, виточуючи всередині відповідні канали для світлових променів і порожнини для розміщення в них електродів. До обробленої кварцової заготовки після монтажу електродів прикріплюють у відповідних місцях дзеркала резонатора, потім відкачують внутрішні порожнини і заповнюють їх сумішшю гелію і неону.

На рис. 6.15 наведено в спрощеному вигляді розріз такої конструкції лазерного гіроскопа. Він дуже компактний і надійний у роботі, вміщається на долоні людини.

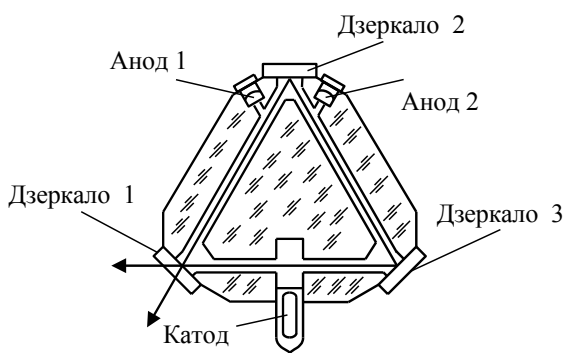


Рисунок 6.15 – Розріз конструкції лазерного гіроскопа, що застосовується у техніці

Лазерні гіроскопи знаходять різноманітне застосування. Вони використовуються, наприклад, як гірокомпаси – навігаційні прилади, що дозволяють, зокрема, визначати напрям на північ.

Існують різні практичні схеми лазерних гірокомпасів. Простий варіант такий. Орієнтують площину кільцевого резонатора так, щоб його вісь чутливості опинилася в площині горизонту, і вимірюють відповідну складову кутової швидкості обертання Землі. Потім поступово повертають гіроскоп так, щоб вісь чутливості, змінюючи свій напрям, весь час залишалася в горизонтальній площині. Знаходять таке положення, коли реєстрована гіроскопом складова кутової швидкості обертання Землі виявляється

найбільшою (в порівнянні з іншими положеннями). Напрямок осі чутливості гіроскопа у цьому положенні і буде напрямом на північ.

Будь-який апарат (літак, ракета, штучний супутник Землі), що знаходиться у польоті, при відхиленнях від прямолінійної траєкторії здійснює обертальні рухи в тій або іншій площині.

Контролюючи кутову швидкість і кути повороту при всіх цих рухах, можна тим самим контролювати як траєкторію польоту апарата, так і його орієнтацію в просторі.

От чому лазерні гіроскопи широко використовуються як бортова апаратура орієнтації і наведення в сучасній авіації і в космонавтиці. При цьому застосовують тривимірні гіроскопи – гіроскопи з трьома кільцевими резонаторами, площини яких взаємно перпендикулярні. Вони виконуються в суцільному кварцовому блоці у вигляді кулі, в якій висвердлюються канали для світлових променів у трьох взаємно перпендикулярних площинах. Саме такі лазерні гіроскопи дозволяють контролювати повороти апарата у всіх трьох вимірюваннях.

Наприклад, аналогічний трикоординатний гіроскоп використовувався як резервна система посадочної кабіни на Місяць корабля «Аполлон» (США). Блок гіроскопа мав такі характеристики: маса – 8,5 кг, габаритні розміри – 12×21×31 см, споживана потужність – 75 Вт, сумарна похибка вимірювання Ω становила $1,7 \cdot 10^{-3}$ рад/год.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. У чому полягає суть голографії?
2. Що таке голограма?
3. Поясніть два етапи створення голограми.
4. Назвіть основні властивості голограм.
5. Назвіть основні види голограм.
6. Поясніть принцип отримання осьової голограми.
7. Поясніть принцип отримання позаосьової голограми.
8. Назвіть сферу застосування голографії.
9. Як діє на речовину потужний лазерний промінь?
10. Поясніть принципи лазерного свердлення отворів.
11. Вкажіть галузі застосування лазерного свердлення.
12. Поясніть принципи лазерного зварювання.
13. Як різьнуть різні матеріали лазерним променем?

14. Поясніть суть сучасних лазерних технологій.
15. Які види лазерного зварювання ви знаєте?
16. Назвіть типи лазерів, що застосовуються у лазерних технологіях.
17. Поясніть принцип дії лазерного гіроскопа.
18. У чому відмінність одно- і тривимірних гіроскопів?
19. Поясніть конструктивні особливості лазерних гіроскопів.
20. Як визначити швидкість обертання платформи за допомогою лазерного гіроскопа?
21. Вкажіть галузі застосування лазерних гіроскопів.

7. СПЕЦІАЛЬНІ ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

7.1. ЛАЗЕРИ В ОБЧИСЛЮВАЛЬНІЙ ТЕХНІЦІ

Разом з науковим і технічним застосуванням лазери використовуються в інформаційних технологіях для вирішення спеціальних завдань, причому ці застосування вже поширені або знаходяться у стадії досліджень [5, 14]. Найбільш поширеними прикладами таких застосувань є оптична цифрова пам'ять, лазерні друкувальні пристрої, окрім цього лазери застосовуються і в обчислювальній техніці.

Отримані короткі часові інтервали перемикання (висока швидкодія) роблять можливим застосування лазерів і комбінацій з лазерами, включаючи інтегральні мікросхеми, в мікроелектронних схемах перемикачів (оптоелектроніка):

- як логічні елементи (I-НІ, АБО-НІ);
- для введення і зчитування інформації із запам'ятовувальних пристроїв в обчислювальних машинах.

У цих цілях використовуються інжекційні лазери і гетеролазери.

Переваги цих елементів такі: короткі часові інтервали перемикання і зчитування (висока швидкодія), дуже маленькі лінійні розміри елементів, інтеграція оптичних та електричних систем.

Досяжними виявляються часові інтервали перемикання приблизно 10^{-10} с (відповідно до цього швидкодія обчислення); місткості запам'ятовувального пристрою 10^7 біт/см² і швидкості зчитування до 10^9 біт/с.

7.1.1. Лазерний принтер

Для друку в обчислювальній техніці й в інших випадках часто застосовується лазерне випромінювання. Перевага лазерних принтерів полягає у більшій швидкості друку порівняно із звичайними способами друкування.

Принцип їх дії полягає у такому: світло, що надходить від оригіналу, перетворюється у фотоелектронному помножувачі (ФЕП) в електричні сигнали, які відповідним чином обробляються в електронному пристрої разом з ке-

руючими сигналами (для визначення розміру шрифту, складу фарби і т. ін.) і служать для модуляції лазерного випромінювання. За допомогою головки записування експонується розташована на валу плівка. При цьому лазерне випромінювання розділяється на ряд рівних за інтенсивністю часткових променів (шість або більше), які за допомогою модуляції за цих умов вмикаються або вимикаються.

Для цих цілей використовуються іонний аргонний лазер (потужність не більше 10 мВт), інжекційний напівпровідниковий лазер або гетеролазери.

7.1.2. Оптична цифрова пам'ять

На сьогодні необхідно застосовувати нові методи запису інформації, до яких пред'являються такі вимоги:

- вища місткість запам'ятовувального пристрою;
- вища ефективність зберігання архівних матеріалів;
- краще співвідношення між ціною і продуктивністю.

Це може бути досягнуто за допомогою запису і зчитування цифрової інформації.

Принцип дії цих пристроїв полягає у такому. Інформація (мова, музика, зображення, дані), що міститься у вигляді електричних сигналів, перетворюється у цифрові величини і виражається тим самим у вигляді послідовності імпульсів, яка записується в різній формі (у вигляді заглибин або отворів різної довжини і відстаней між ними, або магнітним способом) на диску запам'ятовуючого пристрою.

Під час зчитування світло, віддзеркалене (розсіяне у зворотному напрямі) від цих заглибин (отворів), модулюється і за допомогою фотоприймача перетворюється у відповідний електричний сигнал.

7.1.3. Лазерно-оптичне зчитування і запис інформації

За допомогою лазерно-оптичного зчитування в електронному приладі, аналогічному програвачу, неконтактним способом відтворюється записана на диску інформація (діаметр таких дисків може доходити до 30 см), причому застосовуються лазерні диски для зчитування, наприклад відеодиски, компакт-диски.

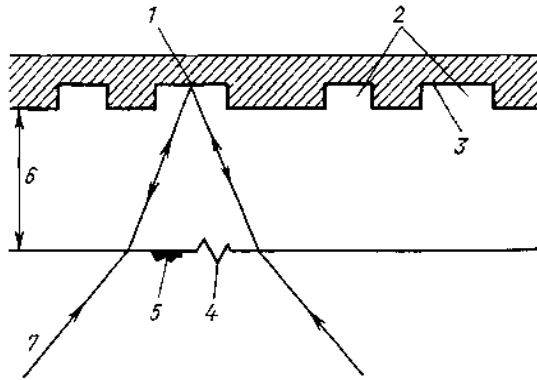


Рисунок 7.2 – Переріз відеодиска і пластинки з лазерним записом:
 1 – фокальна пляма, діаметром до 1 мкм; 2 – структура мікрозаглибин;
 3 – дзеркальне покриття; 4 – подряпина; 5 – частинка пилу;
 6 – прозорий захисний шар; 7 – промінь від лазера

При зчитуванні мікроскопічних структур використовуються ефекти дифракції та інтерференції світла. Оптична система для зчитування відеодисків складається з:

- He-Ne лазера (потужність кілька мВт), який випромінює лінійно поляризоване світло;
- призми Волластона (оптична довжина шляху залежить від напрямку поляризації);
- дільника пучка, який розділяє світло на три пучки із співвідношенням інтенсивності 1: 3 : 1 (дифракційні решітки, що працюють на просвіт з мінус першим, нульовим і плюс першим порядками дифракції);
- пластинки $\lambda/4$;
- об'єктива для зчитування, переміщуваний за принципом котушки з рухомим осердям у напрямі оптичної осі (мікрооб'єктив дуже малої маси, обмежений дифракцією);
- системи фотоприймачів (квадратних приймачів), а також циліндрової лінзи.

Розсіяне у зворотному напрямі від диска світло лазерного пучка відображається на квадратному приймачі.

Промені, використані для стеження за доріжкою, потрапляють на приймачі (рис. 7.3).

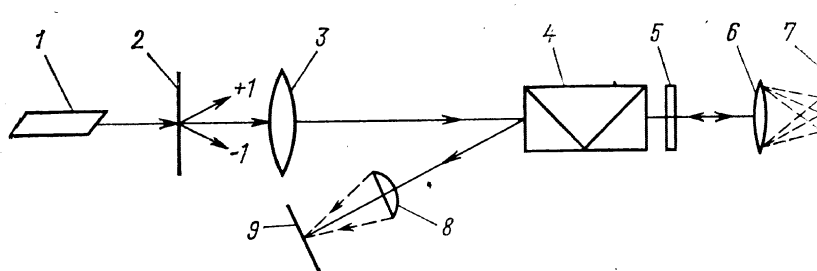


Рисунок 7.3 – Оптична схема головки для зчитування інформації, записаної на відеодиску: 1 – He-Ne лазер; 2 – решітка; 3 – оптика для узгодження; 4 – призма Волластона; 5 – пластинка $\lambda/4$; 6 – об'єктив для зчитування; 7 – відеодиск; 8 – циліндрова лінза; 9 – площина приймача

Таким чином, стає можливим формування керуючих сигналів для коректного фокусування променів для зчитування на інформаційній доріжці і забезпечення стеження за доріжкою.

В оптичній головці зчитування для цифрового лазерного програвача світло, що розсіяне назад від лазерної пластинки, потрапляє на фотодіоди F1–F4 (рис. 7.4). Фотоструми, що виникають при цьому, комбінуються один з одним таким чином, що стає можливим отримання як сигналів для радіальної корекції, так і керуючого сигналу для установки на різкість оптики для зчитування.

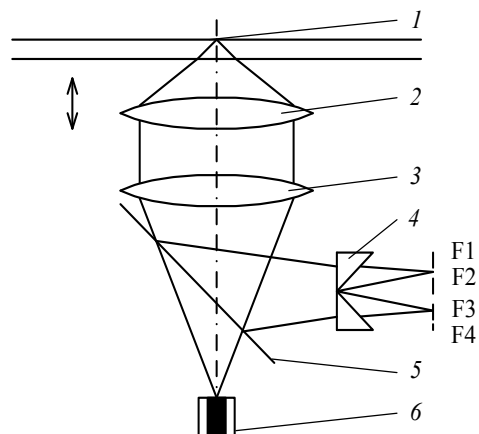


Рисунок 7.4 – Схема оптичної головки для зчитування лазерних дисків: 1 – пляма зчитування; 2 – об'єктив зчитування; 3 – оптична система для перетворення випромінюваного напівпровідниковим лазером хвильового поля в плоске хвильове поле; 4 – призма; 5 – напівпрозоре дзеркало; 6 – напівпровідниковий лазер; F1–F4 – фотоприймачі

Радіальний керуючий сигнал формується комбінацією струмів фотодіодів $(F1+F2) - (F3+F4)$. Якщо об'єктів для зчитування сфокусований на інформаційну площину диска, то після призми 4 з'являються два різкі зображення між фотодіодами $F1, F2$, а також $F3, F4$. Якщо фокальна площина об'єктива для зчитування знаходиться за або перед інформаційною площиною, то зображення стають нерізкими і рухаються одне до одного або одне від одного. Тоді за допомогою комбінації струмів фотодіодів $(F1+F2) - (F3+F4)$ може бути отриманий керуючий сигнал для установки на різкість головки зчитування.

При одноразовому запису інформації можливе багатократне її зчитування. Для цього на нижню сторону плоскої скляної пластини наноситься шар телуру. Дві круглі скляні пластини юстируються одна відносно одної таким чином, щоб шари телуру були захищені зовні скляними пластинами.

На шарах телуру, що знаходяться на внутрішніх сторонах пластин, записується інформація. Пластини забезпечені спіральною доріжкою (спіральною канавкою завглибшки приблизно $\lambda/4$), яка служить для юстирування зчитуючого або записуючого променя. Під час запису одного біта інформації в шарі телуру імпульсно підвищується потужність напівпровідникового лазера за термін 50 нс до 12 мВт, при цьому в шарі виникає отвір діаметром приблизно 1 мкм. Запис і зчитування здійснюються за допомогою однакового пристрою, причому при зчитуванні потужність напівпровідникового лазера зменшується до 1 мВт (рис. 7.5).

За допомогою таких методів запису і зчитування досягається місткість запам'ятовувального пристрою (діаметр диска 30 см) 10^{10} біт інформації (передня і задня сторони). Час доступу становить 150 мс.

У цих пристроях застосовуються газовий He-Ne лазер, а також напівпровідниковий лазер.

Сфери застосування цих пристроїв такі:

- запам'ятовувальні пристрої для зберігання банку даних з частим доступом;
- запам'ятовувальні пристрої для зберігання архівних даних з відстроченим доступом;
- зовнішній додатковий запам'ятовувальний пристрій з вільно вибраною адресацією в ЕОМ;

- відеодиски для навчання;
- відеодиски для бібліотек та архівів;
- запам'ятовувальні диски для керування і канцелярської справи;
- аудіодиски з високоякісним відтворенням звуку.

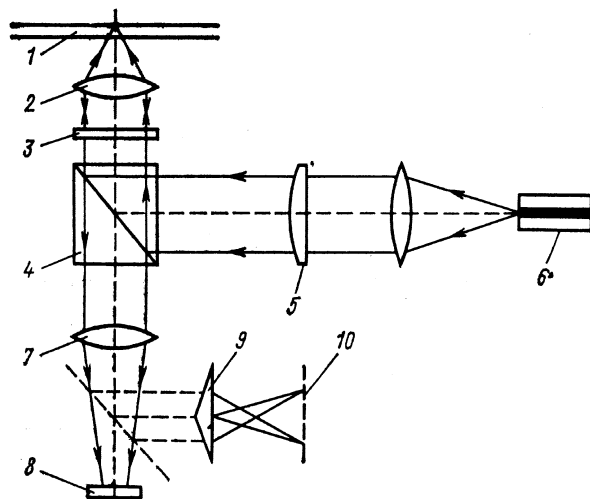


Рисунок 7.5 – Схема головки записування і головки зчитування для одноразового запису: 1 – лазерний диск; 2 – об'єктив зчитування; 3 – пластинка $\lambda/4$; 4 – залежний від поляризації дільник пучка; 5 – циліндрова лінза; 6 – напівпровідниковий лазер; 7 – оптична система; 8 – приймач для радіального контролю доріжки; 9 – призма Френеля; 10 – приймач для отримання сигналу і контролю положення фокальної плями

Під час оптичного цифрового запису інформації в магнітних шарах як носій використовується тонкий магнітооптичний шар. Принцип його дії полягає у такому.

Запис інформації відбувається завдяки тому, що маленькі ділянки магнітного шару нагріваються за допомогою сфокусованого лазерного променя, причому одночасно накладається магнітне поле, напруженість якого менша, ніж коерцитивна сила.

У нагрітих таким чином при накладеному магнітному полі ділянках зникає намагніченість (запис точки Кюрі). Зчитування здійснюється таким же лазером при зменшеній потужності, причому площа поляризації віддзерка-

леного від диска світла залежно від напрямку намагнічування маленьких ділянок повертається на величину 0,5–8 градусів (залежно від магнітооптичного шару) – магнітооптичний ефект Керра.

Оптичний пристрій головки записування і головки зчитування аналогічній системам, використовуваним в описаних вище пристроях зчитування і запису інформації.

Додатково необхідно звернути увагу на рис. 7.6.

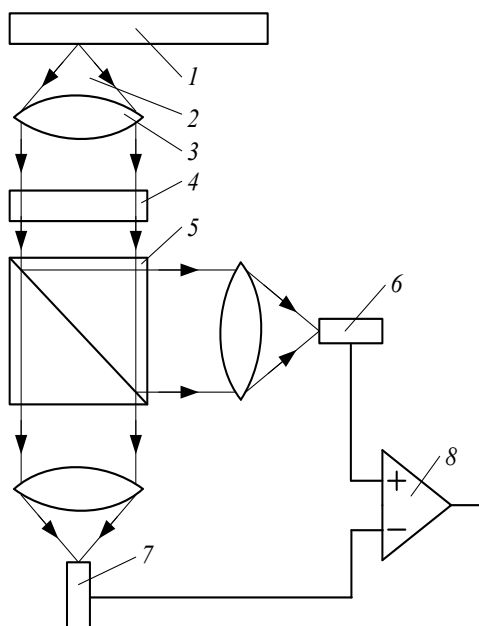


Рисунок 7.6 – Схема отримання сигналу за допомогою поляризаційного ефекту Керра:
 1 – магнітний диск; 2 – відбите світло; 3 – мікрооб'єктив;
 4 – фазова пластинка; 5 – дільник пучка; 6 – перший приймач;
 7 – другий приймач; 8 – диференціальний підсилювач

Світло, віддзеркалене від маленьких перемагнічених ділянок, є еліптично поляризованим і за допомогою відповідної фазової пластинки перетворюється в лінійно поляризоване.

Лінійно поляризоване світло розділяється на дві складові, які можуть реєструватися окремо. Обидва прийняті сигнали подаються на диференціальний підсилювач і посилюються. Посилений сигнал прямо пропорційний поляризаційному ефекту Керра.

Магнітооптичний запис має такі параметри:

- місткість пам'яті запам'ятовувального пристрою 10^5 біт/см²;
- кількість циклів (запис, зчитування, стирання) 10^6 ;
- вільно вибраний час доступу 150 мс;
- застосовується як оперативна пам'ять в ЕОМ.

Оптичний цифровий метод запису вимагає максимальної оптичної і механічної точності, а також:

- гранично малого об'єктива для зчитування, обмеженого дифракцією;
- об'єктива для зчитування (мікрооб'єктива) дуже малої маси (0,6 г і менше);
- радіальних відхилень об'єктива для зчитування з точністю ± 1 мкм;
- ширина розподілу інтенсивності плями зчитування по половині інтенсивності приблизно 1 мкм.

Цифровий оптичний запам'ятовувальний пристрій дозволяє проводити неруйнівне зчитування накопиченої інформації.

7.2. ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МІКРОЕЛЕКТРОНІЦІ

Тенденція постійної мініатюризації електронного устаткування і відповідного підвищення щільності друкованого монтажу зумовила перехід значної частини виробництва різних електронних приладів на поверхневий монтаж компонентів [5, 14]. Це, у свою чергу, потребувало переходу на нові методи монтажу і паяння. Розташування вмонтованих деталей на одній поверхні плати разом з контактними площинами зробило неможливим використання типового способу групового паяння хвилею розплавленого припою.

При цьому основа надійного бездефектного паяння компонентів закладається вже на етапі нанесення паяльної пасти на поверхню друкованої плати. Недостатня кількість паяльної пасти всього під одним з декількох сотень виводів може привести до відсутності необхідного контакту і, таким чином, до браку при виробництві готового виробу. Нанесення паяльної пасти можна здійснювати двома способами: дозуванням або трафаретним друком. Як приклад розглянемо спосіб трафаретного друку.

7.2.1. Трафаретний друк

Проблема нанесення паяльної пасти стала особливо гострою у міру розвитку технологій поверхневого монтажу компонентів у малогабаритних корпусах з багатьма виводами. Дотепер у всьому світі переважала технологія хімічного травлення трафаретів. Практично це співпадає із стандартною технологією травлення друкованих плат. Тільки матеріал для трафаретів використовувався інший – спеціальні сорти бронзи. На рис. 7.7 показано металевий трафарет після хімічного травлення.

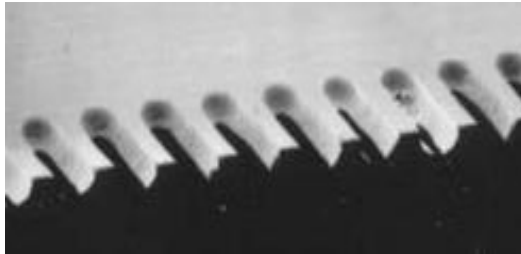


Рисунок 7.7 – Мікрофотографія металевого трафарету після хімічного травлення отворів

7.2.2. Лазерна обробка трафаретів

Вирішення проблеми виготовлення прецизійних трафаретів було запропоновано знову-таки за рахунок лазерної обробки матеріалів. Необхідні отвори можна виготовити шляхом прямої лазерної обробки матеріалів. При цьому, з одного боку, можна значно збільшити точність підтримки необхідної форми отворів, а з іншого боку – профіль отвору може бути значно наближеним до прямокутної форми. Результат лазерної обробки сталевого трафарету показано на рис. 7.8.

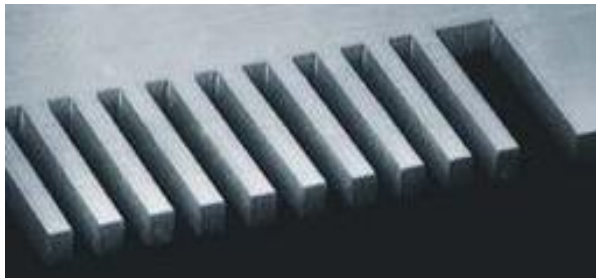


Рисунок 7.8 – Мікрофотографія сталевого трафарету після лазерної обробки отворів

Порівнявши рис. 7.7 і рис. 7.8, легко побачити різницю у двох технологіях. Дозування паяльної пасти, нанесеної за допомогою трафарету після лазерної обробки, буде значно точніше, що істотно знижує брак при паянні. Крім того, після лазерної обробки отвори мають злегка трапецієподібну форму стінок. Відкрита частина апертури зазвичай трохи більша з нижнього боку. Така форма отвору забезпечує краще відшаровування паяльної пасти від стінок при видаленні трафарету.

Друга значна перевага лазерної обробки трафаретів полягає у використуваному при їх виготовленні матеріалі. Відсутність операцій фотохімічного травлення дозволила відмовитися від використання спеціальних сортів бронзи. Для виготовлення трафаретів методом лазерної обробки використовують жорсткі сорти неіржавіючої сталі. Вона значно краще протистоїть зносу, ніж метали, які придатні для фотохімічного травлення.

Жорстка сталь також здатна краще працювати в тих ділянках, де тонка сітка металу з'єднує декілька великих апертур. Використання жорсткого матеріалу у поєднанні з лазерною обробкою дозволяє забезпечити формування отворів прецизійної форми за всією оброблюваною площею навіть при великих розмірах трафаретів.

Основні недоліки лазерних методів обробки пов'язані з високою вартістю устаткування для лазерної обробки матеріалів. Тому трафарети, виконані хімічним травленням, до цих пір широко використовуються при виготовленні друкованих плат з великим кроком виводів компонентів. Проте перехід на сучасні малогабаритні корпуси мікросхем з кроком виводів 0,5 мм і менше не залишає практично ніяких альтернатив лазерній обробці трафаретів.

7.2.3. Устаткування для лазерної обробки сталевих трафаретів

Виробництво лазерного устаткування, призначеного для обробки металевих трафаретів для нанесення паяльної пасти, було освоєно, наприклад, компанією LPKF у 1993 році. Численні модифікації лазерних верстатів, виконані за минулі роки, підтвердили правильність вибраного напрямку.

У міру розвитку електронної техніки і відповідних змін до вимог виробництва змінювалося, звичайно, й устаткування, що випускається. Зараз компанією LPKF випускається сімейство з чотирьох лазерних верстатів, призна-

чених для обробки сталевих фотошаблонів. У серії використовують твердотільні лазери на неодимі і газові лазери.

Верстат LPKF Stencil Laser SL600 HS є третьою розробкою в сімействі верстатів SL600, яка стала свого роду промисловим стандартом у галузі виробництва сталевих трафаретів. Від попередньої моделі верстат відрізняється принципово новим механічним приводом робочого стола, що значно збільшило продуктивність і точність обробки. Зовнішній вигляд верстата цієї серії наведено на рис. 7.9.

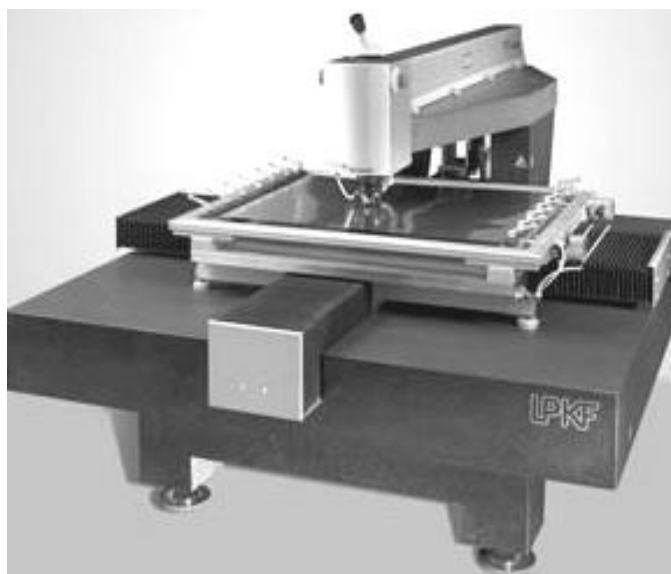


Рисунок 7.9 – Зовнішній вигляд верстата LPKF Stencil Laser SL600 HS

У верстаті LPKF Stencil Laser SL600 Micro Cut спостерігається тенденція зниження габаритів продукції, що випускається, яка примушує виробників все більше звертати свій погляд на сучасні типи малогабаритних корпусів мікросхем типу CSP і flip-chip. Крок розташування виводів у таких компонентів починає вимірюватися вже не міліметрами, а сотнями і навіть десятками мікрометрів. Відповідну точність повинен мати і трафарет для нанесення паяльної пасти під компоненти з таким кроком виводів.

Спеціально розроблене для нього лазерне джерело генерує високоякісний лазерний промінь, що допускає фокусування в пляму малого діаметра.

Це забезпечує можливість формування в трафареті отворів діаметром від 30 мкм.

Додатковою перевагою нового джерела лазерного випромінювання є можливість значно точнішого керування потужністю лазера, який працює в імпульсному режимі.

Завдяки цьому стає можливим значно точніше виготовляти малогабаритні отвори.

Верстат LPKF Stencil Laser SL800 HS є самим високопродуктивним верстатом сімейства Stencil Laser. Завдяки використанню потужного лазера вдалося помітно підвищити його продуктивність. Верстат також отримав новий потужніший привід робочого стола. Це дозволило підвищити в два рази граничну швидкість переміщення оброблюваного трафарету.

Збільшення робочої зони верстата до розмірів 800×800 мм дозволяє обробляти трафарети всіх стандартних розмірів, що є на цей час.

При розробці цього верстата особлива увага приділялася максимальному ступеню автоматизації процесу виробництва з мінімальним втручанням оператора. Також є пристрій автоматичного завантаження трафаретів на робочий стіл верстата. На рис. 7.10 наведено зовнішній вигляд цього верстата.

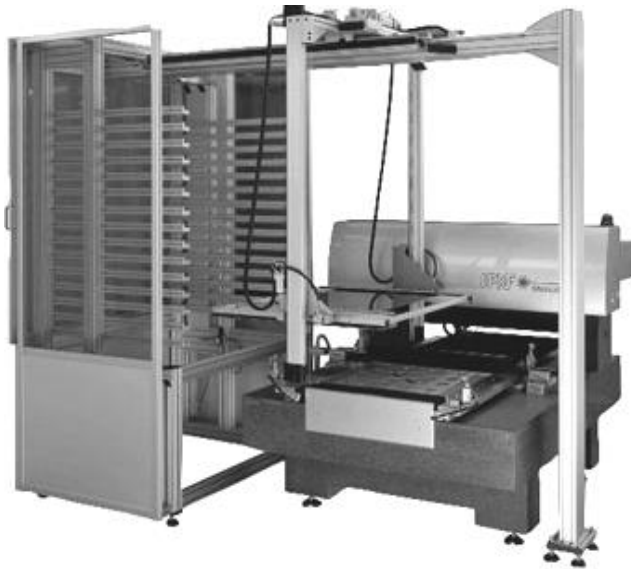


Рисунок 7.10 – Зовнішній вигляд верстата LPKF Stencil Laser SL800 HS

7.2.4. Полімерні трафарети

Вперше технологія з'єднання виводів кристала мікросхеми і підкладки, що отримала назву С4 (controlled collapsed chip connect), була успішно застосована компаніями IBM і Delco. Зараз практично всі корпуси мікросхем, що основані на переверненому розташуванні кристала, використовують сферичні краплі припою, так звані стовпчикові виводи, які компенсують механічну напругу, що викликається тепловою або механічною дією на кристал. Типовий приклад формування стовпчикових виводів на поверхні кристала наведено на рис. 7.11.

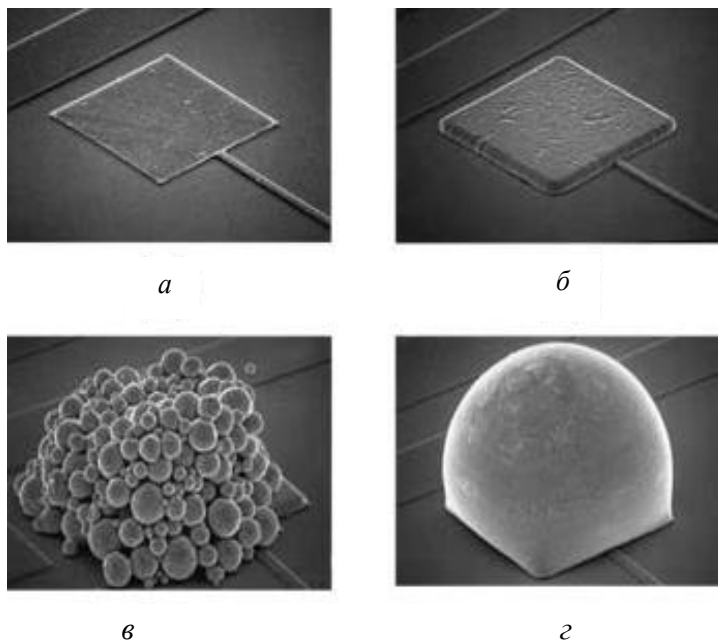


Рисунок 7.11 – Послідовні стадії формування стовпчикового виводу на контактній площині кристала мікросхеми

На алюмінієву контактну площину кристала (рис. 7.11, *a*) спочатку наноситься хімічне покриття з нікелю і золота (рис. 7.11, *б*). Нікелеве покриття служить для адгезії дифузійного бар'єру між припоєм та алюмінієвою площиною. Тонкий шар золота на поверхні нікелевого покриття служить для захисту від окислення.

На наступному етапі на поверхню контактної площини методом трафаретного друку наноситься спеціальна дисперсна паяльна паста

(рис. 7.11, в). Остаточне формування виводу здійснюється при оплавленні паяльної пасти за рахунок нагріву в середовищі інертного газу (рис. 7.11, з).

Оскільки діаметр і висота формованого виводу визначаються кількістю пасти, при виготовленні корпусу мікросхеми з багатьма виводами потрібна надзвичайно точна кількість пасти на кожній контактній площині. Ситуація ускладнена і тим, що крок виводів на кристалі може становити 250 мкм і менше.

Жоден із стандартних методів трафаретного друку не задовольняє поставленим вимогам. Навіть оброблені лазерним променем сталеві трафарети, не говорячи вже про бронзові, не забезпечують необхідної точності і повторюваності при нанесенні пасти.

У результаті досліджень у галузі розробки прецизійних трафаретів вибір зупинився на використанні спеціальних полімерних матеріалів.

Значна перевага полімерних трафаретів, порівняно з металевими, забезпечила їх широке використання не тільки при формуванні виводів на контактних площинах кремнієвих пластин, але і при стандартному поверхневому монтажі друкованих плат.

7.2.5. Устаткування для лазерної обробки полімерних трафаретів

Верстат для лазерної обробки полімерних трафаретів був розроблений на основі базової установки LPKF Stencil Laser SL600 HS, що добре себе зарекомендувала. Для переходу на обробку полімерних матеріалів потрібно було оснастити цей верстат іншим типом лазера. Річ у тому, що полімерна підкладка прозора для випромінювання неодимового лазера. Для досягнення оптимальних результатів обробки полімерних матеріалів потрібний ультрафіолетовий лазер.

Мала довжина хвилі випромінювання ультрафіолетового лазера і пов'язана з цим велика енергія фотонів приводить до руйнування хімічних зв'язків і видалення полімерних матеріалів здійснюється не тільки за рахунок його випаровування, але і за рахунок фотохімічного процесу руйнування. У результаті стінки оброблюваного отвору залишаються практично холодними і не потребують подальших операцій з видалення продуктів плавлення матеріалу.

Переваги обробки полімерних трафаретів ультрафіолетовим лазером добре видні при порівнянні рис. 7.12 і рис. 7.13.

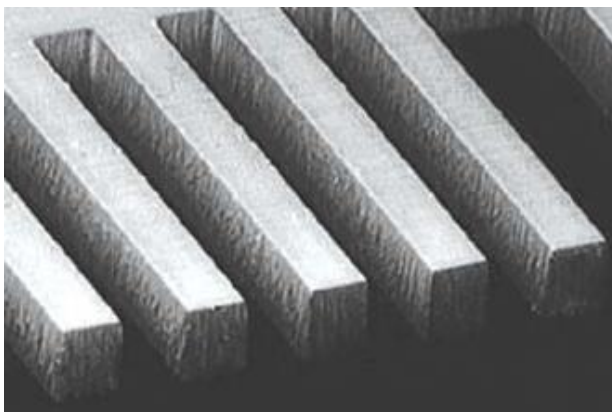


Рисунок 7.12 – Стінки трафарету після обробки неодимовим лазером

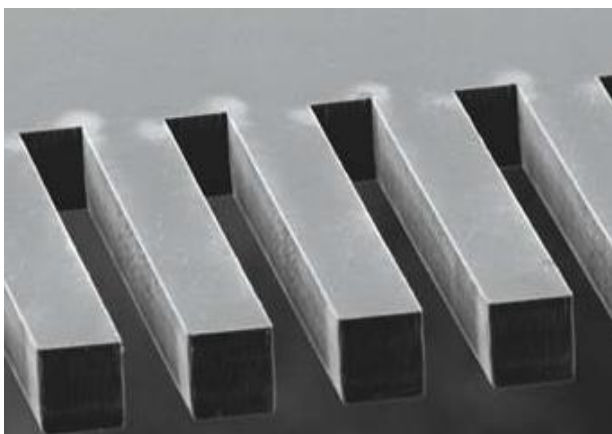


Рисунок 7.13 – Стінки трафарету після обробки ультрафіолетовим лазером

Завдяки фотохімічному руйнуванню молекул полімеру бічні стінки отворів трафарету залишаються абсолютно гладкими і не містять слідів плавлення матеріалу, характерних для металевих трафаретів.

7.2.6. Паяльно-ремонтний центр IR500A

Паяльно-ремонтні центри призначені, як правило, для виконання різних технологічних операцій з друкованими платами (рис. 7.14).

Паяльно-ремонтний центр IR500A включає два лазерні випромінювачі: верхній і нижній. Нижній інфрачервоний випромінювач призначений для

прогрівання обширної зони друкованої плати до 120–150 °С з метою зменшення перепаду температур і скорочення загального часу високотемпературної фази процесу паяння або випаювання.

Верхній інфрачервоний випромінювач (ІЧ-гармата) накриває зону нагріву з лінійними розмірами сторін від 10 мм до 55 мм.



Рисунок 7.14 – Паяльно-ремонтний центр IR500A

ІЧ-випромінювання здійснюється на довжинах хвиль 2–8 мкм, які є якнайкращими у розумінні співвідношення відбиваної теплової енергії, що поглинається: короткі інфрачервоні хвилі для цілей паяння не годяться у зв'язку з перегрівом темних поверхонь і недостатнім прогріванням блискучих виводів.

Нижній ІЧ-випромінювач може ще використовуватися для прискорення будь-яких операцій контактного паяння або демонтажу і попереднього нагріву плат для виключення ефекту «повітряна кукурудза», запобігання можливим мікротріщинам керамічних *chip*-компонентів при різкому нагріві в процесі контактного паяння.

Лазерний світлодіодний покажчик служить для підсвічування точки в центрі робочої зони, куди встановлюється виріб для паяння або випаювання. Цей верстат виконує операції паяння і випаювання з компонентами, що мають лінійні розміри від 10 мм до 55 мм, вмонтованими як на поверхню, так і на

отвори. До них належать: мікросхеми, різноманітні панельки, роз'єми та елементи складного профілю. Верстат можна використовувати і для локального інфрачервоного паяння групи довільних компонентів в обмеженій зоні плати (рис. 7.15).



Рисунок 7.15 – Паяння компонентів плати в обмеженій зоні

Після установки плати в робочу зону і достатнього прогрівання її нижнім ІЧ-випромінювачем (до 120–150 °С за 1–2 хв) лазерний приціл відсовується і на його місце точно над центром робочої зони встановлюється інфрачервона гармата верхнього ІЧ-випромінювача.

Потужність обох випромінювачів регулюється органами керування. В особливих випадках оператор може зменшити висоту розташування інфрачервоної гармати над платою для посилення нагріву при паянні або випаюванні мікросхем з корпусом, що дзеркально відбиває світло.

Після установки інфрачервоної гармати в робоче положення температура корпусу опромінюваної зони наростатиме з типовою швидкістю 2–5 °С за секунду.

Окрім розглянутих технологій, лазерний промінь знаходить застосування у мікроелектроніці та в інших галузях.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Назвіть переваги лазерних принтерів.
2. У чому полягають переваги оптичної цифрової пам'яті?
3. На яких принципах будується оптична цифрова пам'ять?
4. Назвіть основні параметри лазерного відеодиска.
5. Які ефекти використовуються при зчитуванні мікроструктур елементів оптичної пам'яті?
6. Які типи лазерів використовуються при оптичному записі інформації?
7. У чому особливості оптичного цифрового запису інформації в магнітних шарах?
8. Назвіть основні параметри магнітооптичного запису?
9. Вкажіть перспективи лазерного запису інформації.
10. Назвіть основні технологічні процеси, що виконуються за допомогою лазерів при виготовленні друкованих плат та інтегральних мікросхем.
11. Які функції лазерного променя при трафаретному друці?
12. У чому переваги обробки отворів друкованих плат за допомогою лазерів?
13. У чому полягають переваги лазерної технології порівняно з традиційними технологіями в процесі виготовлення трафаретів для інтегральних мікросхем?
14. Яке устаткування використовується для лазерної обробки сталевих трафаретів?
15. В чому переваги полімерних трафаретів порівняно із сталевими трафаретами?
16. Охарактеризуйте устаткування для лазерної обробки полімерних трафаретів.
17. Які операції виконує лазерний промінь в автоматизованих паяльно-ремонтних центрах?
18. Назвіть призначення верхнього і нижнього ПЧ-нагрівачів в паяльно-ремонтному центрі.
19. Які типи лазерів використовуються у процесі виготовлення інтегральних мікросхем?

8. ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРІВ У МЕДИЦИНІ

8.1. ІСТОРИЧНІ АСПЕКТИ ЛАЗЕРНОЇ МЕДИЦИНИ

Перший лазерний апарат був створений у 1960 році, а вже в 1962 році лазер на кристалі штучного рубіна був застосований в США для лікування сітківки ока. В середині 60-х років минулого століття за допомогою аналогічних лазерів в клініках Москви, Одеси і Куйбишева (нині Самара) було успішно проведено лікування пацієнтів з відшаровуванням сітківки ока шляхом її точкового «приварювання».

Лікування пацієнтів з глаукомою здійснювалося лазерним імпульсом за допомогою формування каналу для слізної рідини в передній очній камері, що забезпечувало стабілізацію внутрішньоочного тиску. Лазерна фотокоегуляція використовувалася для лікування меланоми судинної оболонки ока.

З 1965 року в Інституті проблем онкології України було розгорнуто широке вивчення біологічної і протипухлинної дії лазерного випромінювання. У тому ж році з'явилися перші публікації про застосування лазерів у дерматології.

Унікальні властивості лазерного випромінювання привернули увагу учених медико-біологічного профілю. У результаті цього були розпочаті дослідження цього випромінювання на живий організм.

З кінця 60-х років минулого століття низькоенергетичне лазерне випромінювання (НЕЛВ) почало застосовуватися в хірургії для передопераційної підготовки і післяопераційної терапії, з 1970 року – в стоматології, з 1974 року – в кардіохірургії.

У 1974 році Міністерство охорони здоров'я СРСР видало дозвіл на серійне виробництво і застосування першого *апарата лазерної терапії* (АЛТ). Цю подію можна вважати початком розвитку лазерної терапії як самостійного напрямку медицини. З тих пір було зареєстровано декілька сотень АЛТ і десятки методик клінічного застосування НЕЛВ.

У середині 70-х років минулого століття було встановлено посилення терапевтичного ефекту НЕЛВ при одночасній дії на опромінювану ділянку

постійним магнітним полем. Так почалися розробки методів поєднаної дії НЕЛВ з іншими видами енергії, яка застосовується у фізіотерапії.

Перші публікації про використання низькоінтенсивних гелій-неонових лазерів (ГНЛ) для проведення лазерної терапії в офтальмології відносяться до 1978 року. У гінекології практичне застосування лазерів почалося з використання випромінювання ГНЛ для дії на рефлексогенні зони і точки акупунктури у пацієнток з хронічними запальними процесами придатків матки.

У 1978 році в 2-му Московському медичному інституті була почата розробка методу внутрішньосудинного опромінювання крові ГНЛ за допомогою світловодів. У 1981 році група радянських учених була удостоєна Державної премії СРСР у галузі науки і техніки за створення, розробку і впровадження в клінічну практику нових лазерних хірургічних засобів та нових лазерних методів хірургічного лікування в абдомінальній, гнійній і пластичній хірургії.

З 1985 року лазерна терапія знаходить нове застосування у клінічній практиці при лікуванні злоякісних новоутворень, де НЕЛВ приводить до зміни властивостей препаратів, що вводяться парентерально і мають статичну дію по відношенню до тканин пухлини. Цей метод отримав назву фотодинамічної терапії.

У 80-х роках минулого століття в Москві створюється НДІ лазерної медицини під керівництвом академіка Скобсяніна О.К. У 1989 році Державної премії СРСР була удостоєна група учених за розробку методики лікування ішемічної хвороби серця на основі інтракорпорального опромінювання крові лазерним випромінюванням.

У 1991 році на базі всевітньо відомого підприємства космічного приладобудування Особливого Конструкторського бюро Московського енергетичного інституту було створено виробничо-конструкторське підприємство гуманітарних інформаційних технологій, нині відоме як Акціонерне товариство «МИЛТА – ПКП ГИТ», яке є провідним підприємством Росії у галузі квантової медицини.

АТ «МИЛТА – ПКП ГИТ» входить до складу асоціації «Квантовая медицина», яка сьогодні об'єднує більше п'ятдесяти компаній, підприємств, організацій і медичних установ, що безпосередньо входять у неї або тісно з нею співпрацюють.

Крім того, в Росії існує ще декілька фірм, які займаються розробкою і виготовленням медичних лазерних апаратів. Серед них можна відзначити

Науково-виробничий лазерний центр «Техника», Науково-виробниче підприємство «ЛАЗМА» (м. Москва), ГУП «КБ приборостроения» (м. Тула).

У Європі для координації дій розробників і користувачів лазерної медичної техніки була створена асоціація «Association Europeenne du Laser», у складі якої більше 15 країн. У США питаннями лазерної медицини займається товариство «American Society for Laser Medicine and Surgery».

В Україні у цей час основна робота, що спрямована на підвищення ефективності використання лазерів й інших джерел світла в медицині, планується і координується організаціями: Проблемною комісією Міністерства охорони здоров'я України та Академії медичних наук «Лазерні технології в медицині»; НДІ лазерної біології і лазерної медицини (м. Харків, директор канд. фіз.-мат. наук Коробов А.М.); Харківською медичною академією післядипломної освіти (завідувач кафедри фізіотерапії і курортології, д-р мед. наук, професор Тондій Л.Д.), а також Київською медичною академією післядипломної освіти імені П.Л. Щупика (завідувач кафедри медичної реабілітації, фізіотерапії і курортології, д-р мед. наук, професор Самосюк І.З.).

Основними виробниками лазерної апаратури в Україні є: Науково-виробниче об'єднання «Професор»; ТОВ «Медичні інноваційні технології»; Український центр лазерної медицини «АППАМЕД» (м. Київ); Науково-виробнича медико-біологічна корпорація «Лазер і здоров'я»; Харківське виробниче об'єднання «Радіореле»; Науково-виробнича фірма «Пульсар» (м. Харків); приватне мале виробниче підприємство «Фотоніка Плюс» (м. Черкаси).

У короткій історії лазерної медицини можна виділити декілька ключових етапів, що зробили найбільш істотний вплив на її розвиток [17]:

- розробка інструмента на базі світловодів, що дозволяє проводити внутрішньопорожнинну дію;
- створення методик і засобів для внутрішньосудинного лазерного опромінювання крові (ВЛОК);
- поєднання дії випромінюваннями з різними довжинами хвиль;
- поява напівпровідникових лазерів, що відрізняються кращими техніко-економічними показниками;
- розробка методик поєднання дії НЕЛВ з іншими видами енергії.

Посилений розвиток та ефективність лазерної медицини безпосередньо пов'язані з розвитком лазерних технологій і вдосконаленням лазерної техніки.

8.2. ЧАСТОТНО-ЧАСОВІ ПАРАМЕТРИ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У лазерній медицині прийнято розрізняти такі поняття, як:

- *частота електромагнітного випромінювання* (величина обернено пропорційна довжині хвилі);
- *частота генерації імпульсів лазерного випромінювання* (величина, яка визначається характером дії джерел накачування);
- *частота модуляції лазерного випромінювання* (величина, що характеризує процес модуляції безперервного або імпульсного лазерного випромінювання сигналом певної частоти).

8.2.1. Електромагнітне випромінювання оптичного діапазону

Лазерне випромінювання – це електромагнітне випромінювання оптичного діапазону, що має такі властивості, як *когерентність, монохромність, поляризованість і спрямованість*.

Оптичний діапазон електромагнітного випромінювання залежно від довжини хвилі розділяється на три основні спектри: ультрафіолетовий (УФ), видимий та інфрачервоний (ІЧ) спектри (табл. 8.1).

Таблиця 8.1 – Спектри електромагнітного випромінювання

Спектр	Складові частини спектра	Діапазон довжин хвиль, нм (10^{-9} м)	Смуга частот, ТГц (10^{12} Гц)
УФ спектр	короткохвильовий УФ	180–280	1670–1070
	середньохвильовий УФ	280–320	1070–940
	довгохвильовий УФ	320–400	940–750
Видимий спектр	фіолетовий	400–450	750–670
	синій	450–480	670–630
	блакитний	480–510	630–590
	зелений	510–580	590–520
	жовтий	580–590	520–510
	оранжевий	590–620	510–480
	червоний	620–760	480–395
ІЧ спектр	ближній ІЧ	760–2500	395–120
	середній ІЧ	2500–50 000	120–6
	дальній ІЧ	50 000–1 000 000	6–0,3

Частота електромагнітного випромінювання $f_{\text{ЕМВ}}$ при відомій довжині хвилі λ може бути визначена за формулою:

$$f_{\text{ЕМВ}} = \frac{c}{\lambda},$$

де c – швидкість світла, яку з 1973 року рішенням Генеральної асамблеї Міжнародного комітету з числових даних для науки і техніки прийнято вважати у вакуумі рівною $299\,792\,458 \pm 1,2$ м/с.

Чим вище частота $f_{\text{ЕМВ}}$ і коротше довжина хвилі λ електромагнітного випромінювання, тим більша енергія E його фотонів, яка може бути визначена виразом:

$$E = h f_{\text{ЕМВ}},$$

де h – постійна Планка, чисельно рівна $6,62176(36) \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

У межах оптичного випромінювання найбільшу енергію мають фотони ультрафіолетового випромінювання, яке через це називають «жорстким». Найбільш «м'яким», в цьому розумінні, є інфрачервоне випромінювання. Так, енергія фотона азотного лазера ультрафіолетового спектра ($\lambda = 337$ нм) становить 3,7 еВ; гелій-кадмієвого лазера фіолетового спектра ($\lambda = 441,6$ нм) – 2,8 еВ; лазера на парах міді зеленого спектра ($\lambda = 510$ нм) – 2,5 еВ; гелій-неонового лазера червоної ділянки спектра ($\lambda = 632,8$ нм) – 2,0 еВ; рубінового лазера червоного спектра ($\lambda = 694$ нм) – 1,8 еВ; арсенід-галієвого лазера інфрачервоного спектра ($\lambda = 800\text{--}900$ нм) – 1,4 еВ (1 еВ = $1,60201 \cdot 10^{-19}$ Дж). Навіть при низькій густині потужності (0,1–100 мВт/см²), яка використовується в лазеротерапії, короткохвильове лазерне випромінювання ультрафіолетового і видимого фіолетового спектра, що примикає до нього, а також синього спектра може порушити сильні внутрішньомолекулярні зв'язки, що істотно звужує його терапевтичні можливості.

Поглинання енергії фотонів викликає ослаблення або розрив між- і внутрішньомолекулярних зв'язків. Збільшення енергії квантів може приводити до селективного фотолітичного розщеплювання біомолекул і наростання вмісту їх вільних форм, що мають високу біологічну активність. Такі процеси виявляються переважно в діапазоні червоного спектра, енергія фотонів якого достатня для розриву сильних іонних і ковалентних зв'язків. Вибіркове поглинання лазерного випромінювання біомолекулами обумовлене збігом довжини хвилі ЛВ і максимумів спектра поглинання λ_{max} біомолекул. Так, наприклад, поглинання червоного спектра з $\lambda = 632$ нм здійснюється переваж-

но молекулами ДНК ($\lambda_{\max} = 620$ нм), цитохромоксидази ($\lambda_{\max} = 600$ нм), цитохрома ($\lambda_{\max} = 632$ нм), супероксиддисмутази ($\lambda_{\max} = 630$ нм) і каталази ($\lambda_{\max} = 628$ нм). ЛВ ближнього ІЧ спектра з довжиною хвилі $\lambda_{\max} = 800 - 1200$ нм поглинається переважно молекулами нуклеїнових кислот ($\lambda_{\max} = 820$ нм) і кисню [18].

Від довжини електромагнітної хвилі залежить і глибина проникнення НЕЛВ через шкіру. Проникна здатність випромінювання від ультрафіолетового до оранжевого діапазону постійно збільшується від 1–20 мкм до 2,5 мм, з різким збільшенням глибини проникнення в червоному діапазоні до 20–30 мм. Найбільша проникна здатність відповідає ближньому ІЧ діапазону при довжині хвилі від 950 до 1070 нм і становить до 50–70 мм. У дальньому інфрачервоному діапазоні відбувається різке зниження проникної здатності лазерного випромінювання. Залежність глибини проникнення l лазерного випромінювання в живі тканини від довжини хвилі приведено на рис. 8.1. Криві 1–3 відповідають проникненню потужності лазерного випромінювання на 75, 50 і 25 % від потужності, поданої на поверхню тканини. Крива 4 показує порогове значення потужності, менше за яке лазерне випромінювання впливу на біотканини не робить [19].

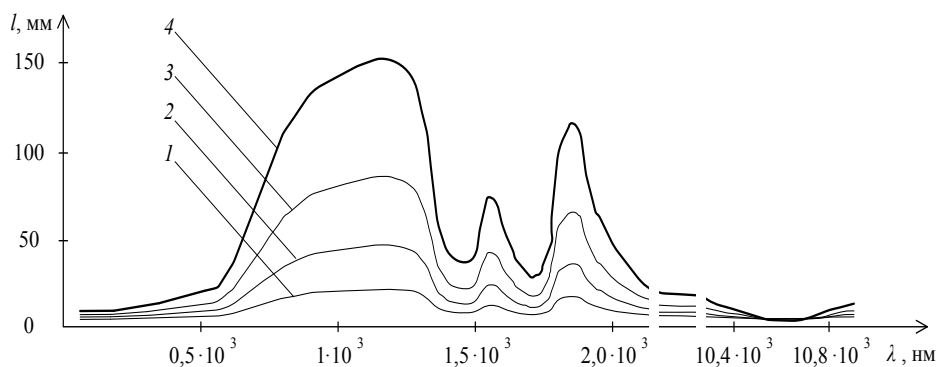


Рисунок 8.1 – Залежність глибини проникнення лазерного випромінювання в живі тканини від довжини хвилі

Довжина електромагнітної хвилі видимої частини спектра впливає і на ефективність дії випромінювання на зір. Ефективність прийнято оцінювати значенням відносної функції видимості F^* . Ця функція є залежністю монохроматичної чутливості ока людини, віднесеної до значення максимальної

чутливості, від довжини хвилі випромінювання, що сприймається [20]. Графік функції видності для денного зору показано на рис. 8.2. З графіка видно, що максимальна чутливість ока відповідає зеленому спектру ($\lambda = 550$ нм).

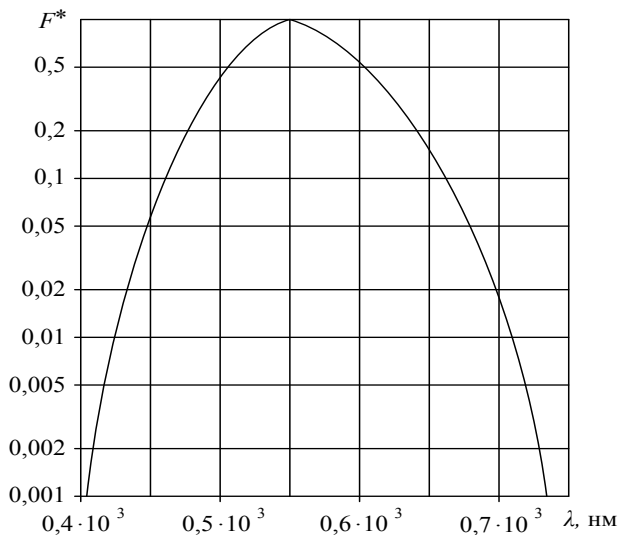


Рисунок 8.2 – Відносна функція видності спектральної чутливості ока людини

8.2.2. Режими генерації лазерного випромінювання

У загальному випадку лазери можуть генерувати електромагнітні коливання в трьох режимах:

- безперервно протягом тривалого часу (рис. 8.3, а);
- одноразово у вигляді одиночного спалаху;
- періодично з різною частотою генерації імпульсів (рис. 8.3, б).

Режим роботи лазера визначається характером дії джерел накачування лазера і законом зміни добротності його оптичного резонатора. Якщо резонатор має постійний рівень втрат і відповідно постійну добротність, то лазер працюватиме в режимі так званої вільної генерації. При цьому часовий характер вихідного випромінювання лазера визначається часовим характером накачування. При безперервному накачуванні випромінювання буде безперервним, а при імпульсному – воно матиме імпульсний характер. У газових, рідинних і напівпровідникових лазерах форма імпульсу випромінювання близька до форми імпульсу накачування. У твердотільних лазерах в початковій частині лазерного імпульсу є перехідна ділянка. В де-

яких випадках у випромінюванні твердотільних лазерів спостерігаються хаотичні пульсації інтенсивності, пов'язані з флуктуаціями добротності або довжини оптичного резонатора.

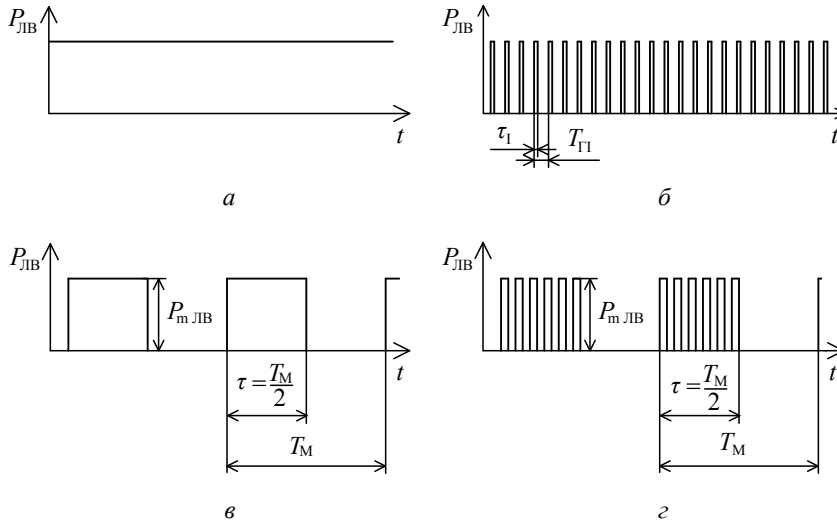


Рисунок 8.3 – Безперервне (а), імпульсне (б) і модульоване (в, з) лазерне випромінювання

Для отримання коротких імпульсів випромінювання лазера використовують режим модуляції добротності резонатора. Для цього під час дії накачування лазерний затвор вводить у резонатор додаткові втрати, що перешкоджають виникненню вільної генерації. Після виключення лазерного затвора енергія збудження, запасена в активному середовищі, випромінюється у вигляді короткого імпульсу лазерного випромінювання з тривалістю $\tau_1 = 10^{-7} - 10^{-9}$ с.

Режим модуляції добротності вдається отримати в твердотільних лазерах і в деяких видах газових лазерів. Модуляцію добротності можна здійснювати як при імпульсному накачуванні лазера (затвор відкривається тільки в кінці дії імпульсу накачування), так і при безперервному накачуванні, коли затвор періодично відкривається і закривається з частотою від декількох десятків Гц до декількох десятків кГц.

Використання імпульсного режиму генерації НЕЛВ дозволяє створювати ефективніші та оптимальніші умови для лазерної дії порівняно з безперервним випромінюванням, за рахунок високої концентрації світло-

вої енергії в імпульсі і можливості отримання хорошого терапевтичного ефекту при менших дозах і короткочасній дії на організм [17]. Частотна характеристика НЕЛВ важлива з двох основних причин. По-перше, завдяки підбору необхідної частоти генерації (за умови $\tau_1 = \text{const}$) можна регулювати середнє значення вихідної потужності лазерного випромінювання, яке визначається виразом:

$$P_{\text{СРЛВ}} = P_{m\text{ЛВ}} \tau_1 f_{\text{ГГ}},$$

а через нього і дозу дії.

По-друге, частота генерації НЕЛВ у ділянці частот від 1 до 500 Гц несе інформаційну компоненту, оскільки може виявитися резонансною до частот тих або інших змін функціональної активності структур або процесів в організмі. НЕЛВ з частотою генерації більше 1000 Гц зазвичай розглядається як квазібезперервне, оскільки при цьому організм виявляється чутливим тільки до енергетичної складової лазерного випромінювання.

При необхідності збільшення дози дії частоту генерації лазерного випромінювання піднімають до 3–5 кГц, а в тих випадках, коли необхідно викликати генералізований відгук організму, частоту генерації піднімають до 33 кГц.

Відмінності в діях безперервного та імпульсного НЕЛВ визначаються, перш за все, процесами синтезу РНК і ДНК. Безперервне випромінювання не впливає на інтенсивність синтезу РНК в тому інтервалі доз, в якому спостерігається значна дія на ДНК. В той же час НЕЛВ з різними частотами електромагнітного випромінювання і генерації стимулює синтез РНК, не впливаючи на синтез ДНК. Цей факт свідчить про наявність деяких нестационарних ефектів в біостимуляції лазерним випромінюванням.

8.2.3. Модуляція лазерного випромінювання

Модуляція безперервного або імпульсного лазерного випромінювання суттєво розширює ефективність впливу. Найчастіше для модуляції ЛВ використовуються прямокутні імпульси з шпаруватістю $Q = 2$. У цьому випадку середня потужність випромінювання зменшується в два рази і не залежить від частоти (рис. 8.3, в, з). Для регулювання потужності при модуляції ЛВ можна змінювати тривалість часового інтервалу τ . При цьому в режимі безперервної генерації (БГ) середнє значення потужності ЛВ визначатиметься виразом:

$$P_{\text{СРЛВ(БГ)}} = P_{m\text{ЛВ}} \frac{\tau}{T_M},$$

а в режимі імпульсної (ІГ) генерації – виразом:

$$P_{\text{СРЛВ(ІГ)}} = P_{m\text{ЛВ}} \frac{\tau_1 \cdot \tau}{T_{\text{ІГ}} \cdot T_M}. \quad (8.1)$$

Модуляцію лазерного випромінювання умовно можна розділити на два основні види:

- модуляція сигналами у вигляді послідовності прямокутних імпульсів з фіксованими (або змінними за певними законами) частотно-часовими параметрами [21];
- модуляція сигналами, синхронізованими з фізіологічними процесами в організмі людини (біосинхронізація) [17].

У методичних рекомендаціях щодо застосування з лікувальною метою лазерного випромінювання згадується близько 20 значень частот модуляції, застосування яких обґрунтоване і підтверджене клінічною практикою. Наприклад, у рефлексотерапії використовують низькі частоти модуляції НЕЛВ ($f_M < 100$ Гц), а при дії на зони – вищі ($f_M < 1500$ Гц) [22]. При проведенні ВЛОК для ефективного очищення поверхні біомембран від токсичних речовин рекомендується застосовувати частоту модуляції до 100 Гц.

Для формування модулюючих сигналів з високою точністю частотно-часових параметрів і широким діапазоном їх зміни найдоцільніше використовувати мікропроцесорні імпульсні системи, реалізовані на основі положень теорії цифро-імпульсних та імпульсно-цифрових перетворень [23].

Функціональну схему мікропроцесорного формувача модулюючих сигналів наведено на рис. 8.4 [24].

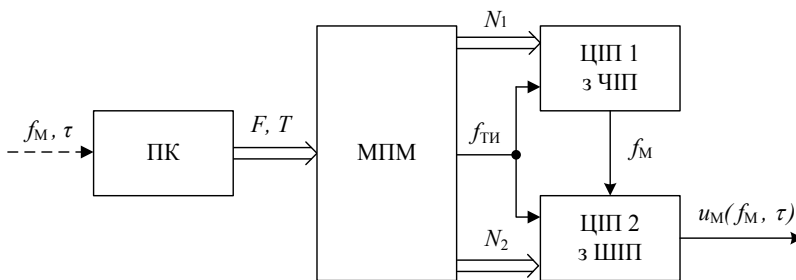


Рисунок 8.4 – Формувач модулюючих сигналів

Тут задання частотно-часових параметрів сигналу (f_M – частота і τ – тривалість імпульсів) здійснюється за допомогою пульта керування (ПК). Відповідно до заданих з ПК параметрів дії в мікропроцесорний модуль (МПМ) записуються коди таких чисел:

$$F = \frac{f_M (2^n - 1)}{f_{M \max}};$$

$$T = \frac{\tau (2^n - 1)}{\tau_{\max}},$$

де $f_{M \max}$, τ_{\max} – максимальні значення частоти модуляції і тривалості імпульсів; n – розрядність кодів чисел F і T .

Далі, в МПМ проводиться обробка кодів задання та обчислюються значення деяких чисел:

$$N_1 = \frac{(2^n - 1)^2 f_{M \min}}{F \cdot f_{M \max}};$$

$$N_2 = T,$$

де $f_{M \min}$ – мінімальне значення частоти модуляції.

Код числа N_1 перетворюється у першому цифро-імпульсному перетворювачі з частотно-імпульсним законом перетворення (ЦПП1 з ЧП) в імпульсну послідовність з частотою f_M проходження імпульсів:

$$f_M = \frac{f_{TI}}{N_1},$$

де f_{TI} – частота тактових імпульсів, значення якої необхідно вибирати з умови:

$$f_{TI} \leq (2^n - 1) f_{M \min}.$$

При цьому чим більше вибране значення частоти тактових імпульсів, тим більшою буде точність формування частотно-часових параметрів модулюючого сигналу.

Вихідний сигнал ЦПП1 з ЧП синхронізує роботу другого цифро-імпульсного перетворювача з широтно-імпульсним законом перетворення (ЦПП2 з ШП), де здійснюється перетворення коду числа N_2 у тривалість модулюючих імпульсів τ :

$$\tau = \frac{N_2}{f_{TI}}.$$

Таким чином, на виході ЦПП2 з ШПІ формується частотно-імпульсний модулюючий сигнал u_M з частотою $f_M = 1/T_M$ проходжень імпульсів і їх тривалістю τ . Процес формування модулюючого сигналу показано на рис. 8.5.

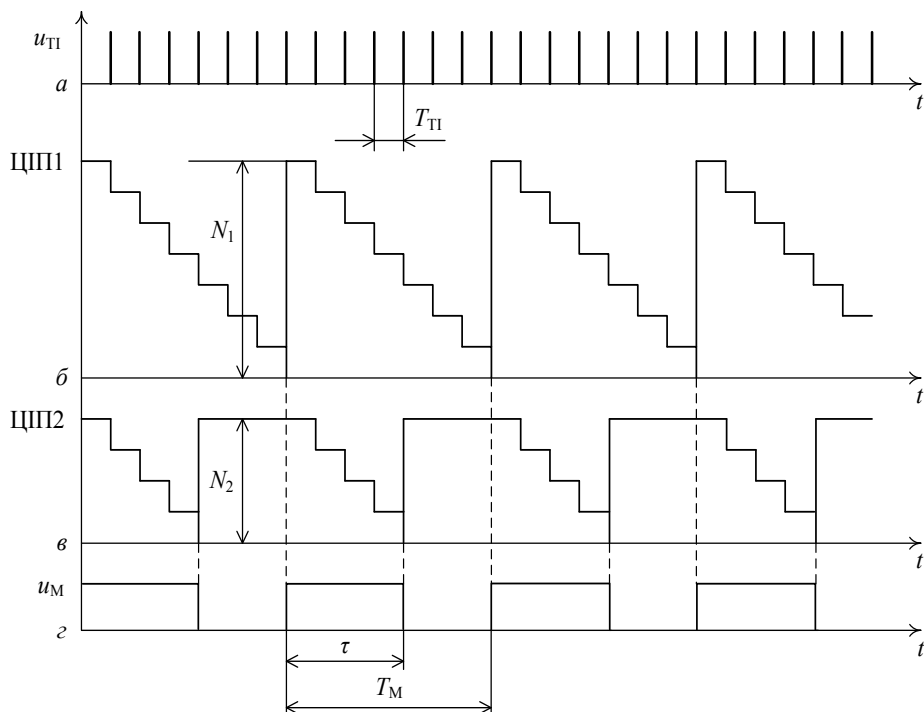


Рисунок 8.5 – Процес формування модулюючого сигналу

Найбільш перспективним для підвищення ефективності дії електромагнітним випромінюванням оптичного діапазону є застосування комбінації багаточастотної модуляції зі складним імпульсним режимом генерації і зміною частоти самого електромагнітного випромінювання протягом опромінювання (процедури) біологічного об'єкта. Таку дію здійснює вплив на макромолекули і молекулярні кластери відповідно до кореляції між параметрами випромінювання і характеристиками процесів релаксації [25].

Для реалізації складних законів модуляції ЕМВ, включаючи його частоту, достатньо ефективно можуть бути використані особливо яскраві (суперяскраві) напівпровідникові світловипромінюючі діоди з керованим кольором свічення [26].

8.3. ОСНОВНІ НАПРЯМКИ МЕДИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРІВ

Для діагностики захворювань використовують низькоенергетичне лазерне випромінювання (НЕЛВ). При цьому біосубстанція не змінює своїх властивостей у процесі взаємодії з лазерним випромінюванням. Такі ефекти, як розсіювання, проникнення й відбиття монохроматичного сигналу дозволяють за співвідношенням амплітуд і частот коливань визначати порушення того або іншого механізму регуляції.

Терапевтичний ефект дії НЕЛВ на організм можна охарактеризувати, як фотобіоактивацію. Під фотобіоактивацією розуміють зміни, пов'язані з впливом на біологічні процеси в тканинах, а саме фотохімічні й фотофізичні реакції.

Високоенергетичним лазерним випромінюванням (ВЕЛВ) здійснюється фотодеструктивний вплив. У цьому випадку тепловий, гідродинамічний та фотохімічний ефекти викликають незворотні зміни у тканинах, а саме деструкцію. Цей вид лазерної взаємодії використовується в лазерній хірургії.

8.3.1. Лазерна діагностика

Промінь лазера може використовуватися як поза організмом, так і для прямого аналізу органів і тканин пацієнта [27]. Так, лазерний промінь, що пропускається через вузький кварцовий капіляр, по якому прокачується спеціально оброблена кров, викликає флуоресценцію клітин крові. Флуоресцентне свічення потім уловлюється чутливими датчиками, а оскільки воно специфічне для кожного типу клітин, що проходять поодиноці через переріз лазерного променя, то з'являється можливість не тільки підраховувати їх загальну кількість в заданому об'ємі крові, але і отримувати дуже точні кількісні показники за кожним типом клітин. Цей принцип використаний у приладі, що називається *гемоцитометр*, продуктивність якого в сотні разів перевищує швидкість звичайної обробки проб крові лаборантом, оскільки останній проводить таке дослідження на око, аналізуючи і враховуючи кожну клітину під мікроскопом.

Ще більш довершеним діагностичним лазерним аналізатором є проточний *флуорометр*, в якому клітини перед прогоном через капіляр забарвлюються спеціальними імунофлуоресцентними барвниками, що дозволяють розрізнити не тільки окремі типи, але і різновиди типів як клітин крові,

так і будь-яких інших клітинних елементів, виділених з різних тканин організму для діагностики.

Лазерна діагностика нова і перспективна галузь лазерної медицини, практична реалізація якої ще тільки починається, більшість досліджень знаходяться на стадії експериментальної розробки і випробувань. Так, якщо промінь ультрафіолетового лазера CdNe з довжиною хвилі $\lambda = 327$ нм пропустити через кварцовий світловод по судинному катетеру і націлити на досліджувану тканину, наприклад, серцевого м'яза, то за інтенсивністю флуоресцентного свічення, що уловлюється через той же світловод, можна судити про концентрацію в тканині найважливішого метаболіту енергетичного обміну NADH, високий рівень якого відповідає інтенсивній продукції енергії клітинами, а дефіцит, навпаки, свідчить про недостатність енергозабезпечення і слабкість досліджуваної ділянки серцевого м'яза.

Флуоресценцію можна аналізувати і при деяких лазерних операціях на кровоносних судинах, коли проводять видалення атеросклерозних бляшок ексимерним лазером ХеСІ з довжиною хвилі $\lambda = 308$ нм. Одночасно проводиться аналіз флуоресцентного випромінювання від бляшки, що руйнується лазерним променем. Такий аналіз дозволяє виявити наявність відкладень кальцію, магнію, а також ліпідів, присутніх у бляшці, що дає можливість контролювати хід операції і таким чином самим робити висновок про ефективність видалення цих компонентів з ураженої судини. Досить точно визначати розташування бляшок можна і за допомогою лазера на барвниках ($\lambda = 480$ нм), якщо перед опромінюванням бляшки «фарбувати» β -каротином. У цьому випадку рівень індукованого лазерним випромінюванням свічення від бляшок буде набагато вище, ніж без барвника. Діагностика захворювань за допомогою лазерів (оптична біопсія) може використовуватися і в інших галузях, зокрема, в стоматології (для диференціації каріогенного від нормального дентину зуба) і в гінекології (для визначення передракових змін в епітелії шийки матки).

Для неінвазивних досліджень мікроциркуляції крові отримав застосування метод лазерної доплерівської флуометрії (ЛДФ), який на сьогоднішній день є основним за інформативністю про полягання функціонування механізмів регуляції кровотоку в мікроциркуляторному руслі. Реєстрованою характеристикою в методі ЛДФ є зміна перфузії, яка залежить від концентрації і швидкості еритроцитів в мікроциркуляторному руслі. Рух еритроцитів модулюється коливаннями судинної стінки, обумовленими

функціонуванням ендотелію, нейрогенною і міогенною регуляцією, а також зовнішніми для мікроциркуляторного русла коливаннями – серцевим ритмом з боку артерій і дихальним ритмом – з боку вен.

Чим вище амплітуда коливань, тим більш глибока модуляція судинної стінки внаслідок інтенсивнішого функціонування того або іншого активного механізму регуляції. Об'єктами нейрогенної регуляції в мікроциркуляторному руслі є артеріоли та артеріоловеноулярні анастомози, а міогенної регуляції – прекапілярні судини і прекапілярні сфінктери. Залежно від стану нейрогенного і міогенного тону кровотік розподіляється між нутривним руслом та анастомозом. Очевидно, що показник шунтування кровотоку обумовлений співвідношенням міогенного і нейрогенного тону. При вищому міогенному тонусі збільшується шунтуючий кровотік і збільшується значення показника шунтування.

Неінвазивний контроль стану кровотоку в системі мікроциркуляції може здійснюватися за допомогою лазерних аналізаторів «ЛАКК-02», які виробляються Науково-виробничим підприємством «ЛАЗМА» (м. Москва, Росія). У всіх аналізаторах передбачена можливість передачі даних в персональний комп'ютер. Програмне забезпечення до аналізаторів дозволяє формувати бази даних, здійснювати розрахунок амплітуд і частот коливань кровотоку, пов'язаних з ендотеліальною, нейрогенною і міогенною активністю, а також респіраторних і серцевих ритмів. Крім того, виконуються розрахунки нейрогенного і міогенного судинного тону, а також показника шунтування кровотоку по артеріоловеноулярних анастомозах.

За допомогою лазерних аналізаторів «ЛАКК-02» забезпечується декілька методів дослідження мікроциркуляції крові:

- одноканальний метод зондування тканини ЛВ для дослідження загального стану мікроциркуляції;
- двоканальний метод зондування ЛВ на одній довжині хвилі для дослідження синхронізації гемодинамічних ритмів у сусідніх зонах однієї ділянки або в симетричних ділянках;
- контроль мікроциркуляції крові в різних об'ємах тканини по глибині при двоканальному зондуванні у червоній і ближній інфрачервоній ділянках спектра випромінювання лазерів.

У медичній практиці лазерні аналізатори «ЛАКК-02» можуть бути використані для діагностики мікроциркуляції в кардіології, діабетології, травматології, ортопедії, проктології, дерматології, онкології і стоматології.

8.3.2. Лікувальна дія лазерів. Лазерна терапія

Фізіологічна й лікувальна дія НЕЛВ визначається декількома факторами, серед яких найважливішими є довжина хвилі використовуваного випромінювання (і відповідно енергія його фотонів) і тривалість впливу. Оскільки в лазеротерапії застосовують майже винятково низьку густину потужності лазерного випромінювання (до 100 мВт/см²), то вплив цього фактора менш істотний. У теперішній час найбільш затребуваним є *біостимулюючий* ефект лазеротерапії. Він визначає широкий діапазон терапевтичної дії й максимально виражений у лазерів червоного і ближнього інфрачервоного спектрів з довжиною хвилі від 620 до 1300 нм. Важливо відзначити, що лазерна біостимуляція виникає лише при нетривалих (до 3–5 хвилин) впливах. *Інгібіторний* ефект лазеротерапії, властивий в основному короткохвильовому випромінюванню ультрафіолетового спектра, а також спостерігається при тривалій експозиції, використовується значно рідше [28].

8.3.3. Застосування лазерів у хірургії

У лазерній терапії лазерне випромінювання не наносить пошкоджень тканинам організму через низьку потужність вживаних лазерів. При хірургічних втручаннях використовуються лазерні апарати, здатні генерувати ЕМВ з високою енергією, яка необхідна для видалення, механічного руйнування або термічного некрозу клітин, тканин або інших об'єктів, що підлягають ліквідації.

Хірургія є складною і багатогранною галуззю медицини і може бути класифікована за декількома ключовими показниками. Перш за все розрізняють *невідкладну* і *планову хірургію* [29].

Показаннями для невідкладної хірургії є великі травми, що супроводжуються масштабними пошкодженнями: ампутація, закриті і відкриті переломи кісток, вивих суглобів; будь-які масивні поверхневі або внутрішні кровотечі (шлункові, кишкові, маткові та ін.); великі за площею опіки третього і четвертого ступенів; більшість випадків військової і кримінальної травми; крупні хімічні опіки та обмороження.

У решті випадків пацієнта доставляють в клініку, уточнюють первинний діагноз і проводять термінові або відстрочені лікувальні заходи в стаціонарі або госпіталі залежно від тяжкості і характеру пошкоджень.

У переважній більшості сучасних клінік хірургічні відділення спеціалізовані. Спеціалізація оснований на розмежуванні окремих видів патоло-

гії, спільності хірургічних маніпуляцій при них, а також принципах до- і післяопераційного ведення пацієнтів.

У відділеннях загальної хірургії, в першу чергу, проводиться лікування з приводу видів патології органів черевної порожнини, що найбільш часто зустрічаються, таких як гострий апендицит, гострий холецистит, гостра кишкова непрохідність, грижі черевної стінки, виразкова хвороба шлунка і дванадцятипалої кишки, кровотечі з різних відділів травного тракту, травматичні пошкодження печінки, селезінки, нирок, гострий перитоніт, гострий панкреатит, спаєчна хвороба та ін.

Окрім перерахованих патологій, у відділеннях загальної хірургії проводиться лікування хворих з гострими гнійними запаленнями, трофічними виразками і тромбофлебітом вен нижніх кінцівок. Хірурги, що працюють у цій сфері, здійснюють також ампутацію кінцівок на всіх рівнях.

У всіх перерахованих випадках хірургічні лазери застосовуються тільки для зупинки і профілактики кровотеч, видалення жовчного міхура і відростка сліпої кишки, для роботи на паренхіматозних органах і для зварювання стінок порожнистих органів.

У серцево-судинній хірургії лазерні операції проводять для відновлення просвіту судин, ліквідації патологічних осередків збудження в серцевому м'язі, поліпшення кровопостачання міокарда кров'ю безпосередньо з лівого шлуночка, з'єднання розітнутих судин шляхом їх зварювання.

Торакальна хірургія включає різні види патології органів грудної порожнини. Тут лазерні операції проводять для реканалізації стравоходу і бронха, видалення невеликих пухлин.

Нейрохірургія – це ліквідація патологій, що включають травматичні пошкодження головного і спинного мозку, крововиливу в головний і спинний мозок, пухлини і паразитів головного і спинного мозку, спайки оболонок головного мозку, пухлини гіпофіза або епіфіза. У нейрохірургії лазерні апарати використовують для видалення пухлин головного і спинного мозку, а також для зварювання нервових стовбурів.

В оториноларингології лазерні операції виконують для видалення пухлин або рубців шляхом прецизійних втручань (мікрохірургічні операції), що проводяться під оптичним контролем, на гортані і в порожнині носа. Тут лазери використовуються також для зупинки носових кровотеч, тонзилектомії, парацентеза, при формуванні фістули гайморової пазухи.

Лазерні операції в офтальмології проводять для розтину окорушій-

них м'язів, ліквідації деяких пухлин ділянки ока, виконання розрізів і проколів очного яблука, коагуляції окремих ділянок сітківки при ретинопатіях, приварювання сітківки, що відшарувалася, при створенні фістули між передньою і задньою камерами ока у разі глаукоми, для видалення кришталика при катаракті, а також для кератопластики.

Хірурги-урологи проводять лазерні операції для часткової нефректомії, зупинки ниркових кровотеч травматичного походження, літотрипсії в будь-якій ділянці сечовивідного тракту, простатектомії у разі доброякісних новоутворень простати, кастрації при раку простати, для реканалізації сім'явивідних проток і сечовипускального каналу, зупинки кровотеч з поверхні сечового міхура і видалення пухлин у дистальних відділах сечоводу.

Хірургічні втручання за допомогою лазерів в акушерстві і гінекології проводять для клиновидної резекції і коагуляції яєчника, резекції шийки матки, а також при деяких патологічних змінах ендометрія.

У стоматології лазерні операції проводять для видалення каріозних мас, обробки пульпарної порожнини, видалення прикореневих кіст, а на слизистій порожнині рота – для ліквідації доброякісних новоутворень.

Лазерні операції в травматології і ортопедії проводять для обробки кісткової і хрящової тканин, наприклад, при розриві менісків колінного суглоба, маніпуляціях на міжхребетних дисках.

Методом лазерної хірургії в дерматології видаляються злоякісні (рак, меланома), потенційно злоякісні (базаліома) і крупні доброякісні (загострені конділоми) новоутворення на поверхнях шкірних покривів. Крім того, за бажанням пацієнта за допомогою лазера можуть бути усунені практично будь-які косметичні дефекти, включаючи татування.

Онкологи проводять лазерні операції для ліквідації злоякісних пухлин на ранніх стадіях, реканалізації просвіту порожнистих органів у невиліковних пацієнтів, лікування деяких поволі прогресуючих новоутворень, зокрема, раку сечового міхура і деяких пухлин головного мозку, усунення метастазів, наприклад, в печінці, для лікування багатьох доброякісних новоутворень.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. В якому році лазери почали використовуватися в медичній практиці?
2. Перерахуйте організації, що займаються розробкою та виробництвом лазерної медичної техніки в Україні.
3. Назвіть основні етапи розвитку лазерної медицини.

4. Вкажіть основні частотно-часові параметри низькоенергетичного лазерного випромінювання, що використовується в медицині. Дайте пояснення.
5. Перерахуйте, які частини спектра належать до оптичного діапазону.
6. Вкажіть залежність глибини проникнення лазерного випромінювання в тканину від довжини хвилі.
7. Вкажіть, як довжина хвилі електромагнітного випромінювання оптичного діапазону впливає на ефективність його сприйняття органами зору.
8. Перерахуйте основні режими генерації лазерного випромінювання.
9. Які терапевтичні переваги має лазерне випромінювання при роботі лазера в імпульсному режимі?
10. Наведіть формулу для розрахунку середнього значення потужності лазерного випромінювання в режимі імпульсної генерації. Дайте пояснення.
11. Вкажіть, на які основні види може бути розділена модуляція лазерного випромінювання.
12. Як змінюється потужність лазерного випромінювання при його модуляції? Наведіть основні розрахункові співвідношення.
13. Наведіть схему мікропроцесорного формувача прямокутних модулюючих імпульсів. Використовуючи часові діаграми, дайте пояснення принципу його дії.
14. Перерахуйте основні напрями медичного використання лазерів.
15. Вкажіть особливості використання лазерного випромінювання в медичній діагностиці.
16. У чому полягає фізіологічна і лікувальна дія низькоенергетичного лазерного випромінювання НЕЛВ?
17. Назвіть основні особливості використання лазерного випромінювання з терапевтичною метою.
18. Вкажіть основні правила техніки безпеки, яких повинні дотримуватися при проведенні процедур лазерної терапії.
19. У чому полягає особливість використання лазерного випромінювання в хірургії?
20. У яких галузях хірургії використання лазерного випромінювання є особливо ефективним і чому?

9. ЛАЗЕРНА ТЕРАПІЯ І ЛАЗЕРНІ ТЕРАПЕВТИЧНІ АПАРАТИ

9.1. ВЗАЄМОДІЯ НЕЛВ З БІОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Людина, як і будь-який біологічний об'єкт, є відкритою системою, що обмінюється з навколишнім середовищем речовиною та енергією. На підставі цього твердження В.М. Інюшин у 1970 році зробив припущення про те, що при оптимальних дозах дії лазерним випромінюванням здійснюється енергетичне «підкачування» (біостимуляція) організму, в результаті якої активуються саногенетичні процеси.

Ключовою ланкою в *біостимулюючому ефекті* лазерного випромінювання є активація ферментів, яка приводить до посилення біоелектричних і біосинтетичних процесів у клітинах. Активація біоелектричних ферментів приводить до збільшення рівня АТФ і інших речовин [18].

Найважливіший компонент подальших реакцій виявляється в інтенсифікації проліферації клітин, що визначає такі процеси, як швидкість росту і регенерації тканин, кровотворення, активність імунної системи і системи мікроциркуляції.

Стимулююча дія лазерного випромінювання на процеси регенерації найвиразніше виявляється для кісткових утворень, сполучної, епітеліальної і м'язової тканин, а також нервових волокон.

Стимуляція кровотворення виражається в збільшенні кількості формених елементів крові, зміні активності антизгортаючої системи крові, зниження швидкості осідання еритроцитів.

Активізація імунної системи характеризується підвищенням інтенсивності поділу і посиленням функціональної активності імунокомпетентних клітин (лімфоцитів, лейкоцитів та ін.), збільшенням утворення білків (імуноглобулінів і ін.). Це клінічно обумовлює виражений протизапальний ефект, особливо при тривалих поточних процесах. Імунокорегуюча спрямованість лазерного випромінювання визначає й інший клінічний ефект – десенсибілізуючий.

Одна з найбільш істотних особливостей дії НЕЛВ полягає в стимуляції мікроциркуляції, що, у свою чергу, позначається на стані трофічних про-

цесів у тканинах. На сьогодні під мікроциркуляцією розуміють не тільки судинну мікроциркуляцію, але і рух рідин поза судинним руслом. Мікроциркуляторні процеси тісно пов'язані з процесами метаболізму в тканинах.

Мікроциркуляція забезпечує обмін речовин у тканинній мікросистемі, куди входять клітини, специфічні для цієї тканини, сполучнотканинні утворення і фізіологічно активні речовини, що виділяються ними, закінчення нервових волокон. Мікроциркуляція відбувається безпосередньо в мікроциркуляторному руслі, яке можна розглядати як систему, що складається з трьох ланок. Перша ланка – кровеносна, яка, окрім капілярів, містить перед- і посткапіляри, артеріоли, венули, артеріоловенулярні анастомози. Друга ланка – лімфатична, складається з лімфатичних капілярів і посткапілярів. І, нарешті, третя ланка – міжклітинна, яка локалізована між стінками судин і клітинами відповідної тканини.

Окрім міжклітинної речовини, цей простір заповнений колагеновою волокниною і волокнами, що продукують біологічні (фізіологічно) активні речовини. В результаті поліпшення мікроциркуляції спостерігається виразний протинабряковий ефект. Зменшення набряку і напруги тканин, вимивання метаболітів обумовлює безпосередній ефект.

Таким чином, у результаті дії НЕЛВ можна в місці опромінювання виділити такі клінічні ефекти: регенераторний, імуностимулюючий, протизапальний, десенсибілізуючий, поліпшувачий мікроциркуляцію, протинабряковий і безпосередній.

У процесі дії НЕЛВ можна зареєструвати зміни метаболічних процесів не тільки в опромінюваній зоні, але і у віддалених місцях. Відбувається генералізація місцевого ефекту опромінювання з включенням багатьох функціональних систем. Загальні нейрогуморальні реакції починають розвиватися з моменту появи ефективних концентрацій біологічно активних речовин у тканинах, що піддалися лазерній дії. Генералізація здійснюється в основному через рідинні середовища організму.

Загальна відповідь формується і за рахунок нервово-рефлекторного механізму, що підтверджується динамікою електрофізіологічних показників (ЕЕГ та ін.), основних показників діяльності серцево-судинної системи, ряду біохімічних процесів. Всі ці зрушення носять відстрочений характер і виявляються лише через деякий час після дії НЕЛВ. Нервово-рефлекторні ефекти більш демонстративні при опромінюванні акупунктурних зон.

При аналізі впливу НЕЛВ на біологічні об'єкти прийнято виділяти

такі рівні реалізації відповідної реакції:

- субклітинні – виникнення збуджених станів молекул; утворення вільних радикалів; стереохімічна перебудова молекул; збільшення швидкості синтезу білка, РНК, ДНК; прискорення синтезу колагену і його попередників; зміна кисневого балансу та активності окислювально-відновлювальних процесів;

- клітинний – зміна заряду електричного поля клітини, її мембранного потенціалу, підвищення проліферативної активності і т.д.;

- тканинний – зміна *pH* міжклітинної рідини, морфофункціональної активності і мікроциркуляції;

- органний – нормалізація функції якого-небудь органу;

- системний та організменний – виникнення у відповідь комплексних адаптаційних нервово-рефлекторних і нервово-гуморальних реакцій з активацією симпатoadреналової та імунної систем.

Кінцевим результатом лазерної біостимуляції є підвищення резистентності організму і розширення меж його адаптації, тобто сприйнятливості до різних захворювань.

При цьому лазеротерапію можна розглядати як специфічний метод інтенсифікації процесів саногенезу шляхом спрямованої біоактивації. Послідовність змін, що відбуваються при лазерній біоактивації, можна подати схемою, показаною на рис. 9.1 [30].

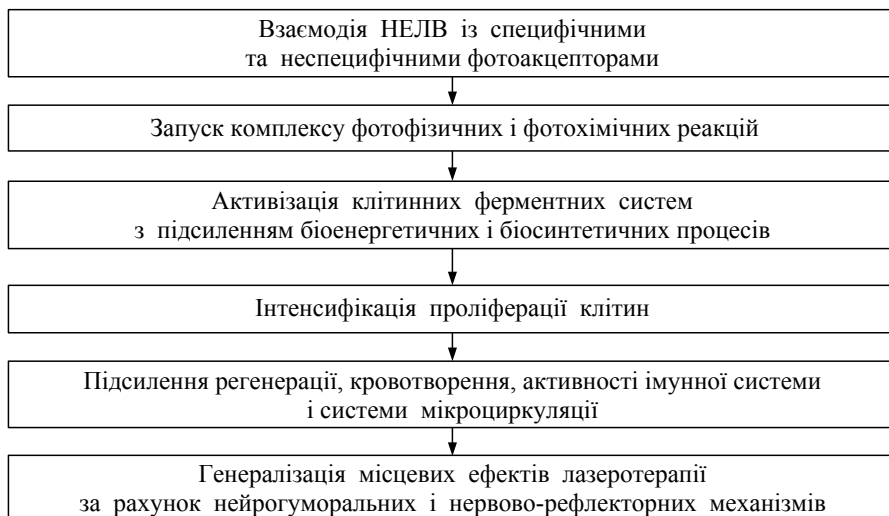


Рисунок 9.1 – Схема послідовності змін при лазерній біоактивації

Лазеротерапію призначають, як правило, при захворюваннях і пошкодженнях кістково-м'язової і периферичної нервової системи; при захворюваннях серцево-судинної, дихальної і травної систем; при захворюванні сечостатевої системи; при пошкодженнях і захворюваннях шкіри; захворюваннях ЛОР-органів; тимусзалежних імунодефіцитних станах; діабетичних ангіопатіях [18].

9.2. КЛАСИФІКАЦІЯ СПОСОБІВ ТЕРАПЕВТИЧНОГО ОПРОМІНЮВАННЯ НЕЛІВ

За способом доставки НЕЛІВ до зони дії розрізняють декілька способів лазеротерапії. У загальному випадку всі способи дії можуть бути розділені на *контактні* і *дистантні* (рис. 9.2).

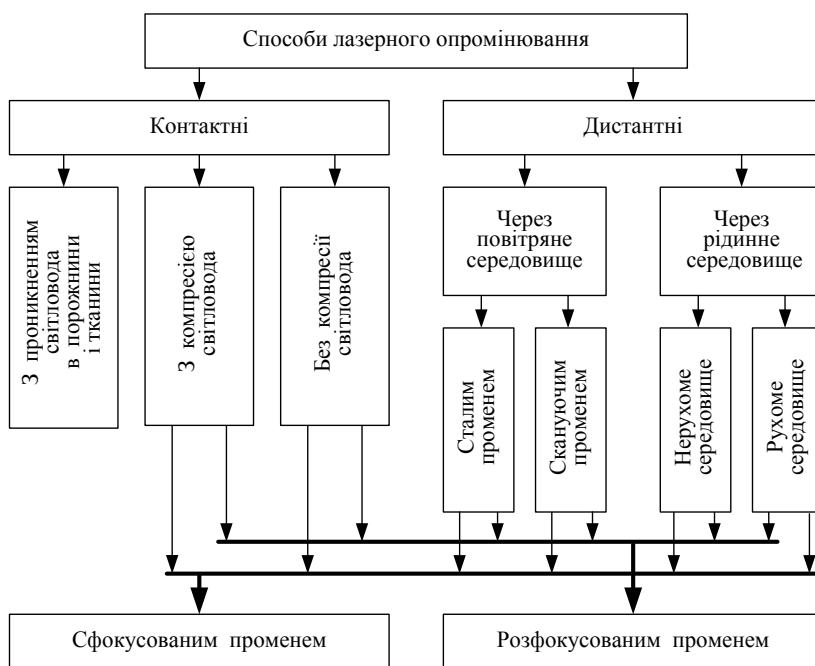


Рисунок 9.2 – Класифікація способів лазерного опромінювання

У свою чергу, контактні способи можуть бути розділені на три групи.

До першої групи належать способи дії з проникненням світловода:

– внутрішньоорганне (внутрішньопорожнинне) опромінювання – НЕЛІВ підводиться до ураженого органу за допомогою ендоскопічної апаратури.

тури (світловода або оптичних насадок-наконечників) в порожнини органів;

– внутрішньосудинне опромінювання крові – НЕЛВ проводиться за допомогою світловода, введеного через ін'єкційну голку або катетер у вену, артерію або прямо в серце;

– внутрішньотканинне (внутрішньокісткове, періостальне або міофасціальне) опромінювання – доставка НЕЛВ проводиться через світловод, введений у порожнисту голку.

Друга група способів – дія з компресією світловода, що полягає в дозованому тиску на шкіру торцем світловода або випромінюючою головкою. При використанні цього способу за рахунок зменшення неоднорідності тканини проникнення НЕЛВ підвищується у декілька разів.

Третя група способів – дія без компресії світловода, яка полягає в тому, що НЕЛВ за допомогою світловода або випромінюючої головки подається безпосередньо на шкіру без зазору між ними. При цьому вплив надають на акупунктурні і больові точки (гепатобіліарна і попереково-крижова зони, зони щитовидної і вилочкової залоз).

Дистантні способи припускають дію НЕЛВ шляхом розміщення випромінювача на деякій відстані від поверхні тіла. При цьому розрізняють дві основні групи способів дії. Відповідно до способів першої групи дію НЕЛВ надають через повітряне середовище, а відповідно до способів другої групи – через рідинне середовище (рис. 9.2).

Дія НЕЛВ через повітряне середовище може проводитися як нерухомим променем, так і скануючим, тобто таким, що переміщається по певній траєкторії. У першому випадку дії піддається незначна зона (3–7 мм²), а в другому – сумарна площа дії за одну процедуру може досягати 400 см².

Ефективність поєднання НЕЛВ з рідинним середовищем (зазвичай водою різної температури) полягає в тому, що, крім терапевтичної дії, самої водної процедури і безпосереднього лазерного опромінювання, що модулюється випадковими процесами у воді, пацієнт піддається дії активованої лазером води, що має особливі властивості.

Для проведення таких процедур лазерні випромінювачі вмонтовуються у ванні (дія через нерухоме середовище) або всередині душерів (дія через рухоме середовище).

Особливість окремих способів опромінювання полягають ще і в тому, що дія може виявлятися як сфокусованим променем, так і розфокусованим.

Розглянута класифікація способів опромінювання, використовуваних у лазерній терапії [31], є достатньо умовною, оскільки в складних випадках, як правило, поєднують декілька різних способів доставки НЕЛВ. Крім того, інтенсивний розвиток апаратури для лазерної терапії дозволяє не тільки удосконалювати відомі способи дії, але і створювати нові.

9.3. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АПАРАТІВ ЛАЗЕРНОЇ ТЕРАПІЇ

На сьогодні номенклатура лазерних терапевтичних апаратів надзвичайно широка і різноманітна. Одні з них призначені для роботи в спеціалізованих кабінетах і відділеннях (ендоскопія, гінекологія, урологія, проктологія, оториноларингологія, стоматологія, акупунктура), інші – для фізіотерапевтичних цілей широкого профілю. З урахуванням цієї обставини всі апарати для лазеротерапії можуть бути розділені на спеціалізовані і багатопільові [30].

Основними функціональними блоками апаратів лазерної терапії є такі (рис. 9.3):

- БЛВ – блок лазерного випромінювання;
- СНТВ – система наведення і транспортування випромінювання;
- БКК – блок керування і контролю;
- БВІ – блок відображення інформації;
- ВПВ – вимірник потужності випромінювання;
- БЖ – блок живлення;
- ДСП – датчик (система датчиків) стану пацієнта.

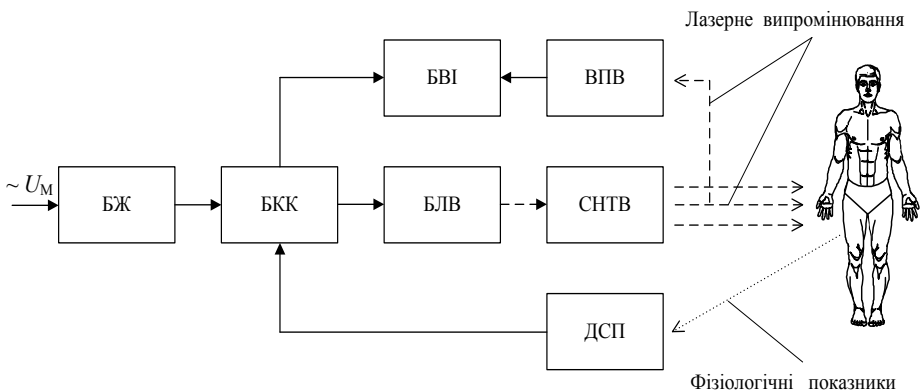


Рисунок 9.3 – Функціональна схема апарата лазерної терапії

БЛВ може містити один або декілька випромінювачів для моно- або біхроматичної лазеротерапії (зазвичай червоний та інфрачервоний спектри).

СНТВ є, як правило, деякою сукупністю лінз і дзеркал або волоконним світловодом. Останній варіант є найбільш зручним, проте в світловоді дещо знижується когерентність і поляризованість лазерного випромінювання. У деяких апаратах передбачена розфокусуюча насадка, яка одночасно дозволяє опромінювати чималі ділянки тіла. Для досягнення цієї ж мети застосовуються скануючі системи. При необхідності опромінювання внутрішніх органів АЛТ комплектують різними оптичними насадками.

БКК залежно від функціональних можливостей апарата дозволяє задавати і відпрацьовувати тривалість опромінювання, його потужність і частоту модуляції з урахуванням стану пацієнта. Крім того, тут може бути передбачена можливість контролю за виникненням аварійних ситуацій і відповідна сигналізація, а також сигналізація про закінчення часового інтервалу опромінювання.

Для відображення параметрів опромінювання служить БВІ. Чим вище ступінь автоматизації процесу опромінювання, тим більшою мірою полегшується праця медичного персоналу.

ВПВ служить для вимірювання потужності лазерного випромінювання на виході СНТВ. Відображення інформації про реальне значення потужності випромінювання здійснюється в БВІ. Відсутність вимірника потужності обмежує можливості апарата не тільки за контролем вихідної потужності ЛВ, але і за дозуванням дії.

БЖ служить для перетворення змінної напруги U_M живильної мережі в постійну з рівнем, необхідним для електроживлення БЛВ та інших блоків апарата.

ДСП призначений для контролю за станом пацієнта з метою корегування параметрів дії або їх модуляції.

У портативних АЛТ для електроживлення БЛВ досить часто служить батарея гальванічних елементів.

Імпульсна модуляція постійної напруги БЖ здійснюється блоком БУК.

Основними технічними даними АЛТ є: довжина хвилі випромінювання, режими генерації випромінювання, вихідна потужність випромінювача, параметри системи наведення і транспортування випромінювання, площа дії, напруга електроживлення (типи і параметри гальванічних елементів при автономному електроживленні), габаритні розміри і маса апарата.

Від довжини хвилі ЛВ залежить глибина його проникнення через шкіру і коефіцієнт віддзеркалення, селективність взаємодії з біомолекулами, функція видності, а також енергетична потужність фотонів або жорсткість випромінювання.

Режим генерації ЛВ може бути не тільки безперервним, але й імпульсним. Остання обставина дозволяє використовувати високу концентрацію світлової енергії в імпульсі, що забезпечує хороший терапевтичний ефект.

Вихідна потужність ЛВ апарата обумовлює густина потужності дії, дозволений діапазон якої становить від 0,1 до 100 мВ/см². Якщо в АЛТ передбачена можливість регулювання потужності випромінювання, то це істотно розширює діапазон терапевтичних дій. Відсутність можливості регулювання потужності, навпаки, не дозволяє використовувати один і той же апарат для реалізації різних методів лазерної терапії. Наприклад, малопотужний апарат (до 1 мВт) не придатний для надання дії на велику площу при ураженні шкіри. АЛТ великої потужності (100–200 мВт) не підходить для ВЛОК, де цілком достатньо потужності ЛВ в діапазоні 0,5–5 мВт.

За допомогою системи наведення і транспортування здійснюється доставка ЛВ безпосередньо до місця дії. У тому випадку, якщо в апараті відсутній світловод, неможливо провести процедуру ВЛОК або спрямувати лазерний промінь через гастроскоп при виразковій хворобі шлунка. Відсутність розфокусувальної насадки або системи сканування не дозволяє здійснити одночасне опромінювання обширної зони. Дуже великий діаметр випромінювальної головки або торцевої частини світловода не дозволяє проводити лазерну стимуляцію точок акупунктури (діаметр корпоральних точок 5–7 мм, аурикулярних – 1–2 мм). Від площі світлової плями залежить також такий важливий показник, як густина потужності випромінювання.

Масогабаритні показники АЛТ, параметри електроживлення і енергоспоживання дозволяють оцінити можливість його використання в тих або інших випадках: спеціально обладнані кабінети лазеротерапії в медичних установах або польові умови.

9.4. УНІВЕРСАЛЬНІ АПАРАТИ ЛАЗЕРНОЇ ТЕРАПІЇ «МУСТАНГ-2000»

Висока універсальність АЛТ серії «Мустанг» (Науково-виробничий лазерний центр «Техника», м. Москва, Росія) забезпечується блоковим

принципом їх побудови [17]. При цьому у складі кожної моделі можна умовно виділити три повністю сумісні і поєднувані частини: базовий блок, випромінюючі головки і насадки.

Базовий модуль є основою кожного комплекту і є сукупністю блоків живлення, керування, контролю, вимірювання потужності ЛВ і відображення інформації. Цей модуль дозволяє задавати режими випромінювання і його параметри: частоту, потужність, тривалість дії та ін. Контроль як середньої, так і імпульсної потужності випромінювання здійснюється вимірником. Базові модулі апаратів серії «Мустанг» відрізняються функціональними можливостями та умовно можуть бути розділені на два типи: ЛВ з фіксованими параметрами і з набором параметрів, що довільно задаються (з числа можливих значень).

До базових модулів підходять всі випромінюючі головки, які, у свою чергу, використовуються зі всілякими насадками.

Найбільш універсальними АЛТ є апарати «Мустанг-2000», що випускаються в дво- і чотиріканальному виконанні (рис. 9.4).

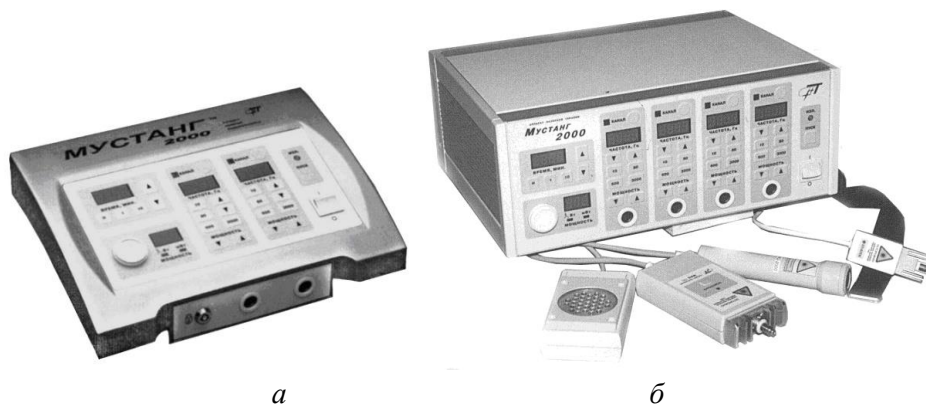


Рисунок 9.4 – Апарати лазерної терапії «Мустанг-2000» в двоканальному (а) і чотиріканальному (б) виконанні

Основними відмітними особливостями АЛТ «Мустанг-2000» є такі:

- два або чотири (залежно від варіанта виконання) незалежні канали для підключення лазерних і світлодіодних випромінюючих головок з можливістю регулювання потужності від мінімального до максимального значень і установки частоти модуляції від 0,5 до 3000 Гц по кожному каналу;
- імпульсний, модульований або безперервний режим роботи ви-

промінюючих головок;

– модуляція лазерного випромінювання зовнішнім сигналом, у тому числі і в режимі біосинхронізації, коли потужність лазерного випромінювання змінюється синхронно з частотою пульсу і дихання пацієнта;

– вимірювання і цифрова індикація імпульсної (миттєвої) і середньої потужності випромінювання лазерних головок з довжиною хвилі 630–960 нм;

– установка тривалості процедури в діапазоні від 1 секунди до 90 хвилин;

– захист від несанкціонованої зміни режиму роботи під час процедури;

– звукова сигналізація і відключення випромінюючих головок після закінчення часового інтервалу процедури;

– з лазерними і світлодіодними випромінюючими головками використовуються більше 50 типів насадок (магнітні, дзеркальні, ЛОР, стоматологічні, урологічні, гінекологічні та ін.), які істотно розширюють функціональні можливості апарата.

Додаткові технічні дані базових модулів апаратів «Мустанг-2000» наведено в табл. 9.1.

Таблиця 9.1 – Технічні дані базових модулів АЛТ «Мустанг-2000»

Найменування показників	Од. вим.	Значення	
		двоканальний варіант	чотириканальний варіант
Максимальна кількість одночасно працюючих каналів	шт.	2	4
Напруга живлення	В	220 ± 22	
Частота напруги живлення	Гц	50 ± 0,5	
Споживана потужність, не більше	ВА	14	28
Тривалість установки робочого режиму	с	4	
Габаритні розміри базового модуля, не більше	мм	275×196×105	340×240×140
Маса	кг	1,5	4,8
Діапазон робочих температур	°С	+10 – +35	
Середня тривалість роботи без технічного обслуговування	год	5000	

АЛТ «Мустанг-2000» за способом захисту пацієнта та обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом виконані по класу захисту II, тип ВF.

Технічні дані випромінюючих головок до АЛТ «Мустанг-2000» наведено в табл. 9.2.

Таблиця 9.2 – Технічні дані випромінюючих головок АЛТ «Мустанг-2000»

Тип випромінюючої головки	Оптичний діапазон	Довжина хвилі, нм	Потужність випромінювання, не менше, мВт
1	2	3	4
<i>Матричні випромінювачі</i>			
МЛЮ1К(1) (10 лазерних діодів)	Інфрачервоний	890	60000
МЛС-1 («Эффект») (2)	Інфрачервоний	890	5000 (імп.)
	Інфрачервоний	880	60
	Червоний	630	3000 (імп.)
	Зелений	530	3
	Синій	470	20
<i>Матричні випромінювачі з 7 світлодіодів (3,4)</i>			
МСО2	Інфрачервоний	880	100
МСО3	Червоний	630	15
МСО4	Жовтий	590	15
МСО5	Зелений	530	10
МСО6	Синій	470	15
<i>Лазерні випромінюючі головки типу ЛО</i>			
ЛО1(1)	Інфрачервоний	890	5000 (імп.)
ЛО2(1)	Інфрачервоний	890	9000 (імп.)
ЛО3(1)	Інфрачервоний	890	15000 (імп.)
ЛО4(1)	Інфрачервоний	890	20000 (імп.)
ЛО5(1)	Інфрачервоний	890	40000 (імп.)
ЛО6(1)	Інфрачервоний	890	60000 (імп.)
ЛО7(1)	Інфрачервоний	890	80000 (імп.)
ЛОК1(1)	Червоний	630–650	3000 (імп.)
ЛОК2(1)	Червоний	630–650	5000 (імп.)

Закінчення табл. 9.2

1	2	3	4
КЛО1(4)	Червоний	670	5
КЛО2(4)	Червоний	670	24
КЛО3(4)	Червоний	630	10
КЛО4(4)	Червоний	630	20
КЛО5(4)	Інфрачервоний	830	30
КЛО6(4)	Інфрачервоний	830	200
КЛО7(4)	Інфрачервоний	1300	5
<i>Лазерні випромінюючі головки типу МЛО</i>			
МЛО2Б(4)	Інфрачервоний	830	20
МЛО2В(4)	Інфрачервоний	830	20
МЛО3А(4)	Інфрачервоний	1300	1,5
МЛО3Б(4)	Інфрачервоний	1300	5
МЛО5(4)	Червоний	670	15
МЛО6(4)	Червоний	630	4,5
МЛО7(4)	Інфрачервоний	780	10
МЛО8(4)	Інфрачервоний	960	20

У табл. 9.2 прийнято такі позначення:

- (1) – імпульсний режим роботи (тривалість імпульсу 100–200 нс);
- (2) – імпульсний і модульований режими залежно від випромінювача;
- (3) – є варіанти з 7 та 31 світлодіодом;
- (4) – безперервний і модульований режими роботи.

Одним з найперспективніших напрямів розвитку лазерної медичної апаратури і методології лікування є біосинхронізація частотно-часових параметрів дії лазерного випромінювання з ендogenousними біоритмами конкретного пацієнта. Проте унаслідок принципової труднощі реалізації такого режиму дії ЛВ, при якому його синхронізація здійснювалася б зі всіма ендogenousними біоритмами, зазвичай для кожного пацієнта обмежуються визначенням трьох частот внутрішніх ритмів, як це зроблено в апаратах «Мустанг-БИО», де використовується спеціальна приставка «БИО», яка поставляється разом з датчиками пульсу і дихання та забезпечує модуляцію лазерного випромінювання (рис. 9.5). Підключення приставки до базового модуля апарата «Мустанг» здійснюється через адаптер і роз'єм, розташований на задній стінці модуля [32].

Датчики пульсу і дихання підключаються до роз'єму, розташованого

на задній стінці приставки «БИО». Датчик для вимірювання параметрів пульсу реалізований на оптоелектронній парі фотодіод-світлодіод.

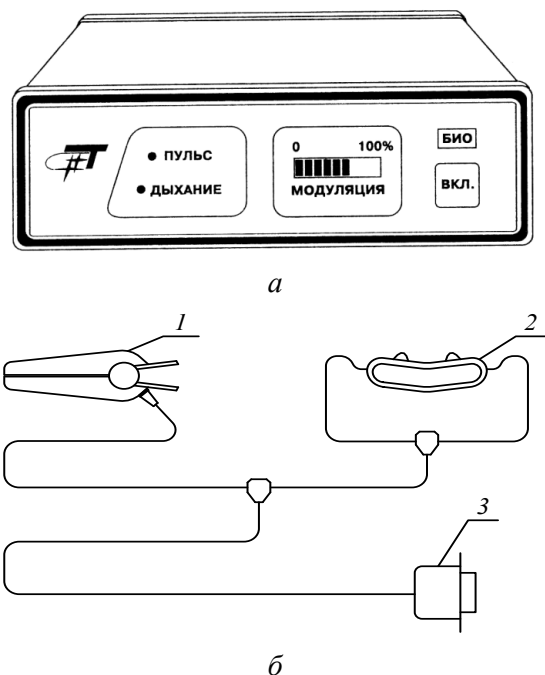


Рисунок 9.5 – Приставка «БИО» (а) і датчики (б) до АЛТ «Мустанг-2000»:
1 – датчик пульсу; 2 – датчик дихання; 3 – роз'єм

Залежно від кровонаповнення пальців рук, на одному з яких встановлюється датчик, змінюється інтенсивність випромінювання, що проходить від світлодіода до фотодіода. Сигнал, знятий з фотодіода, після обробки надходить у блок модуляції лазерного випромінювання базового модуля.

Датчик дихання розміщується безпосередньо у ніздрі пацієнта і є парою термісторів, опір яких змінюється пропорційно зміні температури повітря при диханні (4–5 °С). Вихідний сигнал цього датчика також надходить у базовий модуль і використовується для модуляції лазерного випромінювання.

Принцип біосинхронізації частотно-часових параметрів в апараті «Мустанг-БИО» показано на рис. 9.6.

Початкова потужність ЛВ (рис. 9.6, а) модулюється трьома сигналами. Перший сигнал є послідовністю прямокутних імпульсів з плаваючою частотою f_M , рівною 7–14 Гц, з якою відбуваються багато фізіологічних

процесів в організмі людини і яка задається внутрішнім генератором апарата. В результаті такої модуляції амплітудне значення потужності знижується в три рази (рис. 9.6, б), а середнє значення потужності визначатиметься виразом (8.1).

При підключенні датчика пульсу ЛВ додатково модулюється сигналом, що має частоту пульсу $f_{\Pi} = 1/T_{\Pi}$. При цьому під час систоли потужність ЛВ збільшується до двох разів порівняно з потужністю під час діастоли (рис. 9.6, в).

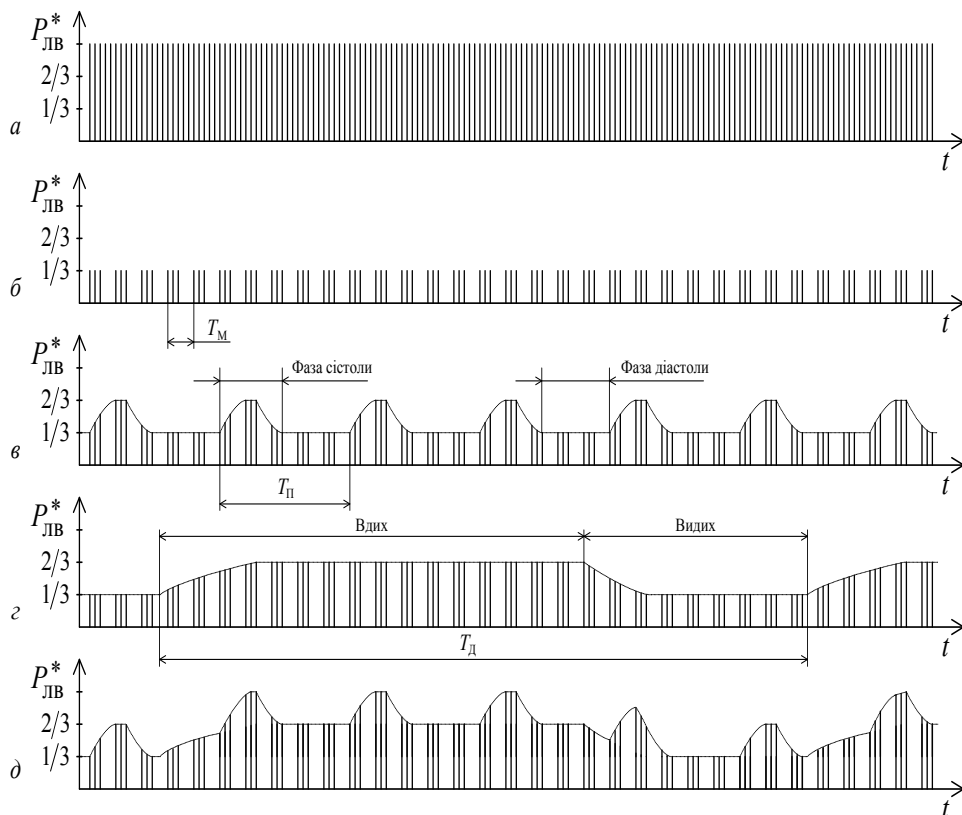


Рисунок 9.6 – Модуляція лазерного випромінювання при біосинхронізації

При підключенні датчика дихання ЛВ модулюється сигналом з частотою дихання $f_D = 1/T_D$. Під час вдиху потужність ЛВ збільшується в два рази порівняно з потужністю під час видиху (рис. 9.6, з).

Однотимчасне підключення двох датчиків забезпечує складний закон модуляції, в результаті якого потужність ЛВ мінімальна у фазах видиху і

діастолі, а у фазах вдиху і систолі – максимальна (рис. 9.6, д).

У результаті біосинхронізації середня потужність ЛВ зменшується в 2,5–3 рази від початкового значення, що необхідно враховувати, розраховуючи дозу опромінювання.

9.5. АПАРАТ ЛАЗЕРНОЇ ТЕРАПІЇ «МУЛАТ» ДЛЯ ВНУТРІШНЬОВЕННОГО ОПРОМІНЮВАННЯ КРОВІ

Спеціалізація деяких АЛТ висуває на перший план ряд вимог, обумовлених специфічністю їх застосування [17]. Прикладом тут може служити ВЛОК, для проведення якого найдоцільніше використовувати вузькоспеціалізовані апарати. По-перше, метод ВЛОК достатньо універсальний за ефектами, що виявляються при впливі і застосовується в різних галузях медицини. По-друге, для проведення ВЛОК необхідно виконання спеціальних санітарно-гігієнічних вимог, аналогічних тим, які пред'являються до процедурних кабінетів.

Метод ВЛОК використовується як анальгезуючий, антиоксидантний, десенсибілізуючий, біостимулюючий, імуностимулюючий, імунокорегуючий, судиннорозширюючий, антиаритмічний, антибактеріальний й протизапальний засіб. Застосування ВЛОК показано при цукровому діабеті, захворюваннях щитовидної залози, розсіяному склерозі, коллагенозах, хронічному бронхіті, бронхіальній астмі, захворюваннях органів травлення, гострому серозному пієлонефриті, гнійно-септичних ускладненнях у хірургічній практиці, хронічному кохлеїті, захворюваннях пародонта.

Спеціалізованим апаратом для ВЛОК є АЛТ «Мулат», який розроблений і серійно випускається Науково-виробничим лазерним центром «Техніка» (м. Москва, Росія). Цей апарат виконаний у вигляді базового модуля і спеціальної лазерної головки для ВЛОК із світловодом ОС-2 (рис. 9.7).

На передній панелі АЛТ «Мулат» розташовані органи керування та елементи індикації, що дозволяють:

- вмикати і вимикати живлення апарата;
- встановлювати потужність випромінювання у діапазоні від 0 до 4,5 мВт;
- встановлювати тривалість опромінювання в діапазоні від 1 до 40 хв.;
- починати процес опромінення і достроково припиняти його за необхідності.



Рисунок 9.7 – Апарат лазерної терапії «Мулат»

Решту технічних даних апарата наведено у табл. 9.3.

Таблиця 9.3 – Технічні дані АЛТ «Мулат»

Найменування показника	Од. вим.	Значення
Довжина хвилі випромінювання	нм	630
Напруга живлення	В	220 ± 22
Частота напруги живлення	Гц	50 ± 0,5
Споживана потужність, не більше	ВА	14
Тривалість установки робочого режиму	с	4
Габаритні розміри базового модуля, не більше	мм	210×180×90
Маса апарата в комплекті, не більше	кг	1,8
Діапазон робочих температур	°С	+10 – +35
Середня тривалість роботи без технічного обслуговування	год	5000

АЛТ «Мулат» за способом захисту пацієнта та обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом виконаний за класом захисту II, тип ВF.

Малі габарити і маса апарата «Мулат», відсутність необхідності захисного занулення (заземлення) дозволяють застосовувати його безпосере-

дньо у палатах для хворих з обмеженою рухливістю.

Для проведення процедури ВЛОК стерильний світловод з голкою повинен бути підключений до спеціальної випромінюючої головки, що закріплюється на зап'ясті пацієнта за допомогою манжети (рис. 9.8). Далі на передпліччя накладають джгут і готують вену для процедури. Перед тим, як ввести голку у вену, її необхідно зрушити «метеликом» на 2–3 мм таким чином, щоб світловод увійшов у голку. Потім роблять голкою пункцію вени. Після появи крові в отворі, потрібно вставити голку в «метелик» до упору й зафіксувати «метелик» на руці пластиром. Знявши джгут, канюлю світловода необхідно вставити в роз'єм виносної випромінюючої головки до упору. По закінченні процедури (її тривалість автоматично відраховується в апараті після натискання кнопки «ПУСК») з вени потрібно витягти світловод з голкою й обробити місце проколу спиртом.

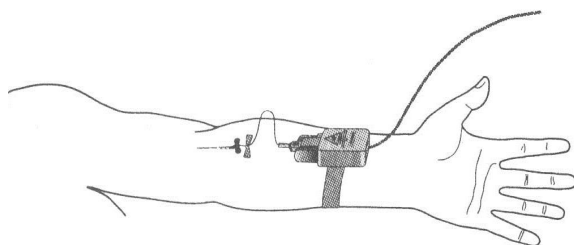


Рисунок 9.8 – Розміщення випромінюючої головки зі світловодом при проведенні процедури ВЛОК

Для ВЛОК зазвичай використовують лазерне випромінювання потужністю 1–2 мВт. Лікування проводять щодня або через день. На курс лікування призначають від 3 до 10 сеансів. Тривалість впливу при більшості захворювань становить від 15 до 20 хв. за процедуру для дорослих й 5–7 хв. для дітей.

9.6. МАГНІТОЛАЗЕРНИЙ ТЕРАПЕВТИЧНИЙ АПАРАТ «МИЛТА-Ф»

У результаті численних клініко-експериментальних досліджень була встановлена висока ефективність поєднання НЕЛВ і постійного магнітного поля (ПМП). При цьому виявилось, що в більшості випадків лікарської практики можливе застосування магнітолазерної терапії (МЛТ) як самос-

тійного методу. МЛТ була запропонована в кінці 70-х років минулого століття і набула поширення серед поєднаних методів лазерної терапії завдяки потенційній дії і високій терапевтичній ефективності [16].

Для проведення процедур МЛТ ЗАТ «НВО космічного приладобудування» і ТОВ «Символ» (м. Москва, Росія) був розроблений і серійно виготовляється магніто-ІЧ-лазерний апарат «МИЛТА-Ф».

Апарат «МИЛТА-Ф» виконаний у вигляді електронного модуля з пультом керування і терміналу, з'єднаних нероз'ємним електричним кабелем (рис. 9.9).



Рисунок 9.9 – Магнітолазерний терапевтичний апарат «МИЛТА-Ф»

Цей апарат призначений для лікування різних захворювань шляхом поєднаної дії ПМП з імпульсним лазерним і безперервним світлодіодним випромінюванням ближнього ІЧ-діапазону.

За допомогою пульта керування здійснюється включення і виключення апарата, вибір частоти проходження імпульсу ЛВ, встановлюється його потужність і тривалість процедури.

Термінал, що є виносною частиною апарата, містить постійний магніт у вигляді кільця, лазер, чотири світлодіоди і два фотодіоди, що дозволяють контролювати потужність випромінювання.

Апарат може бути використаний як в медичних установах, так і вдома у пацієнта під наглядом лікаря [16].

Відмінними особливостями апарата «МИЛТА-Ф» є такі:

- наявність фоторесстратора, що дозволяє дозувати опромінювання пацієнта залежно від патології і коректувати його в ході лікування;

- світлова індикація включення апарата, установки частоти імпульсів лазерного випромінювання при внутрішньому запуску лазера, циклу роботи лазера, віддзеркаленого випромінювання світлодіодів;

- звукова сигналізація включення живлення і закінчення роботи лазерного і світлодіодних випромінювачів.

В апараті «МИЛТА-Ф» передбачені три режими роботи:

- поєднана дія ПМП, імпульсного лазерного і безперервного світлодіодного випромінювань;

- поєднана дія ПМП з імпульсним лазерним випромінюванням;

- поєднана дія ПМП з безперервним світлодіодним випромінюванням.

Для підведення ІЧ-випромінювання лазера і світлодіодів безпосередньо до опромінюваної ділянки тіла пацієнта термінал апарата «МИЛТА-Ф» пристосований до установки спеціальних оптичних насадок (для рефлексотерапії, ЛОР, стоматології, гінекології, проктології).

Технічні дані апарата «МИЛТА-Ф» наведено в табл. 9.4.

Таблиця 9.4 – Технічні дані магнітолазерного апарата «МИЛТА-Ф»

Найменування показника	Од. вим.	Значення
1	2	3
Довжина хвилі випромінювання імпульсного лазера і світлодіодів	нм	850–950
Діапазон регулювання потужності безперервного випромінювання світлодіодів	мВт	0–120
Потужність лазерного випромінювання в імпульсі, не менше	Вт	4
Тривалість імпульсу лазерного випромінювання	нс	150
Частота проходження імпульсів ЛВ при: – внутрішньому запуску лазера – зовнішньому запуску лазера	Гц	5, 10, 50, 80, 150, 600, 1500, 5000
	Гц	0-5000

Закінчення табл. 9.4

1	2	3
Магнітна індукція на осі магніта в площині апертури термінала	мТл	20–80
Тривалість опромінювання	хв.	0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0; 15,0
Напруга живлення	В	220 ± 22 або 110 ± 11
Частота напруги живлення для мереж з напругою: – 220 В ± 10% – 110 В ± 10%	Гц Гц	50 60
Споживана потужність, не більше	ВА	35
Тривалість установки робочого режиму, не більше	с	5
Габаритні розміри	мм	240×215×115
Маса апарата без запчастин і приладдя, не більше	кг	2,2
Маса апарата в комплекті поставки, не більше	кг	5
Діапазон робочих температур	°С	19–35
Середнє напрацювання на відмову, не менше	годин	2000
Середній термін роботи апарата, не менше	років	5

Магнітолазерний апарат «МИЛТА-Ф» за способом захисту пацієнта та обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом виконаний за класом захисту II, тип ВФ.

За лазерною безпекою апарат «МИЛТА-Ф» відповідає класу II за ступенем небезпеки випромінювання, що генерується (ГОСТ Р 50723-94. Лазерна безпека. Загальні вимоги безпеки при розробці і експлуатації лазерів).

9.7. УНІВЕРСАЛЬНИЙ АПАРАТ КВАНТОВОЇ ТЕРАПІЇ «РИКТА 04/4»

Універсальний апарат «РИКТА 04/4» був розроблений і серійно виготовляється ЗАО «МИЛТА-ПКП ГИТ» (Росія). Цей апарат призначений для проведення процедур квантової терапії, під час яких стимулюються

власні життєві сили організму на боротьбу із широким колом захворювань, активізується імунна система, здійснюється протизапальна й знеболююча дія на організм.

Апарат «РИКТА 04/4» ефективно використовується у хірургії, кардіології, неврології, дерматології, стоматології, урології, гінекології, де його призначають для лікування судинних, бронхолегеневих захворювань; хвороб суглобів і хребта та захворювань шлунково-кишкового тракту.

Апарат «РИКТА 04/4» є базовою моделлю апаратів квантової терапії з двома випромінювачами Т1-04. Це настільний прилад, конструкція якого (рис. 9.10) передбачає два гнізда на блоці керування для можливості опромінення одночасно двома випромінювачами.



Рисунок 9.10 – Апарат квантової терапії «РИКТА 04/4»

Також є можливість використання випромінювачів з підвищеною площею випромінювання ДУШ-1-04 для більшої зручності та зменшення тривалості проведення процедури. Широка сфера застосування апарата квантової терапії «РИКТА 04/4» забезпечується за рахунок змінних оптичних насадок.

Установка параметрів і дозування лазерного випромінювання здійснюється шляхом послідовної установки режимів частоти повторення лазерних імпульсів, установки вихідної потужності апарата й тривалості процедури за допомогою сенсорних клавіш на передній панелі апарата перед проведенням випромінювання кожної шкірної зони.

Універсальний апарат квантової терапії «РИКТА 04/4» за способом захисту пацієнта та обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом виконаний за класом захисту II, тип ВФ.

За лазерною безпекою апарат квантової терапії «РИКТА 04/4» відповідає класу I за ступенем небезпеки випромінювання, що генерується (ГОСТ Р 50723-94. Лазерна безпека. Загальні вимоги безпеки при розробці і експлуатації лазерів).

Технічні дані апарата квантової терапії «РИКТА 04/4» наведено у табл. 9.5

Таблиця 9.5 – Технічні дані апарата квантової терапії «РИКТА 04/4»

Найменування показника	Од. вим.	Значення
Довжина хвилі – лазерного інфрачервоного випромінювання – широкосмугового інфрачервоного випромінювання – червоного видимого випромінювання	нм	800–910 875 640
Імпульсна потужність лазерного інфрачервоного випромінювання, – випромінювачі Г1-04, не менше – душ 1-04, не менше	Вт	10 30
Частота імпульсного червоного опромінювання	Гц	2
Постійна частота лазерного і широкосмугового ГЧ-випромінювання	Гц	5, 50, 1000
Змінна частота лазерного і широкосмугового ГЧ-випромінювання	Гц	250 – 1
Тривалість процедури опромінювання	хв	1, 2, 5, 10
Напруга живлення	В	220
Частота струму	Гц	50
Споживана потужність, не більше	Вт	20
Габаритні розміри	мм	245×220×95
Маса апарата	кг	2,5
Середній термін роботи апарата, не менше	років	5

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Поясніть процеси взаємодії низькоенергетичного лазерного випромінювання з клітинами живого організму.
2. Перерахуйте ефекти, що виникають в біологічних об'єктах при їх взаємодії з низькоенергетичним лазерним випромінюванням.
3. Охарактеризуйте класифікацію способів опромінювання низькоенергетичним лазерним випромінюванням у терапевтичних цілях.
4. Опишіть загальні принципи побудови апаратів лазерної терапії. Дайте пояснення.
5. Перерахуйте параметри лазерних терапевтичних апаратів.
6. Поясніть призначення лазерних апаратів «Мустанг». Вкажіть основні технічні дані цих апаратів та особливості їх використання.
7. Яким чином здійснюється біосинхронізація лазерного випромінювання з фізіологічними процесами в біологічному об'єкті?
8. Які датчики використовуються для біосинхронізації лазерного випромінювання з фізіологічними процесами в організмі людини?
9. Поясніть процес внутрішньовенного опромінювання крові за допомогою апарата лазерної терапії «Мулат». Вкажіть основні технічні дані цього апарата.
10. Яким чином в терапевтичному апараті «МИЛТА» забезпечується поєднаний вплив низькоенергетичного лазерного випромінювання з постійним магнітним полем? Вкажіть основні технічні дані цього апарата.
11. Вкажіть основні технічні дані універсального апарата квантової терапії «РИКТА» і поясніть особливості його експлуатації.

10. ЛАЗЕРНА ХІРУРГІЯ І ЛАЗЕРНІ ХІРУРГІЧНІ АПАРАТИ

10.1. ВЗАЄМОДІЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ХІРУРГІЧНИХ ЛАЗЕРІВ З БІОЛОГІЧНОЮ ТКАНИНОЮ

У теперішній час у розвинутих країнах у галузі лазерної хірургії досягнуто значного прогресу. Це стосується і показань, і різноманітності процедур, і рівня теоретичних і експериментальних розробок, спрямованих на вдосконалення методів відповідного втручання.

Промінь хірургічного лазера викликає ушкодження або загибель живої тканини, а при достатньо високій енергії – її *абляцію*. Під абляцією прийнято розуміти ліквідацію ділянки живої тканини безпосередньо під дією на неї фотонів лазерного випромінювання.

Механізм і параметри абляції визначаються властивостями опромінюваного об'єкта (співвідношення рідинного і твердого компонентів, їх хімічні і фізичні властивості, характер внутрішніх і міжмолекулярних зв'язків, термічна чутливість клітин і макромолекул, кровопостачання тканини і т.д.); параметрами випромінювання (довжина хвилі, характер опромінювання – безперервний або імпульсний, потужність, енергія в імпульсі і т.д.); параметрами, що пов'язують властивості об'єкта і лазерного променя, коефіцієнтами віддзеркалення, поглинання і розсіяння цього виду випромінювання у такому вигляді тканини або її окремих складових.

Всього прийнято виділяти чотири механізми абляції біологічних об'єктів під дією лазерного випромінювання.

Перший механізм виявляється при опромінюванні біологічних об'єктів променями Nd:YAG лазера (1064 нм), що працює в безперервному режимі при потужностях до 60–100 Вт. При опромінюванні тканин з високим вмістом води енергія лазера поглинається головним чином у нерідинному компоненті. Звичайне проникнення випромінювання такого лазера у тканину, що містить кров, становить 5–8 мм. При цьому коефіцієнт поглинання істотно зростає у білків, денатурованих унаслідок нагрівання опромінюваної тканини, а при подальшому розігріванні і займанні цей показник ще більш збільшується за рахунок обвуглювання (карбонізування)

опромінюваної поверхні.

Тому для цього виду випромінювання характер дії на тканину різко міняється в часі, причому коефіцієнт поглинання збільшується, а швидкість проникнення променів у тканину зменшується.

На рис. 10.1 показано взаємодію випромінювання Nd:YAG лазера з живою тканиною. Спочатку енергія фотонів лазерного випромінювання перетворюється тільки на теплову, що приводить до локального розігрівання об'єкта в місці падіння світла (рис. 10.1, *a*).

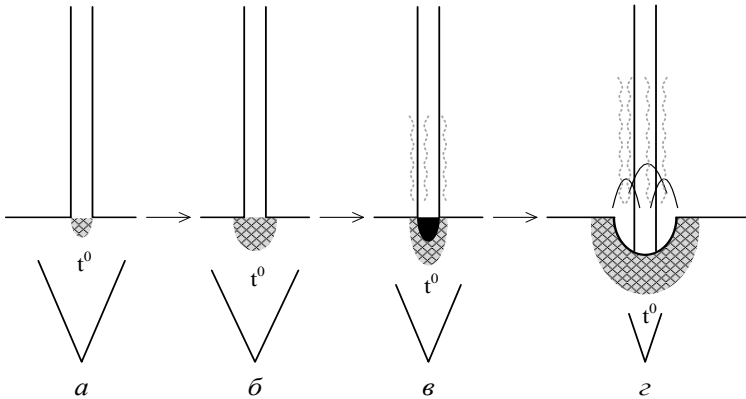


Рисунок 10.1 – Послідовні зміни в тканині у місці її опромінювання Nd:YAG лазером

При температурі 43 °С термічні ушкодження тканини ще зворотні, проте при подальшому підвищенні температури спочатку окремі, а потім і всі макромолекули змінюються незворотно (денатуруються), внаслідок чого опромінювана ділянка тканини гине (піддається некрозу) унаслідок денатурації білків, яку також називають коагуляцією. Критична температура початку коагуляції більшості тканинних компонентів становить близько 55 °С.

При опромінюванні, що продовжується, розмір ділянки некрозу зростає (рис. 10.1, *b*), температура збільшується і при $t > 100$ °С починається інтенсивне випаровування води, а потім настає термічний розпад органічних молекул (піроліз). При $t \approx 300$ °С починається горіння поверхневих шарів з виділенням диму (продукти згоряння) і осадженням їх на поверхні абляційного кратера, що формується (рис. 10.1, *c-d*).

Підвищення потужності випромінювання Nd:YAG лазера прискорює всі стадії взаємодії світла з тканиною, що ведуть до абляції. При цьому

зменшується і глибина термічного некрозу за рахунок екранування глибоко розташованої і ще недостатньо прогрітої тканини її поверхневими шарами, поглинання світла в яких різко зросло через їх коагуляцію та обвуглювання.

Дія *другого механізму* виявляється при опромінюванні м'яких тканин, що містять воду, деякими інфрачервоними лазерами, наприклад, CO₂ лазером з довжиною хвилі 10600 нм у безперервному режимі. Його випромінювання у режимі абляції (густина потужності близько 50 кВт/см²) інтенсивно поглинається молекулами тканинної води. При цьому має місце дуже швидке розігрівання води, а від неї і безводних компонентів тканини. Наслідком такого розігрівання є стрімке (вибухове) випаровування тканинної води і виверження водяної пари разом з фрагментами клітинних і тканинних структур за межі тканини з формуванням абляційного кратера. Разом з перегрітим матеріалом з тканини видалається велика частина теплової енергії, а її незначна частка, що залишилася, приводить лише до мінімальних термічних ушкоджень на глибину до 50–100 мкм за межами абляційного кратера.

Третій механізм схожий з другим, оскільки при цьому також відбувається розплавлення опромінюваного матеріалу і його виверження під дією потужних імпульсів інфрачервоних лазерів, що перевищують поріг абляції. Проте у такому випадку дію лазерним випромінюванням проводять на тверді тканини – кістка, емаль і дентин зуба тощо, що і визначає особливості цього механізму. Найчастіше для дії на тверді тканини використовують Er:YAG і Ho:YAG лазери з тривалістю імпульсів 150–200 мкс. Вибір саме цих лазерів визначається високими коефіцієнтами поглинання вказаних випромінювань не тільки у воді, але і в деяких мінералах твердих тканин, а також можливістю генерації великих значень густини потужності (десятки МВт/см²) в імпульсі, необхідних для досягнення абляційного ефекту.

Дія *четвертого механізму* виявляється при дії імпульсними лазерами, що працюють в ультрафіолетовій ділянці. На практиці в основному використовуються так звані ексимерні лазери ArF ($\lambda = 193$ нм), XeCl ($\lambda = 308$ нм), KrF ($\lambda = 248$ нм), а також лазери, УФ-випромінювання яких з довжинами хвиль 211, 213, 263, 311 або 355 нм отримують як похідні від початкових інфрачервоних випромінювань Nd:YAG ($\lambda = 1064$ нм) і Nd:YLF ($\lambda = 1053$ нм) лазерів.

Випромінювання XeCl лазера інтенсивно поглинається безводними

компонентами як м'яких, так і твердих тканин. Для ArF лазера характерні високий коефіцієнт поглинання в білках і ДНК. Вода практично не поглинає випромінювань УФ-лазерів.

В експериментальній і клінічній практиці діапазон густини потужності в імпульсі варіюють від декількох МВт до одиниць ГВт на см². Все це значною мірою визначає особливість механізму взаємодії випромінювань вказаних лазерів з біологічними тканинами. При взаємодії променя ексимерного лазера з молекулами мішені енергія фотонів виявляється достатньою для розриву ковалентних зв'язків між окремими атомами, розпаду молекул на окремі фрагменти і вибухоподібному виверженню цих фрагментів з утворенням абляційного кратера. При цьому виверження фрагментів з об'єкта відбувається з надзвуковими швидкостями і замкнена в них тепла енергія не встигає передаватися на стінки кратера, що утворюється, які розігріваються лише незначною мірою.

10.2. ТЕХНІКА ЛАЗЕРНИХ ХІРУРГІЧНИХ ВТРУЧАНЬ

Для ArF ($\lambda = 193$ нм) і Er:YAG ($\lambda = 2940$ нм) лазерів використовується спосіб підведення ЕМВ, при якому лазерний промінь націлюється на об'єкт крізь систему діафрагм і лінз, а зміна його напрямку здійснюється за допомогою напівпровідникового дзеркала (рис. 10.2, а). Промінь CO₂ лазера підводиться до об'єкта крізь рухому систему дзеркал і фокусуючу лінзову насадку (рис. 10.2, б).

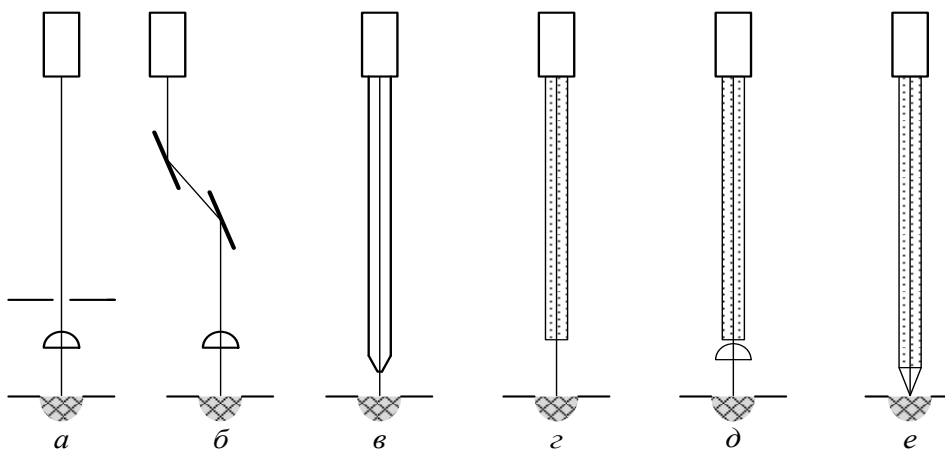


Рисунок 10.2 – Способи підведення ВЕЛВ до об'єкта

Для мініатюрних втручань такий підхід виявляється не цілком прийнятним. Тут найдоцільніше здійснювати підведення променя CO₂ лазера по порожнистому світловоду з внутрішньою дзеркальною поверхнею (рис. 10.2, в).

Для решти типів лазерів дію на об'єкт зазвичай надають через гнучкі кварцові світловоди діаметром 50–1200 мкм з пластиковим покриттям. Оскільки втрата енергії через кварцове волокно не перевищує 2–5 % на один метр довжини, можливе застосування багатометрових світловодів, що дозволяє розміщувати лазерні апарати на значному віддаленні від операційного стола або навіть в сусідньому приміщенні.

Цей чинник доцільний за наявності декількох операційних в одному операційному блоці, оскільки при цьому до одного апарата можна підключити декілька світловодів для кожної операційної. Такий підхід доцільний і у тому випадку, коли необхідно мати підготовлений до роботи лазер, щоб при виході з ладу основного інструменту мати можливість оперативно перемкнутися на запасний.

Подавати ЕМВ від світловода на об'єкт можна як з деякої відстані від торця світловода (дистантна дія, рис. 10.2, з), іноді з фокусуючою оптичною насадкою (рис. 10.2, д), так і в прямому контакті з об'єктом (контактна дія, рис. 10.2, е). ЛВ в більшості випадків підводиться до об'єкта через одиночний світловод.

Проте, в деяких випадках, зокрема при ангіопластиці, промінь лазера направляють по багатожильному (50–200 тонких волокон діаметром 50 мкм) волоконному кабелю, кварцові нитки якого розташовуються між зовнішньою і внутрішньою оболонками судинного катетера, що вводиться пацієнтові через кровоносні судини аж до патологічного осередку (рис. 10.3).

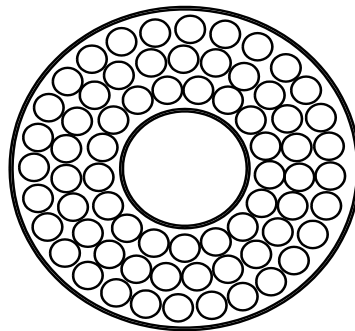


Рисунок 10.3 – Фронтальний розріз багатожильного катетера для ангіопластики коронарних артерій

Центральна частина (порожнина) катетера є інструментальним каналом, який служить для розміщення зонда, що проводиться через звуження в артерії до початку процесу опромінювання.

У деяких випадках до операційного поля підводять одночасно випромінювання від двох різних лазерів. При використанні пари CO_2 -Nd:YAG для одночасної подачі обох випромінювань на тканину кожний з променів проводять по своїй оптичній системі і лише на виході з системи промені фокусують в одній точці.

Під час роботи з парою лазерів Nd:YAG-ХеСl світловоди 1 від кожного генератора впаюються в загальний оптичний змішувач 2 з виходом на єдине волокно 3, що проводить світло, робочий кінець якого націлюють на об'єкт операції (рис. 10.4)

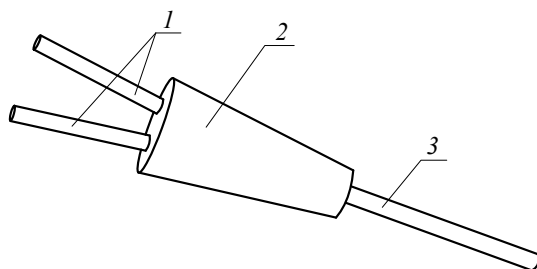


Рисунок 10.4 – Оптичний змішувач

Для здійснення лазерних втручань на труднодоступних об'єктах, крім світловода, використовують спеціальні пристосування. Наприклад, при інтерстиційному лазеруванні, що проводиться для коагуляції тканини деяких злоякісних новоутворень, в центр пухлини після її локалізації спочатку вводиться порожнистий зонд 2, по якому потім просувають світловід 1 до контакту з тканиною 3 (рис. 10.5, а).

При ендоскопічних операціях, що виконуються на ділянках тіла, які з'єднуються з його поверхнею природними анатомічними каналами (органи травного і сечовипускального трактів, носова порожнина, носоглотка, гортань, трахея, крупні бронхи), світловід 1 проводять крізь заздалегідь введений до потрібного місця жорсткий 3 або гнучкий 2 зонд (рис. 10.5, б).

Для лазерного втручання при ендоскопічних внутрішньосудинних операціях в просвіт кровоносної судини 4 вводиться порожниста голка 3, через яку пропускають гнучкий катетер 2 з світловодом 1 до місця 5 дії (рис. 10.5, в).

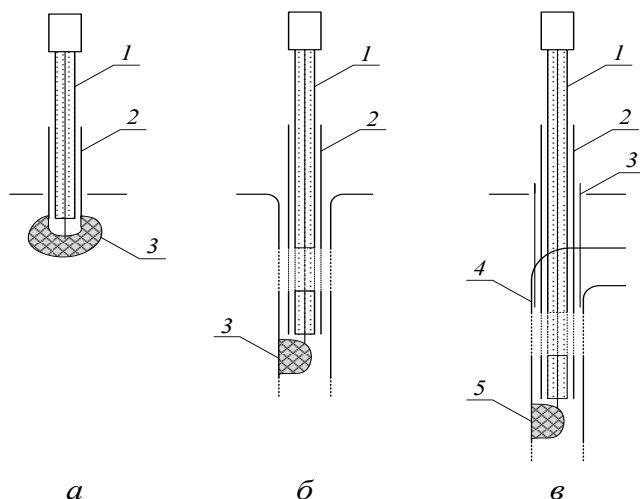


Рисунок 10.5 – Способи підведення світловода до мішеней, що розташовані в глибині органів і тканин

10.3. ОРГАНІЗАЦІЯ ЛАЗЕРНОЇ ОПЕРАЦІЙНОЇ І ЗАХОДИ ЗАХИСТУ ВІД ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Основною частиною хірургічного відділення є операційний блок, який, у свою чергу, складається з передопераційної (приміщення, де проводиться підготовка пацієнта і медичного персоналу до операції) та операційної, де проводяться хірургічні операції.

У деяких випадках частина устаткування й апаратури розміщується в суміжних з операційною приміщеннях. ЕМВ від лазерів, розташованих у таких приміщеннях, вводиться в операційну за допомогою гнучких світловодів.

При проведенні операції під наркозом (загальне знеболення), його починають ще в передопераційній (ввідний внутрішньовенний наркоз), а продовжують в приміщенні операційної (інтубація – введення трубки відповідного калібру в трахею з подальшою примусовою подачею через наркозний апарат газової суміші, що містить фторотан або інший агент).

При лазерних операціях на трахеї або гортані наркозну газову суміш слід подавати в легені через металевий катетер, оскільки при випадковому пропалюванні пластикової трубки і виході насиченої киснем газової суміші за її межі у повітряних шляхах пацієнта може відбутися вибух з тяжкими наслідками.

При порожнинних і деяких інших операціях внутрішньовенно вводять так звані міорелаксатори, тобто з'єднання, що розслабляють мускулатуру. Розміщення пацієнта на операційному столі проводиться так, щоб забезпечити оптимальний доступ до місця операції.

При проведенні хірургічних операцій лазери в основному використовують для видалення або коагуляції патологічних утворень на поверхні шкіри і доступних слизистих оболонках. Застосування лазера для пошарового розтину тканин і внутрішніх порожнистих органів при типових порожнинних операціях вважається клінічно недоцільним, оскільки, на відміну від звичайного скальпеля, лазерний промінь викликає крайове пошкодження структур, що при подальшому зшиванні уповільнює загоєння.

Крім того, виконання крупних розрізів скальпелем набагато швидше і зручніше порівняно з лазером. Різання лазерним променем здійснюють на тканинах паренхіматозних органів, при блоковому видаленні раку молочної залози і резекції яєчника. При роботі на порожнистих органах (кишечнику, судинах) лазер використовується для зварювання стінок об'єктів.

Розвиток медичної техніки у ряді випадків дозволяє досягати патологічний об'єкт без порушення цілісності екрануючих тканин. Такі операції називаються *ендоскопічними*.

Під час цих операцій доступ до потрібного місця здійснюється через природні отвори (стравохід, порожнину шлунка або товстого кишечника, трахею, бронх, середні і задні відділи порожнини носа, повітряноносні пазухи голови, сечовий міхур, піхву або матку) або невеликі проколи (зазвичай у просвіт артерії), в які потім вводяться зонди для підведення хірургічних інструментів.

Під час ендоскопічних операцій може проводитися апендиктомія (видалення червоподібного відростка, як правило, при гострому апендициті); холецистектомія (видалення жовчного міхура, головним чином при холециститі, новоутвореннях і травмах); видалення каменів і пухлин з різних відділів сечовивідного тракту; різні маніпуляції на товстому кишечнику (видалення поліпів); санація різних відділів дихальних шляхів (видалення пухлин з крупних бронхів, трахеї, гортані, носоглотки та ін.); витягання сторонніх тіл, зупинка кровотеч у порожнині шлунку, реканалізація порожнистих органів при неоперабельному раку.

Дуже ефективні ендоскопічні операції на артеріях, в ході яких вдається оперативно і майже атравматично видаляти або знищувати тромби,

ліквідувати атеросклерозні бляшки, що здавлюють просвіт судин, руйнувати невеликі ділянки тканини міокарда, які генерують патологічний ритм серцевого м'яза.

Останнім часом лазерні маніпуляції все частіше використовуються при ендоскопічних операціях для літоприсії (дроблення каменів сечоводу і сечового міхура і подальше їх видалення), зупинки кровотеч, видалення доброякісних новоутворень, реканалізації просвітів порожнистих органів, зайнятих пухлиною, санації кровоносних судин.

У всіх цих випадках лазерне випромінювання із заданими параметрами підводиться по катетеру через гнучкий світловод, а хірург виконує відповідну маніпуляцію, націлюючи промінь лазера на об'єкт.

При проведенні лазерних операцій питанням безпеки приділяється одне з центральних місць. Побудова систем захисту медичного персоналу і пацієнтів повинна здійснюватися з урахуванням того, що пошкодження тканин і органів людини ЕМВ лазерів може бути результатом безпосередньої або непрямой (віддзеркаленої) дії.

Відповідно до стандартів України [33] лазерна безпека – це сукупність технічних, санітарно-гігієнічних і організаційних заходів, що забезпечують безпечні умови праці персоналу при використанні лазерів. При цьому засоби захисту від ЛВ прийнято розділяти на *колективні* та *індивідуальні*.

Колективні засоби захисту припускають використання телевізійних систем для спостереження за ходом операції, захисних екранів, систем блокування і сигналізації, огорож лазерно-небезпечної зони. Як засоби індивідуального захисту використовують спеціальні захисні окуляри, щитки, маски, рукавички і халати.

Найбільший вплив випромінювання лазера робить на очі. Навіть віддзеркалений і розсіяний промінь лазера може бути сфокусований оптичною системою ока, що приведе до пошкодження пігментних клітин сітківки. Ураження очей може бути викликано ЕМВ з різною довжиною хвилі, проте з найбільшою чутливістю орган зору людини сприймає ЛВ в діапазоні від 400 до 500 нм.

Достатньо ефективним засобом захисту очей при використанні лазерів з модульованим випромінюванням є окуляри затворного типу. У таких окулярах високошвидкісні затвори з'єднані з модулятором лазерного апарата і закриваються під час імпульсу. Протягом всього іншого часу забезпечується

нормальне, не утруднене кольоровими стеклами спостереження об'єкта.

При проведенні хірургічних лазерних втручань на обличчі, коли вірогідність ураження очей особливо велика, очі пацієнтів закривають чорною пов'язкою. У деяких випадках застосовуються спеціальні захисні за-слінки, що вводяться під віко при місцевій анестезії.

Від прямого попадання високоенергетичного ЛВ (ВЕЛВ) повинні бу-ти захищені не тільки очі пацієнта, але і його шкірні покриви, оскільки та-ке випромінювання може викликати значне пошкодження шкіри, особливо її пігментованих ділянок. Зазвичай для захисту шкірних покривів пацієнта використовуються спеціальні щільні світлопоглинаючі тканини темно-синього або темно-зеленого кольору.

Під дією лазерного променя відбувається випаровування води і тер-мічний розпад органічних молекул опромінюваного біологічного об'єкта, у тому числі і пухлинних клітин. Вказана обставина потребує вживання спе-ціальних заходів безпеки. Зокрема, достатньо ефективним є застосування спеціальних пасток, що є пластмасовими циліндрами із створюваним усе-редині них зниженим тиском.

У систему захисту від дії ВЕЛВ включаються заходи зі зменшення небезпеки опромінювання віддзеркаленим і розсіяним світлом. В опера-ційній повинно бути мінімум предметів, що мають віддзеркалюючі повер-хні. Стіни, підлогу і стелю слід фарбувати темною матовою фарбою, що добре поглинає ЕМВ видимої частини спектра. На входних дверях із зов-нішнього боку повинен бути встановлений знак лазерної небезпеки (рис. 10.6), виконаний чорним кольором на жовтому фоні.



Рисунок 10.6 – Знак лазерної небезпеки

У ході операції випромінювання лазера повинно бути направлене на об'єкт хірургічного втручання. Існує декілька способів підведення і націлювання лазерного променя, вибір яких, залежно від виду випромінювання, характеру патології й інших умов, забезпечує оптимальну техніку проведення хірургічних маніпуляцій і дозволяє добиватися найбільш сприятливого з можливих як негайного, так і кінцевого клінічного результату відповідної операції.

10.4. ЛАЗЕРНІ ХІРУРГІЧНІ АПАРАТИ

Лазерні хірургічні апарати «Ланцет-1» і «Ланцет-2» були розроблені і випускаються ГУП «КБ приборостроения» (м. Тула, Росія).

Ці універсальні апарати призначені для застосування: в хірургії (випаровування абсцесів і залишків гнійної порожнини, операції на печінці і селезінці, резекція внутрішніх органів, операції на жовчних шляхах, операції на легенях); урології (хірургічне лікування гнійно-запальних захворювань, видалення пухлин); гінекології (гострий гнійний мастит, пухлини зовнішніх статевих органів, коагуляція ерозії, видалення загострених кондилом, поліпи шийки матки).

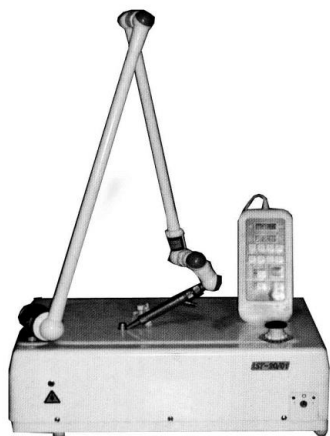
Також ці апарати використовуються в оториноларингології (хірургія гортані, трахеї і голосових зв'язок); нейрохірургії (гемостаз, випаровування пухлин); опіковій хірургії (некротомія тканин при опіках різного ступеня, обробка келоїдних рубців); стоматології (хірургічна стоматологія, щелепно-лицьова хірургія, лікування пародонтозу).

Виправдовують вони своє застосування в онкології (передракові захворювання вульви, рак шкіри, абдомінальна онкологія); офтальмології (хірургія вік, кон'юнктивіти, пухлини вік та орбіти); дерматології і косметології (видалення гемангіом і татуювань, лікування гнійно-запальних захворювань і трофічних виразок, шкірно-пластична хірургія, видалення бородавок, вугрів й інших новоутворень).

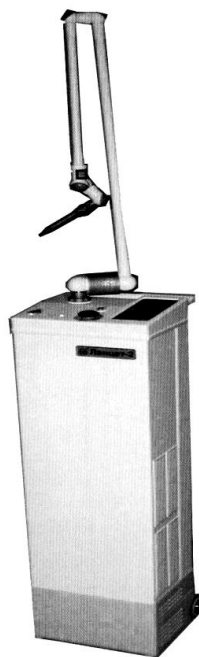
Апарат «Ланцет-1» має горизонтальну компоновку (рис. 10.7, а) і призначений для розміщення на столі.

Апарат «Ланцет-2» має вертикальну компоновку (рис. 10.7, б), добре вписується в обладнання будь-якої операційної і має збільшений радіус операційного простору.

Основні технічні дані цих апаратів наведено в табл. 10.1.



a



б

Рисунок 10.7 – Лазерні хірургічні апарати «Ланцет-1» (а) і «Ланцет-2» (б)

Таблиця 10.1 – Технічні дані лазерних хірургічних апаратів «Ланцет-1» і «Ланцет-2»

Параметри	Од. вим.	Значення	
		«Ланцет-1»	«Ланцет-2»
Довжина хвилі випромінювання	нм	10600	
Діапазон регулювання потужності випромінювання на біотканину	Вт	0,1-20	
Діаметр плями на біотканині	мм	0,2; 0,3; 0,5	
Радіус операційного простору	мм	1000	1200
Напруга живлення	В	220	
Частота напруги живлення	Гц	50	
Споживана потужність	ВА	700	
Габаритні розміри у складеному стані	мм	555×410×225	955×305×270
Маса	кг	25	26

Апарати «Ланцет-1» і «Ланцет-2» реалізовані за технологією надкомпактного суцільнометалевого хвилеводного CO₂ лазера з радіочастотним збудженням активного середовища. Апарати мають мікропроцесорні системи керування з розширеним набором функцій, які забезпечує генерування ЕМВ в безперервному, імпульсно-періодичному і суперімпульсному режимах. Суперімпульсний режим призначений для обробки біологічних тканин без обуглювання і некрозу. Наведення основного випромінювання здійснюється в апаратах за допомогою світлодіодного лазера.

Широка сфера застосування лазерних апаратів «Ланцет-1» і «Ланцет-2» забезпечується за рахунок змінних насадок (рис. 10.8).

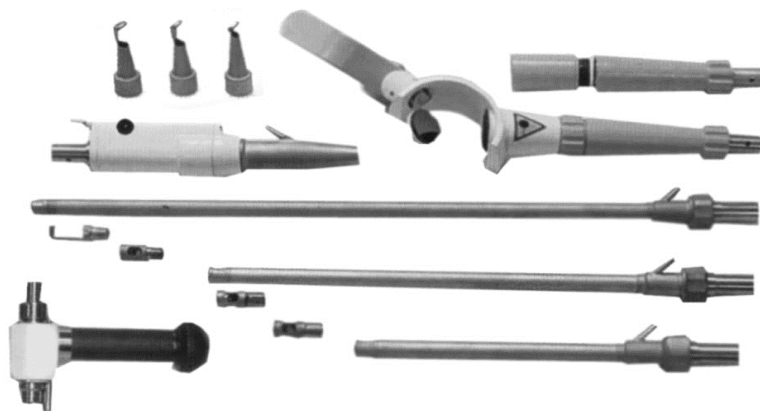


Рисунок 10.8 – Змінні насадки для гінекології, стоматології, лапароскопії, ЛОР, адаптери до кальпоскопів та операційних мікроскопів, скануючих пристроїв

Універсальний лазерний хірургічний апарат «Лазермед-1-10» призначений для використання на ключових етапах хірургічних втручань. Основними показаннями для його застосування служать операції на органах, що мають багато крові; необхідність стерилізації гнійних ран і профілактика мікробного забруднення чистих операційних ран; прецизійна техніка оперативних втручань; оперативні втручання у пацієнтів з порушенням згортання крові.

Апарат «Лазермед-1-10» реалізований на базі світлодіодного лазера і конструктивно розміщений у корпусі типу «дипломат» (рис. 10.9). Основні технічні дані апарата «Лазермед-1-10» наведено в табл. 10.2.

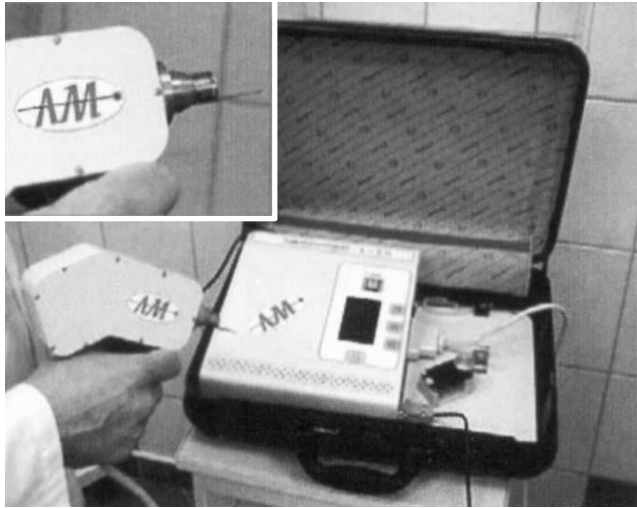


Рисунок 10.9 – Лазерний хірургічний апарат «Лазермед-1-10»

Таблиця 10.2 – Технічні дані лазерного хірургічного апарата «Лазермед-1-10»

Параметри	Од. вим.	Значення
Довжина хвилі випромінювання	нм	10 600
Діапазон регулювання потужності випромінювання	Вт	0,1–10
Діапазон регулювання тривалості імпульсів випромінювання	с	0,01–10
Розмір плями на біотканині	мм	0,6 × 0,15
Тривалість експозиції опромінювання	с	≤ 900
Напруга живлення	В	220
Частота напруги живлення	Гц	50
Споживана потужність	ВА	240
Габаритні розміри	мм	640×440×240
Маса	кг	10

Мікропроцесорна система керування забезпечує роботу апарата «Лазермед-1-10» в безперервному режимі, в імпульсному режимі і в режимі генерування одиночного імпульсу. Для наведення основного випромінювання в апараті використовується лазерний світлодіод з довжиною хвилі 637 нм. Додатково до апарата «Лазермед-1-10» випускаються мікроманіпулятори, сканери, система димовідсмоктування, очищувач повітря і різні

змінні насадки.

Фізичним інститутом ім. П.М. Лебедева Російської Академії наук (м. Москва, Росія) розроблені і випускаються лазерні хірургічні апарати на випарах міді «Яхрома-Мед» і на випарах золота «Ауран».

Апарат «Яхрома-Мед» призначений для застосування в дерматології, косметології, естетичній хірургії, офтальмології, оториноларингології, гінекології, гастроентерології та онкології. Він також з успіхом використовується для лікування судинних і пігментних дефектів шкіри – телеангіектазії, винні плями, гемангіоми, лентіго, кавові плями, кольорові татуювання, бородавки, зморшки. Лікування ґрунтоване на концепції селективного фототермолізу.

Апарат «Яхрома-Мед» зроблений в настільному виконанні і показаний на рис. 10.10. Основні технічні дані апарата наведено у табл. 10.3.

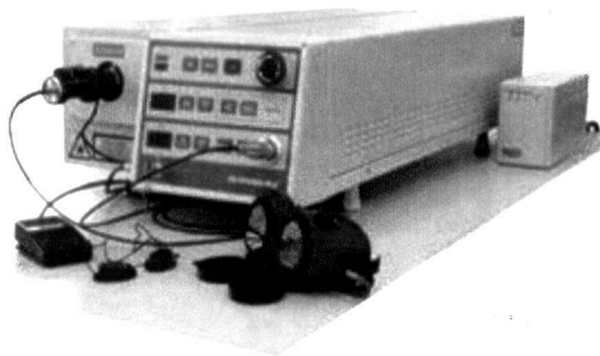


Рисунок 10.10 – Лазерний хірургічний апарат «Яхрома-Мед»

Таблиця 10.3 – Технічні дані лазерного апарата «Яхрома-Мед»

Параметри	Од. вим.	Значення
1	2	3
Довжина хвилі випромінювання	нм	511, 578
Потужність випромінювання	Вт	3
Частота проходження імпульсів випромінювання	кГц	16
Тривалість імпульсів випромінювання	мс	15
Діаметр променя на біотканині	мм	1
Тривалість експозиції опромінювання	с	0,1–9,9

Закінчення табл. 10.3

1	2	3
Вихід на робочий режим	с	30
Напруга живлення	В	220
Частота напруги живлення	Гц	50
Споживана потужність	ВА	1600
Габаритні розміри	мм	890×430×240
Маса	кг	30

Зміна довжини хвилі випромінювання здійснюється за допомогою світлофільтрів. Апарат «Яхрома-Мед» комплектується захисними окулярами, лазерним пером, вузлом введення випромінювання у світловод, ножною педаллю, світловодом, джерелом безперебійного живлення.

Апарат «Ауран» призначений для застосування в онкології і використовується для лікування пухлин різного гістогенезу методом фотодинамічної терапії. Перед лікуванням пацієнтові вводиться фотосенсибілізуюча речовина (світлочутливий барвник).

Під впливом лазерного випромінювання фотосенсибілізатор переходить у збуджений стан і в міжклітинному просторі утворюється атомарний кисень. Цей процес приводить до загибелі пухлинних клітин.

Апарат «Ауран» в настільному виконанні зображено на рис. 10.11. Основні технічні дані апарата «Ауран» наведено в табл. 10.4.

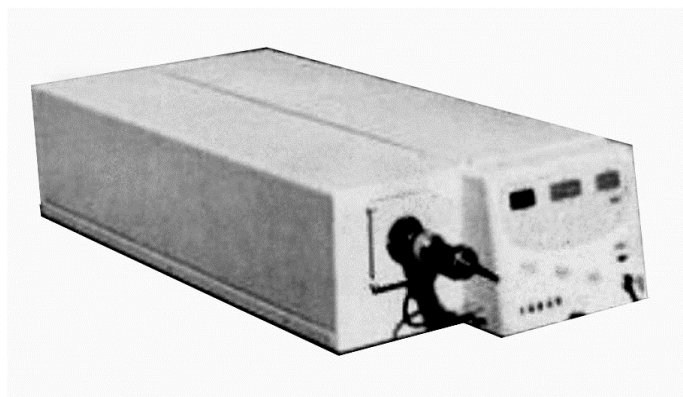


Рисунок 10.11 – Лазерний хірургічний апарат «Ауран»

Таблиця 10.4 – Технічні дані лазерного хірургічного апарата «Ауран»

Параметри	Одиниці вимірювання	Значення
Довжина хвилі випромінювання	мм	628
Потужність випромінювання	Вт	1
Частота проходження імпульсів випромінювання	кГц	16
Тривалість імпульсів випромінювання	нс	20
Тривалість експозиції опромінювання	хв	1–59
Вихід на робочий режим	с	30
Напруга живлення	В	220
Частота напруги живлення	Гц	50
Споживана потужність	ВА	1600
Габаритні розміри	мм	890×430×240
Маса	кг	30

Окрім розглянутих лазерних хірургічних апаратів, у медичній практиці достатньо широко використовуються апарати й інших типів з різним призначенням і різними параметрами.

Універсальний лазерний коагулятор «Ліка-хірург» виробництва ПМВП «Фотоніка Плюс» (м. Черкаси, Україна) призначений для проведення широкого спектра операцій у нейрохірургії, гінекології, оториноларингології, офтальмології, стоматології, дерматології.

Лазерний апарат-коагулятор «Ліка-хірург» виконано настільним (рис. 10.12). До апарата під'єднуються волоконні світловоди.



Рисунок 10.12 – Універсальний лазерний апарат-коагулятор «Ліка-хірург»

Основні технічні дані універсального лазерного апарата-коагулятора «Ліка-хірург» наведено в табл. 10.5.

Таблиця 10.5 – Технічні дані лазерного універсального апарата-коагулятора «Ліка-хірург»

Параметри	Одиниці вимірювання	Значення
Довжина хвилі	нм	808
Довжина хвилі лазера-пілота	нм	650
Потужність лазерного випромінювання на виході волоконного світловода	Вт	0,5–18,0
Напруга живлення	В	220
Споживана потужність, не більше	ВА	400
Габаритні розміри апарата, не більше	мм	340×370×160
Маса, не більше	кг	12,5

При використанні лазерного коагулятора тканині завдаються мінімальні ушкодження. Тканина руйнується внаслідок розриву тканинних елементів, при цьому несучи її залишки з рани, частина їх – згоряє, а частина обуглюється та утворює лазерний струп. «Лазерний» коагуляційний некроз якісно відрізняється від некрозу, викликаного електрокоагуляцією або кріодеструкцією тим, що його зона набагато менша. Загоєння дефекту відбувається значно швидше. Після відходження струпа відсутня кровоточивість та рубці. До того ж лазерна коагуляція сприяє формуванню більш ніжного рубця.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. У чому полягає основна відмінність лазерних хірургічних апаратів від лазерних терапевтичних апаратів?
2. Лазери якої потужності використовуються з хірургічною метою?
3. Перелічіть основні механізми взаємодії випромінювання лазерних хірургічних апаратів з біологічною тканиною. Дайте пояснення.
4. Назвіть основні способи підведення високоенергетичного лазерного випромінювання до об'єкта при проведенні хірургічного втручання.
5. Яким чином здійснюється підведення світловоду з лазерним випромінюванням до мішеней, які розташовані всередині органів та тканин?
6. Вкажіть особливості організації лазерної операційної та основні

вимоги лазерної безпеки.

7. Назвіть заходи щодо захисту від лазерного випромінювання.

8. Вкажіть конструктивні та технічні особливості лазерних хірургічних апаратів «Ланцет».

9. Назвіть джерело випромінювання в універсальному лазерному хірургічному апараті «Лазермед». Вкажіть основні технічні дані цього апарата.

10. Розкажіть про призначення лазерного апарата «Яхрома-Мед» та особливості його технічної реалізації.

11. У яких випадках використовується лазерний апарат «Ауран»? В чому полягають особливості його технічної реалізації?

12. Наведіть основні технічні дані універсального лазерного апарата-коагулятора «Ліка-хірург». Вкажіть його призначення і особливості експлуатації.

11. ТЕРАПЕВТИЧНА АПАРАТУРА НА ВИПРОМІНЮЮЧИХ ДІОДАХ

У сучасних фізіотерапевтичних апаратах (ФТА) як джерело електромагнітного випромінювання оптичного діапазону (ОД) все частіше використовуються напівпровідникові випромінюючі діоди. Перевагами таких джерел ЕМВ ОД є: вузький спектр випромінювання при різноманітній номенклатурі приладів з різною довжиною хвилі випромінювання в інфрачервоній, видимій та ультрафіолетовій ділянках спектра, великий ККД і низька інерційність, добрі масогабаритні показники і низька вартість.

11.1. ФОТОННІ АПАРАТИ (ВИПРОМІНЮВАЧІ)

При створенні апаратів для фототерапевтичного комплексу «БАРВА-ТЕРАПЕВТ/ССД» фахівці Науково-виробничої медико-біологічної корпорації «Лазер і Здоров'я» (м. Харків) прагнули забезпечити такі показники їх якості, як висока терапевтична ефективність, надійність і багатофункціональність [34]. Саме тому як генератори електромагнітного випромінювання інфрачервоної (ІЧ) і видимої частини спектра були використані напівпровідникові лазери і напівпровідникові особливо яскраві світлодіоди.

11.1.1. Фотонні матриці Коробова «Барва-Флекс»

Одними з найбільш універсальних персональних медичних апаратів для фототерапії, що виробляє корпорація «Лазер і Здоров'я», є фотонні матриці Коробова «Барва-Флекс». Зовнішній вигляд однієї з таких матриць наведено на рис. 11.1. Фотонні матриці призначені для використання в кардіології, пульмонології, гінекології, отоларингології, стоматології, гастроентерології, дерматології, в спортивній медицині для підготовки спортсменів до змагань, в домашніх умовах для індивідуального лікування і профілактики цілого ряду захворювань [35, 36].



Рисунок 11.1 – Зовнішній вигляд фотонної матриці Коробова «Барва-Флекс»

В основу лікувальної дії фотонних матриць «Барва-Флекс» покладена здатність ЕМВ ІЧ і видимої частини спектра збільшувати енергетичну активність клітинних мембран, приводити в дію процеси регенерації, збільшувати поглинання кисню тканинами, стимулювати утворення АТФ в мітохондріях, що підвищує біоенергетичний потенціал клітин. ЕМВ ІЧ і видимої частини спектра має протизапальний, загоюючий і анальгезуючий ефекти, воно нормалізує артеріальний тиск, знімає больові синдроми в суглобах, хребті і м'язах. Таке випромінювання нормалізує роботу регуляторних систем організму людини: імунної, ендокринної і центральної нервової. Під дією ЕМВ ІЧ і видимої частини спектра активізується мікроциркуляція в зоні опромінювання, що приводить до підвищення ефективності використання лікарських препаратів і дозволяє знижувати їх дозування. Поеднана дія ЕМВ ІЧ і видимої частини спектра фотонної матриці «Барва-Флекс» з постійним магнітним полем (ПМП) магнітної матриці «Барва-Флекс/Маг» підвищує ефективність лікування ряду захворювань.

Відмітною особливістю фотонних і магнітних матриць є те, що вони мають гнучку основу. Це дозволяє матрицям повторювати форму тієї частини тіла людини, до якої вони прикладаються, що забезпечує максимально ефективну передачу випромінювання світлодіодів без втрат на віддзеркалення на межі повітря – шкіра людини. Базовий варіант матриці містить 24 світлодіоди, розташованих еквідистантно в чотири ряди по шість світлодіодів в кож-

ному ряду. Спеціальні матриці мають розташування світлодіодів 3×8 (для опромінювання протяжних ділянок) і 2×12 (для опромінювання хребта і пара-вертебральних зон).

Основні технічні дані фотонних матриць Коробова «Барва-Флекс» наведено у табл. 11.1.

Таблиця 11.1 – Технічні дані фотонних матриць Коробова «Барва-Флекс»

Найменування параметра	Од. вим.	Значення
Потужність випромінювання кожного з 24 світлодіодів	мВт	5
Напруга живлення фотонної матриці	В	14 ± 0,3
Потужність, споживана фотонною матрицею, не більше	Вт	1,4
Габаритні розміри фотонної матриці, не більше	мм	190×98×15
Маса фотонної матриці, не більше	кг	0,3

Фотонні матриці «Барва-Флекс» складається з пластини 1 з двома провусинами 2 і 3, що дозволяють фіксувати матрицю на тілі пацієнта за допомогою гумових ременів (рис. 11.2).

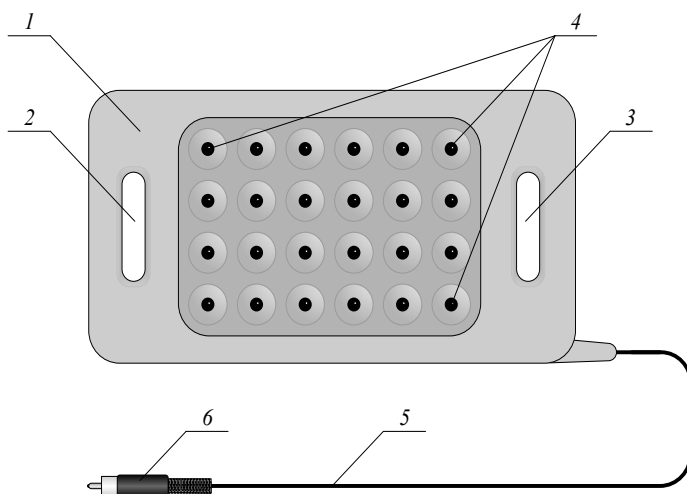


Рисунок 11.2 – Конструкція фотонної і магнітної матриць Коробова «Барва-Флекс»

Пластина виготовляється з гіпоалергічної медичної гуми і не викликає подразнення шкірних покривів. Електроживлення світлодіодів 4 здійснюється від спеціального блока живлення або від мікропроцесорного блока імпульсного керування, до якого матриця підключається за допомогою кабелю 5 з роз'ємом 6.

При необхідності поєднаної дії електромагнітним випромінюванням інфрачервоної і видимої частин спектра з постійним магнітним полем на фотонну матрицю встановлюється магнітна матриця «Барва-Флекс/Маг».

Параметри випромінювання фотонних матриць Коробова «Барва-Флекс» різних модифікацій наведено у табл. 11.2.

Таблиця 11.2 – Параметри випромінювання фотонних матриць Коробова «Барва-Флекс»

Модифікація	Випромінювання	Довжина хвилі, нм	Кількість світлодіодів, шт.	Потужність випромінювання, мВт
1	2	3	4	5
Монохромні матриці				
«Барва-Флекс/ИК»	інфрачервоне	940	24	120
«Барва-Флекс/К»	червоне	660	24	120
«Барва-Флекс/О»	оранжеве	610	24	120
«Барва-Флекс/Ж»	жовте	595	24	120
«Барва-Флекс/З»	зелене	525	24	120
«Барва-Флекс/Г»	голубе (синьо-зелене)	505	24	120
«Барва-Флекс/С»	синє	470	24	120
«Барва-Флекс/Ф»	фіолетове	405	24	120
Біхромні матриці				
«Барва-Флекс/КИК»	червоне	660	12	60
	інфрачервоне	940	12	60
«Барва-Флекс/ОИК»	оранжеве	610	12	60
	інфрачервоне	940	12	60
«Барва-Флекс/ЖИК»	жовте	595	12	60
	інфрачервоне	940	12	60

Закінчення табл. 11.2

1	2	3	4	5
«Барва-Флекс/ЗИК»	зелене	525	12	60
	інфрачервоне	940	12	60
«Барва-Флекс/ГИК»	голубе (синьо-зелене)	505	12	60
	інфрачервоне	940	12	60
«Барва-Флекс/СИК»	синє	470	12	60
	інфрачервоне	940	12	60
«Барва-Флекс/ФИК»	фіолетове	405	12	60
	інфрачервоне	940	12	60
«Барва-Флекс/СЗ»	синє	470	12	60
	зелене	525	12	60
Поліхромні матриці				
«Барва-Флекс/ПХ»	інфрачервоне	940	8	40
	червоне	660	4	20
	жовте	595	4	20
	зелене	525	4	20
	синє	470	4	20

При виборі фотонних матриць для проведення процедури необхідно враховувати специфіку дії ЕМВ, пов'язану з довжиною його хвилі [34, 36].

Фотонні матриці «Барва-Флекс/К» мають червоний колір випромінювання, який підсилює емоції і стимулює роботу всіх органів чуття, підвищує внутрішні ресурси організму і життєвий тонус, активізує діяльність печінки і нирок. Він стимулює кістково-м'язову систему, процеси кровообігу і теплоутворення, підвищує знижений кров'яний тиск, усуває застійні явища в органах.

Фотонні матриці «Барва-Флекс/О» мають оранжевий колір випромінювання, який має протизапальну, протинабрякову, десенсибілізуючу дію, стимулює регенерацію тканин. Він покращує мікроциркуляцію крові і лімфи, підвищує до норми знижений артеріальний тиск, стимулює роботу серця, покращує роботу надниркової залози, сприяє виробленню адреналіну.

Випромінювання оранжевого кольору нормалізує діяльність шлунково-кишкового тракту, збуджує апетит, регулює діяльність щитовидної залози, знімає м'язову напругу.

Фотонні матриці «Барва-Флекс/Ж» мають жовтий колір випромінювання, який стимулюватиме інтелектуальні здібності і мобілізує діяльність нервової системи, стимулюватиме роботу лімфатичної і кровоносних систем, релаксує шлунково-кишковий тракт. Цей колір надає очищаючу дію на печінку, селезінку і шкіру, відновлює запаси мінеральних речовин і знижує кислотність в організмі, помірно знижує підвищений кров'яний тиск.

Фотонні матриці «Барва-Флекс/З» мають зелений колір випромінювання, який стабілізує емоції і гармонізує всі функції організму, нормалізує діяльність серцево-судинної системи (знижує сильне серцебиття і судинний тонус, розширює капіляри, стабілізує кров'яний тиск, лікує аритмію), сприяє відновленню м'язів, кісток та інших тканин організму, проявляє антисептичні і протимікробні властивості. Зелений колір ефективний при головних болях, безсонні, виснаженні, стомленні очей, порушеннях зору.

Фотонні матриці «Барва-Флекс/Г» мають голубий (синьо-зелений) колір випромінювання, який має протизапальну та антибактерицидну дію, регулює роботу серця, нормалізує сон, покращує обмін речовин. Це випромінювання підвищує киснево-транспортну функцію крові, знижує м'язовий тонус, попереджає утворення колоїдних рубців.

Фотонні матриці «Барва-Флекс/С» мають синій колір випромінювання, який особливо ефективний при зайвій емоційності, слабкому контролі реакцій, неадекватності вчинків, схильності до песимізму і використовується при лікуванні різних захворювань, що виникають на ґрунті неврозів. Цей колір має протизапальну, седативну, релаксуючу і безпечну дію переважно на шкіру, слизисті оболонки, легені, кишечник, центральну нервову систему і кров людини, застосовується при лікуванні гнійних ран і гранулом. Синій колір покращує функцію ендокринних залоз (зокрема стимулює паращитовидні залози), знижує температуру тіла, підвищує імунітет.

Фотонні матриці «Барва-Флекс/Ф» мають фіолетовий колір випромінювання, який має протизапальну, анальгезуючу, десенсибілізуючу, антибактерицидну і спазмолітичну дію. Випромінювання фіолетового кольору знімає

м'язову напругу, нормалізує діяльність лімфатичних вузлів і підшлункової залози, знижує інтенсивність обміну речовин, сприяє зупинці кровотечі.

Фотонні матриці, що містять, окрім світлодіодів основного кольору випромінювання, інфрачервоні світлодіоди (табл. 11.2), можуть бути використані замість монохромних матриць.

Розміщення фотонних матриць по відношенню до тіла пацієнта можливо трьома способами: дистантним, контактним і контактним з компресією.

При дистантному способі опромінювання матриця розташовується на деякій відстані від тіла, внаслідок чого 5–10 % енергії ЕМВ відбивається від його поверхні.

При контактному способі опромінювання практично вся енергія ЕМВ поглинається тканинами організму, в якому вона поширюється за законами нелінійної оптики з причини неоднорідності тканин.

При компресії тканин фотонною матрицею досягається найбільша глибина проникнення для цієї довжини хвилі ЕМВ, крім того, за рахунок ущільнення тканин знижується ступінь дивергенції випромінювання, тобто його розсіювання.

Перед проведенням процедури фототерапії зовнішні поверхні фотонних і магнітних матриць повинні бути продезінфіковані 3 % розчином перекису водню з додаванням 0,5 % миючого засобу або 1 % розчину «Дихлор-1».

11.1.2. Лазерні і фотонні масажери Коробова «Барва-ЛМК» і «Барва-ФМК/ПХ»

Ще одним з серії персональних медичних апаратів, що випускаються корпорацією «Лазер і Здоров'я», є лазерний масажер Коробова «Барва-ЛМК», зовнішній вигляд якого наведений на рис. 11.3. Лазерний масажер призначений для використання у неврології, кардіології, пульмонології, гінекології, отоларингології, стоматології, гастроентерології, дерматології, при захворюваннях опорно-рухового апарата, варикозному розширенні вен, целюліті, синдромі хронічної втоми, у спортивній медицині, у домашніх умовах для індивідуального лікування і профілактики цілого ряду різних захворювань [37].

Відмітною особливістю лазерного масажера є те, що він забезпечує

поєднану дію двох чинників – ЕМВ напівпровідникових лазерів з пресурним масажем прозорого ролика з вістрями, що обертаються. Завдяки механічній дії вдається істотно знизити втрати ЕМВ лазерів і здійснювати його доставку до більш глибоко розташованих тканин.



Рисунок 11.3 – Зовнішній вигляд лазерного масажера Коробова «Барва-ЛМК»

Під дією лазерного випромінювання збільшується енергетична активність клітинних мембран, приводяться в дію процеси регенерації, посилюється поглинання кисню тканинами, стимулюється утворення АТФ в мітохондріях, що підвищує біоенергетичний потенціал клітин.

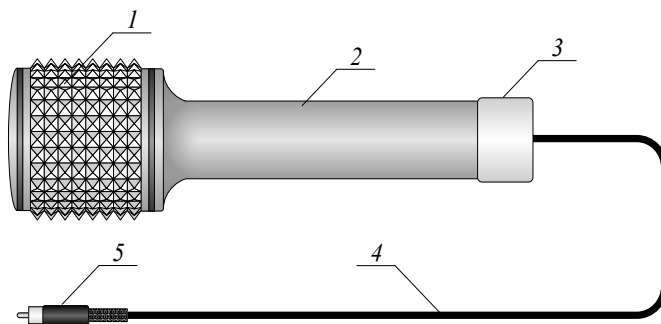
Подразнення, викликане пресурним масажем ролика з вістрями, сприймається рецепторним апаратом шкіри, м'язів, суглобів і передається шляхом складних рефлексів через вегетативні та анімальні нерви у вищі відділи ЦНС. Ці подразнення, досягнувши ЦНС, викликають у відповідь рефлекторні реакції судинно-рухового і трофічного характеру. Під дією цих реакцій посилюються окисно-відновні процеси, які покращують живлення м'язів і сприяють зміцненню та поліпшенню їх моторних функцій. Залежно від сили масажу, тривалості його дії і стану організму різною мірою і змінюються: хімізм м'язового обміну, поліпшення крово- і лімфообігу, відбувається усунення венозних застоїв, збільшення постачання тканин киснем, підвищення тканинного обміну, прискорення виділення продуктів обміну.

Основні технічні дані лазерного масажера Коробова «Барва-ЛМК» наведено в табл. 11.3.

Таблиця 11.3 – Технічні дані лазерного масажера Коробова «Барва-ЛМК»

Найменування параметра	Од. вим.	Значення
Довжина хвилі випромінювання лазерів	нм	650
Потужність випромінювання кожного з п'яти лазерів	мВт	5
Модифікація масажера з акумуляторними батареями:		
– тривалість безперервної роботи без підзарядки	год	5
– напруга живлення зарядного пристрою	В	220 ± 22
– частота напруги живлення зарядного пристрою	Гц	50
– тривалість заряду акумуляторних батарей	год	16
– струм заряду акумуляторних батарей	мА	95
Модифікація масажера з мережевим блоком електроживлення:		
– напруга живлення блока	В	220 ± 22
– частота напруги живлення блока	Гц	50
– напруга на виході блока	В	14
Потужність, вживана масажером, не більше	Вт	3
Габаритні розміри масажера	мм	215×Ø63

У складі лазерного масажера «Барва-ЛМК» можна виділити два функціональні елементи – прозорий ролик 1 з вістрями (для проведення пресурного масажу) і лазерну систему, що розміщена на рукоятці 2 масажера усередині прозорого ролика 1 (рис. 11.4).



Рисунки 11.4 – Лазерний масажер Коробова «Барва-ЛМК»

Лазерна система складається з п'яти лазерів безперервної дії, що випромінюють у червоному діапазоні. Електроживлення лазерів (залежно від модифікації) здійснюється від акумуляторних батарей, розміщених у рукоятці масажера,

або від електромережі через спеціальний блок живлення, до якого масажер підключається за допомогою кабелю 4 з роз'ємом 5. У комплект постачання масажера з акумуляторними батареями входить зарядний пристрій, який підключається до масажера через роз'єм, розміщений у рукоятці 2 під ковпачком 3. Включення і виключення лазерів масажера проводиться поворотом ковпачка 3 (для модифікації масажера з акумуляторними батареями) або простим включенням (виключенням) блока живлення в розетку живильної мережі (для модифікації масажера з мережевим електроживленням).

Конструкція лазерного масажера забезпечує абсолютну безпеку пацієнта при використанні апарата в домашніх умовах. Це досягається за рахунок розсіювання випромінювання лазерів у прозорому ролику, що знижує густину потужності випромінювання до безпечного рівня вже в декількох сантиметрах від масажера.

З метою розширення сфери ефективного застосування лазерного масажера і переходу на світлодіодні джерела був розроблений поліхромний фотонний масажер Коробова «Барва-ФМК/ПХ». Відмітною особливістю цього апарата є поліхромний випромінюючий блок, який містить 25 особливо яскравих світло діодів, що дозволяє генерувати ЕМВ від ближнього ІЧ спектра (940 нм) до синього (470 нм), або використовувати будь-яку комбінацію ЕМВ у вказаному діапазоні [34]. Керування випромінюванням фотонного масажера здійснюється п'ятиканальним мікропроцесорним блоком імпульсного керування МПБ-5С/20, до якого масажер підключається за допомогою багатожильного кабелю з роз'ємом. Технічні дані і параметри випромінювання поліхромного фотонного масажера «Барва-ФМК/ПХ» наведено в табл. 11.4.

Таблиця 11.4 – Технічні дані поліхромного масажера Коробова «Барва-ФМК/ПХ»

Найменування параметра	Од. вим.	Значення
1	2	3
Довжина хвилі випромінювання світлодіодів:		
– інфрачервоний спектр (5 шт.)	нм	940
– червоний спектр (5 шт.)	нм	650
– жовтий спектр (5 шт.)	нм	595
– зелений спектр (5 шт.)	нм	525
– синій спектр (5 шт.)	нм	470

Закінчення табл. 11.4

1	2	3
Потужність випромінювання кожного з двадцяти п'яти світлодіодів	мВт	5
Напруга живлення кожної з світлодіодних груп	В	14 ± 0,3
Потужність, споживана кожною з світлодіодних груп, не більше	Вт	0,5
Габаритні розміри масажера	мм	215×Ø63

Техніка проведення процедур лазерним масажером «Барва-ЛМК» або поліхромним фотонним масажером «Барва-ФМК/ПХ» нічим не відрізняється від класичної техніки масажу звичайними масажерами (металевими, дерев'яними, пластмасовими). Відмінність полягає тільки в результаті масажу, оскільки ефект від нього посилюється завдяки додатковій дії ЕМВ ІЧ оптичного діапазону. Причому це посилення не адитивне, а синергічне.

Для дезинфікування масажера рекомендується використовувати 70 % розчин етилового спирту. Ролик з вістрями, заздалегідь знятий з рукоятки, необхідно витримати в розчині спирту 2–3 хвилини, а рукоятку масажера досить протерти тампоном, змоченим у розчині спирту.

Таким чином, включення масажерів Коробова «Барва-ЛМК» або «Барва-ФМК/ПХ» в апаратний комплекс для сімейного лікаря і сільського ФАПу, з одного боку, істотно розширює список патологій, що потрапляють у сферу впливу комплексу, а з іншого боку, підвищує ефективність лікування ряду захворювань при сумісному використанні з фотонними матрицями «Барва-Флекс».

11.1.3. Фотонні зонди Коробова «Барва-ГПУ»

Запальні захворювання в гінекології, проктології та урології є у теперішній час широко поширеною патологією. У ряді випадків це обумовлено такими чинниками, як низька ефективність лікарських препаратів, велика кількість ускладнень, збільшення кількості захворювань, що передаються статевим шляхом, а також проблеми з повноцінним обстеженням пацієнтів. Незважаючи на велику кількість методів лікування запальних захворювань, впровадження в

клінічну практику фототерапії істотно розширює можливості лікарів і підвищує якість лікування, що проводиться. Для проведення лікувальних процедур у гінекології, проктології та урології НДІ лазерної біології і лазерної медицини (м. Харків, Україна) і Горлівським науково-практичним підприємством «Лазер і Здоров'я» (м. Горлівка, Україна) був розроблений фотонний зонд «Барва-ГПУ», а в подальшому – його модифікований варіант зонд «Барва-ГПУ2», де кількість світло діодів збільшена вдвічі (рис. 11.5).

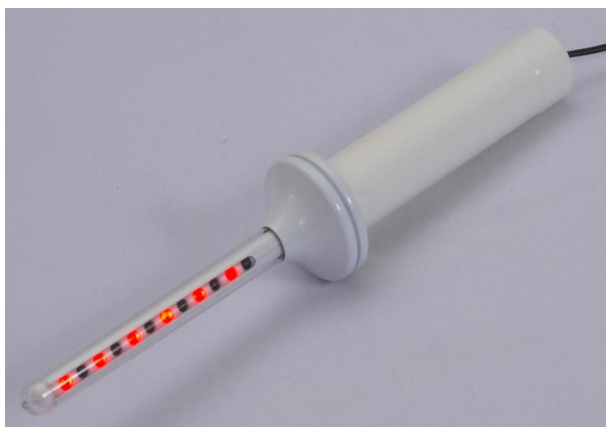


Рисунок 11.5 – Зовнішній вигляд фотонного зонда Коробова «Барва-ГПУ2»

Фотонні зонди Коробова «Барва-ГПУ2» використовуються для лікування і профілактики таких захворювань: у гінекології – вульвовагініт, ендометриоз, кольпіт, ерозія шийки матки, сальпінгоофорит і т.ін., в проктології – анальне свербіння і геморої, в урології – неспецифічний простатит та аденома передміхурової залози [38].

В основу лікувальної дії фотонних зондів Коробова покладено здатність ЕМВ ІЧ і червоного діапазонів збільшувати енергетичну активність клітинних мембран, приводити в дію процеси регенерації, надавати протизапальний, анальгезуючий і загоювальний ефекти. При лікуванні гінекологічних та урологічних захворювань фототерапію доцільно поєднувати з медикаментозною терапією. При цьому у зоні дії ЕМВ відбувається збільшення концентрації лікарської речовини, його дія пролонгується, а терапевтичний ефект посилюється. Все це дозволяє знизити дозування вживаних лікарських препаратів.

На відміну від традиційного підходу – «Апарат лазерної терапії + оп-

тична насадка», у фотонних зондах Коробова здійснюється безпосередня дія джерелами випромінювання на патологічну ділянку. Такий підхід дозволяє підвищити густину випромінювання за рахунок відсутності втрат у світловоді і насадці, а також на переходах джерело випромінювання – світловод і світловод-насадка. Основні технічні дані зонда «Барва-ГПУ2» наведено в табл. 11.5.

Таблиця 11.5 – Технічні дані фотонного зонда Коробова «Барва-ГПУ2»

Найменування параметра	Од. вим.	Значення
Довжина хвилі випромінювання світлодіодів:		
– інфрачервоний спектр	нм	940
– червоний спектр	нм	660
Потужність випромінювання кожного світлодіода	мВт	5
Напруга живлення зонда	В	14 ± 0,3
Потужність, вживана зондом, не більше	Вт	0,7
Габаритні розміри зонда, не більше	мм	300×Ø54
Габаритні розміри активної частини зонда	мм	160×Ø16

Випромінювальна система 1 у фотонному зонді «Барва-ГПУ2» містить 6 світлодіодів червоного спектра і 6 світлодіодів ІЧ спектра, розміщених в лінію, і таких, що чергуються через один (рис. 11.6). Ця система знаходиться в активній частині зонда і захищена прозорою пластиковою колбою 2, укріпленою на рукоятці 3.

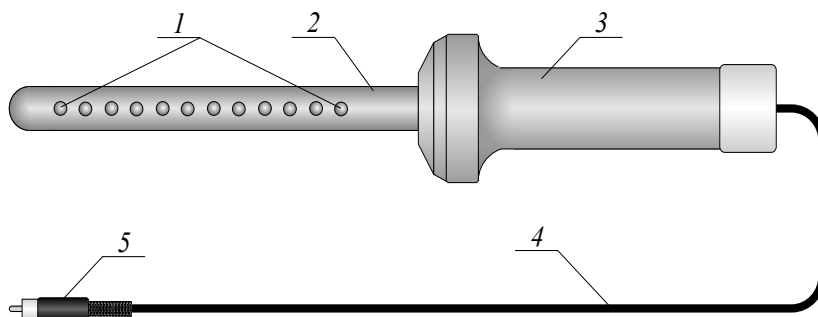


Рисунок 11.6 – Конструкція фотонного зонда Коробова «Барва-ГПУ2»

Електроживлення світлодіодів здійснюється від електромережі через спеціальний блок живлення або від мікропроцесорного блока імпульсного керування, до якого зонд підключається за допомогою кабелю 4 з роз'ємом 5.

Дотримання санітарно-гігієнічних вимог забезпечується застосуванням презерватива, який одягається на захисну колбу і фіксується на спеціальному виступі рукоятки зонда. Сам зонд і рукоятка обробляються 70 % розчином медичного спирту або засобом «Дезоксон».

Використання фотонних зондів Коробова скорочує тривалість лікування захворювань у 2–3 рази.

Включення фотонних зондів Коробова «Барва-ГПУ» або «Барва-ГПУ2» до складу апаратного комплексу для сімейного лікаря або сільського ФАПу практично повністю закриває «білі плями», що залишилися, в переліку найбільш поширених захворювань, з якими можуть на практиці зіткнутися сімейні і сільські лікарі.

11.1.4. Універсальний фотонний гінекологічний зонд «Барва-ГИН/30»

На відміну від фотонного зонда Коробова «Барва-ГПУ», універсальний фотонний гінекологічний зонд «Барва-ГИН/30» містить світлодіодні випромінювачі не тільки в бічній зоні активної частини зонда, але і в торцевій його частині (рис. 11.7) [39].



Рисунок 11.7 – Зовнішній вигляд універсального фотонного гінекологічного зонда «Барва-ГИН/30»

Корпорація «Лазер і Здоров'я» випускає універсальні гінекологічні зонди в декількох модифікаціях, з комбінаціями випромінювань в інфрачервоному, червоному, зеленому та у синьому спектрах (перша половина світлодіодів – з інфрачервоним випромінюванням, друга половина світлодіодів – із випромінюванням з видимої частини спектра).

Основні технічні дані універсальних фотонних гінекологічних зондів «Барва-ГИН/30» наведено в табл. 11.6.

Таблиця 11.6 – Технічні дані універсальних фотонних гінекологічних зондів «Барва-ГИН/30»

Найменування параметра	Од. вим.	Значення
Довжина хвилі випромінювання світлодіодів:		
– інфрачервоний спектр	нм	940
– червоний спектр (перша модифікація)	нм	660
– зелений спектр (друга модифікація)	нм	525
– синій спектр (третья модифікація)	нм	470
Кількість світлодіодів у торцевому випромінювачі	шт.	6
Кількість світлодіодів в кожній з шести світлодіодних груп бічних випромінювачів	шт.	12
Потужність випромінювання кожного світлодіода	мВт	5
Напруга живлення кожної світлодіодної групи	В	14 ± 0,3
Потужність, вживана зондом, не більше	Вт	4
Габаритні розміри зонда, не більше	мм	300×Ø54
Габаритні розміри активної частини зонда, не більше	мм	200×Ø30

Випромінювальна система універсального фотонного гінекологічного зонда «Барва-ГИН/30» знаходиться в його активній частині і захищена порожнистим циліндром 1 діаметром 30 мм, виконаним з прозорого пластика (рис. 11.8). Один кінець робочої частини зонда закруглений, а інший укріплений на рукоятці 2. Випромінювальна система складається з бічного випромінювача 3, який містить шість лінійних світлодіодних груп по 12 світлодіодів, рівномірно розподілених по колу уздовж циліндра, і торцевого випромінювача 4 – одна світлодіодна група з 6 світлодіодів (по 5 мВт кожен),

розміщених по колу в торці активної частини зонда.

Кількість світлодіодів інфрачервоного спектра випромінювання рівна кількості світлодіодів червоного (або зеленого чи синього) спектрів у кожній світлодіодній групі. При цьому максимальне значення потужності випромінювання кожної світлодіодної групи бічного випромінювача становить 60 мВт, всього бічного випромінювача – 360 мВт, торцевого випромінювача – 30 мВт, а всієї випромінювальної системи – 390 мВт. Різні режими роботи (безперервний, імпульсний або скануючий) універсального гінекологічного зонда забезпечуються інтелектуальним мікропроцесорним модулем ИМПМ-7/40 Г. Підключення зонда до модуля ИМПМ-7/40 Г здійснюється за допомогою спеціального кабелю 5 з роз'ємом 6.

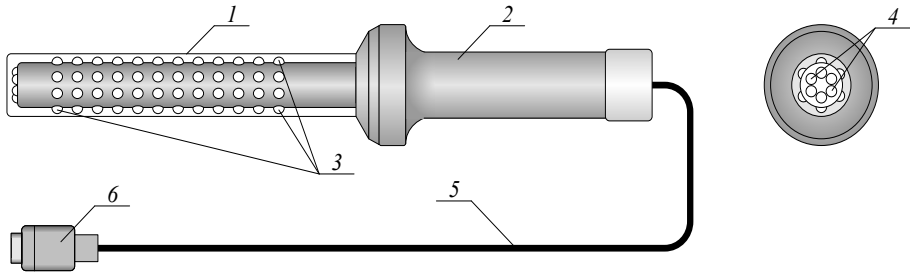


Рисунок 11.8 – Конструкція універсального фотонного гінекологічного зонда «Барва-ГИН/30»

Дотримання санітарно-гігієнічних вимог при використанні універсального фотонного гінекологічного зонда «Барва-ГИН/30» забезпечується застосуванням презерватива, який одягається на захисну колбу і фіксується на спеціальному виступі рукоятки зонда. Для дезінфекції зонда і його рукоятки застосовується 70 % розчин медичного спирту або дезінфікуючий засіб «Дезоксон».

Використання різних модифікацій універсального фотонного гінекологічного зонда «Барва-ГИН/30» дозволяє оптимізувати терапевтичний ефект в піхві, а наявністю ЕМВ інфрачервоного діапазону – добитися високого терапевтичного ефекту і в ділянці всього малого тазу, що є неодмінною умовою якісного лікування більшості гінекологічних захворювань.

11.2. БЛОКИ ЖИВЛЕННЯ ТА ІМПУЛЬСНОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ ФОТОННИХ АПАРАТІВ

При індивідуальному використанні таких фотонних апаратів Коробова, як фотонні матриці «Барва-Флекс» або лазерні масажери «Барва-ЛМК», для електроживлення світлодіодів і лазерів найдоцільніше використовувати прості в роботі блоки живлення. При цьому тривалість роботи апаратів в безперервному режимі обмежується самим користувачем шляхом виключення блока живлення.

При створенні фототерапевтичного апаратного комплексу «БАРВА-ТЕРАПЕВТ/ССД» для сімейного лікаря або сільського фельдшерсько-акушерського пункту доцільно забезпечення роботи апаратів не тільки в безперервному, але в імпульсному і скануючому режимах. Крім того, при деяких захворюваннях корисним виявляється одночасне використання декількох апаратів, а спрощення експлуатації комплексу медичним персоналом може бути досягнуто за рахунок автоматичного обмеження тривалості процедур.

Для вирішення питань, пов'язаних із створенням фототерапевтичного апаратного комплексу, лабораторією біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за завданням Корпорації «Лазер і Здоров'я» були розроблені мікропроцесорні блоки імпульсного керування МПБ-2С/80, МПБ-5С/20 та інтелектуальний мікропроцесорний модуль ИМПМ-7/40 Г для забезпечення різних режимів роботи апаратів Коробова, що істотно розширює їх функціональні можливості [40-42].

Робота мікропроцесорних блоків керування МПБ-2С/80, МПБ-5С/20 та інтелектуального мікропроцесорного модуля ИМПМ-7/40 Г основана на перетворенні змінної напруги живильної мережі в стабілізовану постійну або імпульсну напругу для живлення світлодіодів фотонних апаратів, в яких відбувається безпосереднє перетворення електричної енергії в ЕМВ ІЧ і видимої частини спектра. При цьому форма імпульсу випромінювання буде близька до форми імпульсу напруги, що прикладається до світлодіодів.

Необхідний режим роботи фотонних апаратів (безперервний, імпульсний або скануючий), дозування дії за тривалістю опромінювання, захист

від переважання за струмом, а також відображення параметрів опромінювання забезпечуються мікроконтролером, який реалізує принципи мікропроцесорного імпульсного керування, основані на положеннях теорії цифро-імпульсних та імпульсно-цифрових перетворень [23]. Використання цієї теорії в мікропроцесорних системах імпульсного керування дозволяє забезпечити високу точність формування частотно-часових параметрів модуляції ЕМВ [24].

11.2.1. Спеціалізований блок живлення

Спеціалізований блок живлення призначений для забезпечення роботи в безперервному режимі таких фототерапевтичних апаратів Коробова, як матриці «Барва-Флекс», лазерні масажери «Барва-ЛМК» і фотонні зонди «Барва-ГПУ». Основні технічні дані блока живлення наведено в табл. 11.7.

Таблиця 11.7 – Технічні дані спеціалізованого блока живлення

Найменування параметра	Од. вим.	Значення
Напруга живлення	В	220 ± 22
Частота змінної напруги живлення	Гц	50
Максимальне значення потужності, що споживається з мережі	ВА	5
Вихідна напруга	В	14 ± 0,3
Максимальне значення вихідного струму	мА	300
Габаритні розміри, не більше	мм	90×85×55

Конструктивно блок живлення виконаний в мініатюрному пластмасовому корпусі 1 (рис. 11.9), суміщеному з вилкою 2 для підключення до розетки живильної мережі. На верхньому боці корпусу розташований світлодіодний індикатор 3, призначений для сигналізації про наявність напруги на виході блока живлення. На правому боці корпусу знаходиться гніздо 4 для підключення до блока живлення перехідного кабелю 5 з двома роз'ємами. Роз'єм 6 призначений для підключення перехідного кабелю до гнізда 4 блока живлення. Роз'єм 7 призначений для підключення фототерапевтичних апаратів до перехідного кабелю.

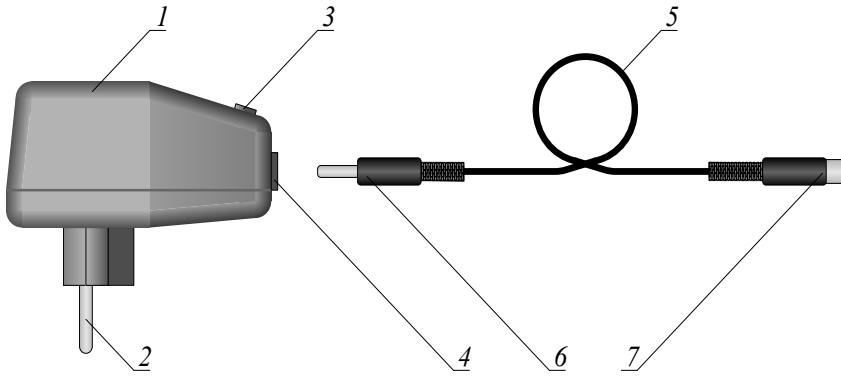


Рисунок 11.9 – Конструкція спеціалізованого блока живлення

Спеціалізований блок живлення реалізований за традиційною для малопотужних джерел живлення схемою: трансформатор – випрямляч – фільтр – стабілізатор. Принципову електричну схему блока живлення наведено на рис. 11.10. Мережевий трансформатор T служить для зниження напруги живильної мережі, а також здійснює гальванічну розв'язку вихідних ланцюгів блока живлення від живильної мережі. Це дозволяє забезпечувати необхідний рівень електробезпеки і захист користувача від ураження електричним струмом.

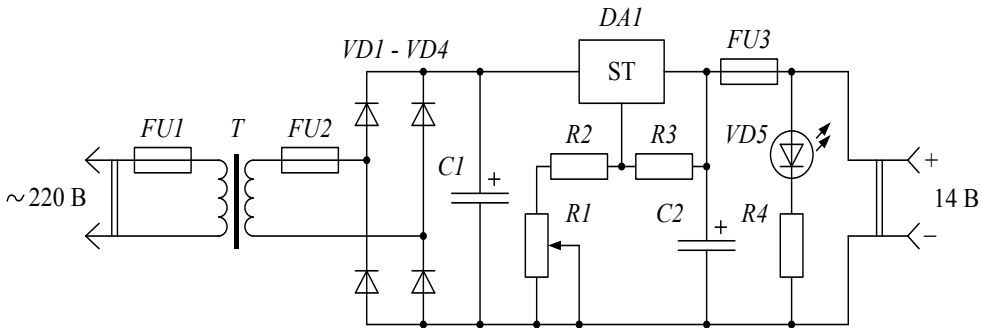


Рисунок 11.10 – Принципова електрична схема спеціалізованого блока живлення

Мостовий діодний випрямляч $VD1-VD4$ виконаний за інтегральною технологією і призначений для випрямлення вихідної напруги трансформатора T . Конденсатор $C1$ згладжує пульсації випрямленої напруги. Інтегральний стабілізатор компенсаційного типу $DA1$ служить для стабілізації вихід-

ної напруги блока живлення при змінах напруги живильної мережі та опору навантаження.

Світловипромінюючий діод *VD5* виконує функцію індикатора наявності напруги на виході блока живлення. Для захисту елементів блока живлення від перевантажень за струмом у вхідних і у вихідних ланцюгах служать плавкі запобіжники *FU1-FU3*.

Для забезпечення роботи будь-якого з перерахованих фототерапевтичних апаратів від блока живлення досить підключити його до блока через перехідний кабель, а сам блок живлення вставити у розетку живильної мережі. Випромінювання світлодіодного індикатора на корпусі блока живлення вкаже при цьому на наявність напруги на його виході, а випромінювання самого фототерапевтичного апарата – на його працездатність.

Щоб уникнути виходу блока живлення з ладу, не слід підключати його до живильної мережі без навантаження – фототерапевтичного апарата.

11.2.2. Двоканальний мікропроцесорний блок імпульсного керування МПБ-2С/80

11.2.2.1. Призначення та основні технічні дані мікропроцесорного блока МПБ-2С/80.

Двоканальний мікропроцесорний блок імпульсного керування МПБ-2С/80 призначений для забезпечення роботи фототерапевтичних апаратів Коробова в безперервному, імпульсному або у скануючих режимах (сканування за частотою модуляції світлового потоку), а також для дозування процедури за тривалістю дії.

До виходу блока керування одночасно можуть бути підключені два апарати – дві фотонні матриці «Барва-Флекс», фотонна матриця «Барва-Флекс» і лазерний масажер «Барва-ЛМК», фотонна матриця «Барва-Флекс» і фотонний зонд «Барва-ГПУ» чи «Барва-ГПУ2». Зовнішній вигляд мікропроцесорного блока керування з підключеними фотонною матрицею «Барва-Флекс» і фотонним зондом «Барва-ГПУ2» показано на рис. 11.11.

Технічні дані мікропроцесорного блока МПБ-2С/80 наведено в табл. 11.8. За способом захисту пацієнта та обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом він відповідає класу II, тип ВF.



Рисунок 11.11 – Зовнішній вигляд двоканального мікропроцесорного блока імпульсного керування МПБ-2С/80

Таблиця 11.8 – Технічні дані мікропроцесорного блока МПБ-2С/80

Найменування параметра	Од. вим.	Значення
1	2	3
Напруга живлення	В	220 ± 22
Частота змінної напруги живлення	Гц	50
Максимальна потужність, споживана з мережі змінної напруги	ВА	5
Вихідна напруга кожного каналу в безперервному режимі	В	14 ± 0,3
Номінальне значення вихідного струму кожного каналу	мА	80
Максимальне значення вихідного струму кожного каналу	мА	100
Номінальне значення вихідного струму одного каналу (при відсутності навантаження в другому)	мА	160
Максимальне значення вихідного струму одного каналу (при відсутності навантаження в другому)	мА	200
Діапазон регулювання частоти модуляції світлового потоку в імпульсному режимі	Гц	1–99
Діапазон зміни частоти модуляції світлового потоку в першому скануючому режимі	Гц	1–10

Закінчення табл. 11.8

1	2	3
Дискретність зміни частоти модуляції світлового потоку в першому скануючому режимі	Гц	1
Діапазон зміни частоти модуляції світлового потоку в другому скануючому режимі	Гц	10–100
Дискретність зміни частоти модуляції світлового потоку в другому скануючому режимі	Гц	10
Період сканування за частотою модуляції в будь-якому із скануючих режимів	с	60
Припустиме відхилення частоти модуляції світлового потоку від встановленого значення	%	0,2
Шпаруватість імпульсів світлового потоку в імпульсному і скануючому режимах	–	2
Діапазон установки тривалості випромінювання	хв	1–99
Припустиме відхилення тривалості випромінювання від встановленого значення	с	0,5
Габаритні розміри блока керування, не більше	мм	195×140× 50
Маса блока керування, не більше	кг	2,5

11.2.2.2. Конструкція мікропроцесорного блока МПБ-2С/80.

Конструктивно блок керування виконаний у пластмасовому корпусі, що складається з верхньої і нижньої кришок. Всі електронні компоненти блока змонтовані на друкованій платі, яка разом з мережевим трансформатором розташована усередині корпусу. Верхня кришка корпусу служить лицьовою панеллю. Блок керування МПБ-2С/80 з боку лицьової панелі показано на рис. 11.12.

На лицьовій панелі блока керування розташовані:

1 – клавіша-індикатор мережевого вимикача, призначеного для включення і виключення блока;

2 – цифровий світлодіодний індикатор «ТАЙМЕР мин»;

3 – точковий світлодіодний індикатор « ! » аварійної ситуації;

4 – точковий світлодіодний індикатор «ПУСК»;

5 – кнопка «ПУСК», призначена для початку процесу опромінювання і

його дострокового припинення;

6 – кнопки «▼» і «▲» зменшення і збільшення, призначені для установки тривалості опромінювання;

7 – кнопки «▼» і «▲» зменшення і збільшення, призначені для вибору режиму роботи апарата і задання частоти модуляції в імпульсному режимі;

8 – цифровий світлодіодний індикатор «ЧАСТОТА Гц», призначений для відображення вибраного режиму роботи (символи «НР» відповідають безперервному режиму роботи «С1» – першому скануючому режиму «С2» – другому скануючому режиму) або частоти модуляції світлового потоку в імпульсному режимі.

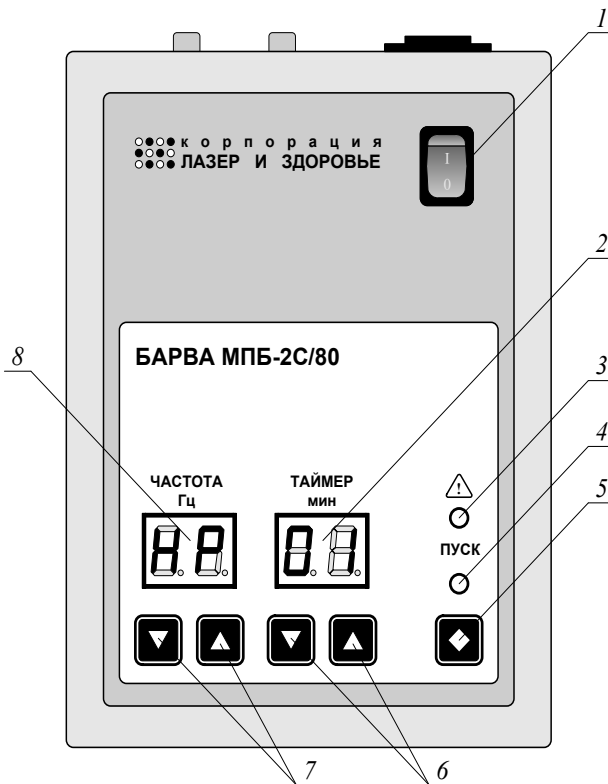


Рисунок 11.12 – Мікропроцесорний блок імпульсного керування МПБ-2С/80 (вигляд з боку лицьової панелі)

На задній частині верхньої кришки корпусу блока керування (рис.

11.13) встановлено:

9 – роз'єм для підключення знімного мережевого кабеля;

10 – роз'єм першого каналу блока керування для підключення фототерапевтичного апарата;

11 – роз'єм другого каналу блока керування для підключення фототерапевтичного апарата.

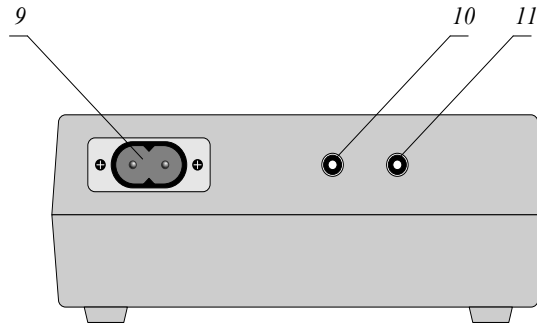


Рисунок 11.13 – Мікропроцесорний блок імпульсного керування МПБ-2С/80 (вигляд з боку задньої стінки)

У зв'язку з тим, що при роботі блока керування не потрібне захисне заземлення (занулення), його підключення до живильної мережі здійснюється за допомогою мережевого кабелю із стандартною двополюсною вилкою.

11.2.2.3. Принцип дії мікропроцесорного блока МПБ-2С/80.

Функціональну електричну схему мікропроцесорного блока керування МПБ-2С/80 наведено на рис. 11.14.

Основним елементом блока керування є мікроконтролер (МК), який виконує функції блока обробки інформації (БОІ), що надходить від пульта керування (ПК) і блока порівняння (БП), на вхід якого приходять сигнали від датчика струму (ДС) і джерела опорного сигналу (ДОС). Крім того, МК виконує функції першого цифро-імпульсного перетворювача з широтно-імпульсним законом перетворення (ЦПП1 з ШПП), що забезпечує обмеження тривалості опромінювання, другого цифро-імпульсного перетворювача з частотно-імпульсним законом перетворення (ЦПП2 з ЧП), що формує період проходження імпульсів вихідної напруги каналів блока в імпульсному і ска-

нуючому режимам роботи, і третього цифро-імпульсного перетворювача з широтно-імпульсним законом перетворення (ЦПЗ з ШПП), що формує тривалість цих імпульсів;

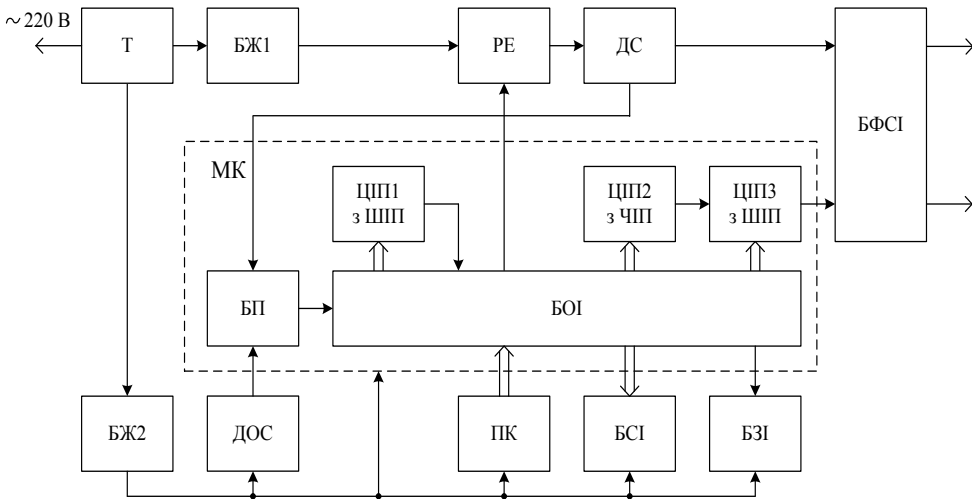


Рисунок 11.14 – Функціональна електрична схема мікропроцесорного блока імпульсного керування МПБ-2С/80

Крім того, до складу блока керування входять:

– ПК – пульта керування, що дозволяє вибирати режим роботи фототерапевтичних апаратів (безперервний, імпульсний або скануючий), задавати частоту модуляції випромінювання в герцах (при імпульсному режимі роботи) і тривалість опромінювання в хвилинах;

– БСІ – блок світлової індикації в своєму складі містить:

- цифровий світлодіодний індикатор «ЧАСТОТА Гц», призначений для відображення безперервного режиму опромінювання (символи «НР»), скануючих режимів (символи «С1» або «С2») або значення заданої частоти модуляції ЕМВ в імпульсному режимі опромінювання;

- цифровий світлодіодний індикатор «ТАЙМЕР мин», призначений для відображення тривалості опромінювання, заданої до початку опромінювання або тої, що залишилася до закінчення опромінювання після його початку;

- точковий світлодіодний індикатор червоного кольору «!», призначений для індикації аварійної ситуації, пов'язаної з перевантаженням за стру-

мом у вихідному ланцюзі блока керування;

- точковий світлодіодний індикатор зеленого кольору «ПУСК», призначений для індикації процесу опромінювання;

- БЗІ – блок звукової індикації, призначений для сигналізації про початок і закінчення процесу опромінювання (короткі звукові сигнали), а також для додаткової сигналізації про виникнення аварійної ситуації (переривисті звукові сигнали до моменту виключення блока);

- Т – мережевий трансформатор, що забезпечує гальванічну розв'язку мікропроцесорної частини блока і його навантаження з живильною мережею і знижує її напругу до рівнів, необхідних для живлення елементів схеми;

- БЖ1 – перший блок живлення, що містить у своєму складі випрямляч, ємнісний фільтр, стабілізатор напруги і призначений для стабілізації напруги на виходах каналів блока керування на рівні 14 В;

- РЕ – релейний елемент, призначений для відключення виходу першого блока живлення від подальших блоків і виходів каналів блока керування;

- ДС – датчик струму, що дозволяє контролювати сумарний вихідний струм каналів блока керування для організації захисту при виникненні перевантажень за струмом;

- БФС1 – блок формування синхронних імпульсів вихідної напруги каналів блока керування, що забезпечує переривання струму в ланцюзі фототерапевтичних апаратів для модуляції світлового потоку;

- БЖ2 – другий блок живлення, що містить в своєму складі випрямляч, ємнісний фільтр, стабілізатор напруги і призначений для стабілізації напруги на рівні 5 В, яка необхідна для живлення мікроконтролера та індикаторів;

- ДОС – джерело опорного сигналу, призначене для формування сигналу, пропорційного гранично допустимому сумарному значенню вихідного струму блока керування.

При роботі блока керування в безперервному режимі (на індикаторі «ЧАСТОТА Гц» відображаються символи «НР») випромінювання світлодіодів фототерапевтичних апаратів буде безперервним, а потужність випромінювання – максимальною. В імпульсному режимі при будь-якій встановленій частоті модуляції, значення якої відображається на цьому індикаторі «ЧАСТОТА Гц», шпаруватість вихідної напруги блока керування буде рівна двом

(тривалість імпульсу рівна половині періоду), а потужність випромінювання фототерапевтичного апарата при цьому буде в два рази менше, ніж в безперервному режимі. У будь-якому з скануючих режимів (на індикаторі «ЧАСТОТА Гц» відображаються символи «С1» – перший скануючий режим, або символи «С2» – другий скануючий режим) потужність випромінювання також буде в два рази менша, ніж у безперервному режимі.

Зміна частоти модуляції ЕМВ в першому скануючому режимі (рис. 11.15, а) визначається виразом:

$$f_{MC1} = \Delta f_{C1} \left(1 + \left[\frac{t}{\tau} \right] \right),$$

де $\Delta f_{C1} = 1$ Гц – дискретність зміни частоти модуляції ЕМВ в першому скануючому режимі; t – поточний час; $\tau = 6$ с – часовий інтервал формування незмінного значення частоти модуляції ЕМВ в скануючих режимах;

$\left[\frac{t}{\tau} \right]$ – ціла частина частки від ділення.

Зміна частоти модуляції ЕМВ в другому скануючому режимі (рис. 11.16, б) визначається виразом:

$$f_{MC2} = \Delta f_{C2} \left(1 + \left[\frac{t}{\tau} \right] \right),$$

де $\Delta f_{C2} = 10$ Гц – дискретність зміни частоти модуляції ЕМВ в другому скануючому режимі.

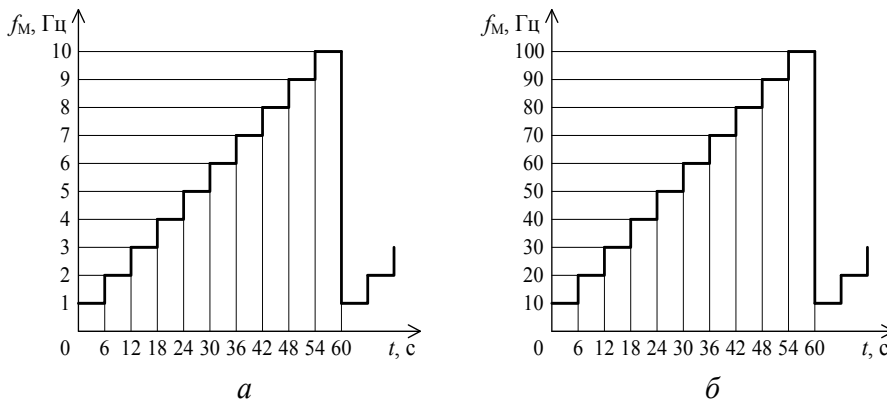


Рисунок 11.15 – Зміна частоти модуляції ЕМВ ГЧ і видимої частини спектра фототерапевтичних апаратів в першому (а) і другому (б) скануючих режимах

З діаграм, наведених на рис. 11.15 видно, що в обох скануючих режимах частота модуляції ЕМВ фототерапевтичних апаратів змінюється за пилкоподібним законом. Вона наростає від мінімального значення до максимального (від 1 до 10 Гц при першому скануючому режимі і від 10 до 100 Гц при другому скануючому режимі) за період сканування, рівний 60 с, а потім стрибком зменшується до мінімального значення.

У блоці керування передбачений захист від перевантажень за струмом у вихідному ланцюзі кожного каналу. При виникненні такого перевантаження фототерапевтичні апарати відключаються блоком формування синхронних імпульсів, а переривисте свічення червоним кольором індикатора аварійних ситуацій «!» указує на виникнення перевантаження. Якщо відключення фототерапевтичних апаратів відбулося, то через 2 с проводиться їх автоматичне повторне включення (АПВ) і за відсутності перевантаження за струмом блок керування відновлює свою роботу. На інтервалі проведення однієї процедури допускається не більше чотирьох АПВ.

У тому випадку, якщо перевантаження за струмом має стійкий характер (наприклад, глухе коротке замикання в кабелі фототерапевтичного апарата), то після п'ятого АПВ апарати остаточно відключаються релейним елементом. При цьому на індикаторі «ЧАСТОТА Гц» відобразатимуться символи «--», а на індикаторі «ТАЙМЕР мин» буде вказана тривалість часового інтервалу, що залишився до закінчення процедури. Переривистий звуковий сигнал і свічення червоним кольором індикатора аварійних ситуацій «!» додатково вказуватимуть на стійке перевантаження за струмом, при якому подальша експлуатація блока керування недопустима.

Якщо, через вихід з ладу ключових елементів блока формування синхронних імпульсів, фототерапевтичні апарати при виникненні перевантаження відключені не були, то вони відключаються релейним елементом. При цьому індикатори вкажуть на виникнення аварійної ситуації, при якій подальша експлуатація блока керування недопустима.

При виникненні аварійних ситуацій блок керування слід відключити, натиснувши на нижню частину клавіші мережевого вимикача, і витягнути вилку мережевого кабелю з розетки живильної мережі. Після усунення причин струмового перевантаження, блок керування буде готовий до роботи.

Виникнення програмного збою в роботі мікроконтролера виявляється в появі на індикаторах ненормованих символів або у блокуванні кнопок керування. При цьому необхідно вимкнути блок керування мережевим вимикачем, а через 2–3 хвилини провести його повторне включення. У тому випадку, якщо блок керування повністю відновив свою працездатність, можлива його подальша експлуатація. Якщо після програмного збою виключення і повторне включення блока керування не привело до відновлення його працездатності, блок слід відключити від мережі і звернутися за допомогою спеціалістів.

Після закінчення встановленої тривалості опромінювання блок керування проводить автоматичне відключення фототерапевтичних апаратів (опромінювання припиняється) і подає короткий звуковий сигнал.

11.2.3. П'ятиканальний мікропроцесорний блок імпульсного керування МПБ-5С/20

11.2.3.1. Призначення та основні технічні дані мікропроцесорного блока МПБ-5С/20.

П'ятиканальний мікропроцесорний блок імпульсного керування МПБ-5С/20 призначений для забезпечення роботи фотонного масажера Коробова «Барва-ФМК/ПХ» у безперервному, імпульсному і скануючому режимах (сканування за довжиною хвилі електромагнітного випромінювання), а також для дозування процедури за тривалістю дії. Крім того, до окремих виходів блока керування можуть бути підключені ще два апарати – дві фотонні матриці «Барва-Флекс» або фотонна матриця «Барва-Флекс» та фотонний зонд «Барва-ГПУ» чи «Барва-ГПУ2».

Максимальна потужність випромінювання будь якого з фотонних апаратів буде мати місце у безперервному режимі. В імпульсному режимі середнє значення потужності випромінювання буде складати половину від максимального значення, бо тривалість імпульсів дорівнює тривалості пауз між ними.

Скануючий режим може бути забезпечений лише для фотонного масажера «Барва-ФМК/ПХ». При виборі цього режиму світлодіоди масажера вмикаються у наступному порядку: сині, зелені, жовті, червоні, інфрачервоні. Випромінювання матриць чи інших апаратів (як що вони підключені) в цьому режимі безперервне.

Зовнішній вигляд мікропроцесорного блока керування з підключеними фотонним масажером «Барва-ФМК/ПХ» і двома фотонними матрицями «Барва-Флекс» показано на рис. 11.16. Основні технічні дані мікропроцесорного блока МПБ-5С/20 наведено в табл. 11.9.



Рисунок 11.16 – Зовнішній вигляд п'ятиканального мікропроцесорного блока імпульсного керування МПБ-5С/20

Таблиця 11.9 – Технічні дані мікропроцесорного блока МПБ-5С/20

Найменування параметра	Од. вим.	Значення
1	2	3
Напруга живлення	В	220 ± 22
Частота змінної напруги живлення	Гц	50
Максимальна потужність, споживана з мережі змінної напруги, не більше	ВА	7
Вихідна напруга кожного каналу в безперервному режимі	В	14 ± 0,3
Номінальне значення вихідного струму кожного з п'яти каналів основного виходу	мА	20
Максимальне значення вихідного струму кожного додаткового виходу	мА	100

Закінчення табл. 11.9

1	2	3
Діапазон регулювання частоти модуляції світлового потоку в імпульсному режимі	Гц	1–99
Допустиме відхилення частоти модуляції світлового потоку від встановленого значення	%	0,2
Шпаруватість імпульсів світлового потоку в імпульсному режимі	–	2
Період сканування по довжині хвилі електромагнітного випромінювання	с	1
Діапазон установки тривалості опромінювання	хв.	1–99
Допустиме відхилення тривалості опромінювання від встановленого значення	с	0,5
Габаритні розміри блока керування, не більше	мм	195×140×50

11.2.3.2. Конструкція мікропроцесорного блока МПБ-5С/20.

Конструктивно блок керування виконано у пластмасовому корпусі, що складається з верхньої і нижньої кришок. Всі електронні компоненти блока змонтовані на друкованій платі, яка разом з мережевим трансформатором розташована усередині корпусу. Верхня кришка корпусу служить лицьовою панеллю. Блок керування МПБ-5С/20 з боку лицьової панелі показано на рис. 11.17.

На лицьовій панелі блока керування розташовані:

1 – клавіша мережевого вимикача, призначеного для включення і виключення блока керування;

2 – точкові світлодіодні індикатори зеленого кольору «940», «660», «580», «525» і «470», які вказують довжину хвилі в нм ЕМВ поліхромного фотонного масажера «Барва-ФМК/ПХ»

3 – кнопки «940», «660», «580», «525» і «470», що служать для вибору довжини хвилі ЕМВ при роботі з поліхромним фотонним масажером «Барва-ФМК/ПХ»;

4 – точковий світлодіодний індикатор червоного кольору « ! » аварійної ситуації;

5 – точковий світлодіодний індикатор зеленого кольору «ПУСК»;

6 – кнопка «ПУСК», призначена для початку процесу опромінювання і

його дострокового припинення;

7 – цифровий світлодіодний індикатор «ТАЙМЕР мин»;

8 – кнопки «▼» і «▲» зменшення і збільшення, призначені для установки тривалості опромінювання;

9 – кнопки «▼» і «▲» зменшення і збільшення, призначені для вибору режиму роботи блока керування і задання частоти модуляції світлового потоку в імпульсному режимі;

10 – цифровий світлодіодний індикатор «ЧАСТОТА Гц», призначений для відображення вибраного режиму роботи блока керування (символи «НР» відповідають безперервному режиму роботи, символи «СР» відповідають скануючому режиму роботи) або частоти модуляції світлового потоку в імпульсному режимі.

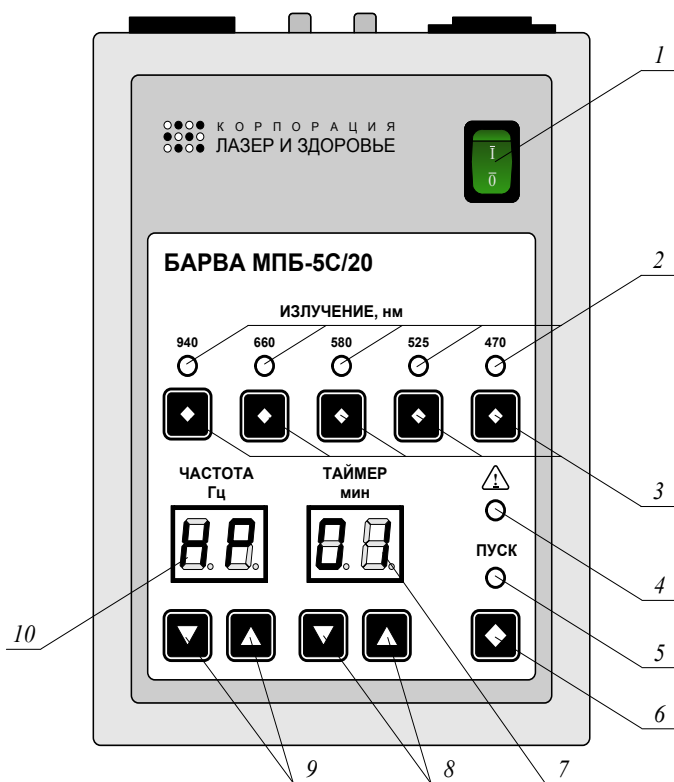


Рисунок 11.17 – Мікропроцесорний блок імпульсного керування МПБ-5С/20 (вигляд з боку лицьової панелі)

На задній частині верхньої кришки корпусу блока керування (рис. 11.18) встановлені:

11 – роз'єм для підключення знімного мережевого кабелю;

12 – роз'єм першого додаткового одноканального виходу блока керування;

13 – роз'єм другого додаткового одноканального виходу блока керування;

14 – роз'єм основного п'ятиканального виходу блока керування для підключення поліхромного фотонного масажера «Барва-ФМК/ПХ».

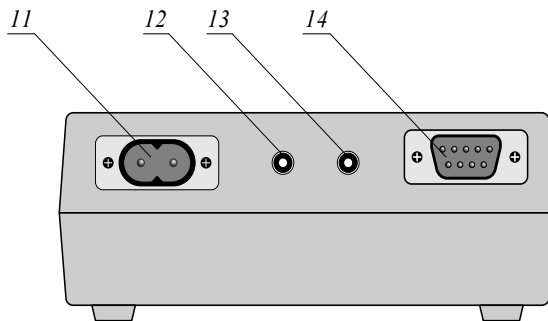


Рисунок 11.18 – Мікропроцесорний блок імпульсного керування МПБ-5С/20 (вигляд з боку задньої стінки)

У зв'язку з тим, що при роботі блока керування не потрібне захисне заземлення (занулення), його підключення до живильної мережі здійснюється за допомогою мережевого кабелю із стандартною двополюсною вилкою.

11.2.3.3. Принцип дії мікропроцесорного блока МПБ-5С/20.

Функціональну електричну схему мікропроцесорного блока керування МПБ-5С/20 наведено на рис. 11.19. Основним елементом блока керування є мікроконтролер (МК), що виконує функції блока обробки інформації (БОІ), яка надходить від пульта керування (ПК) і блока порівняння (БП), на вхід якого надходять сигнали від датчика струму (ДС) і джерела опорного сигналу (ДОС). Крім того, МК виконує функції першого цифро-імпульсного перетворювача з широтно-імпульсним законом перетворення (ЦП1 з ШП), що забезпечує обмеження тривалості опромінювання, другого цифро-імпульсного перетворювача з частотно-імпульсним законом перетворення (ЦП2 з ЧП), що формує період проходження імпульсів вихідної напруги каналів блока в

«580», «525» і «470», що вказують довжину хвилі ЕМВ поліхромного фотонного масажера;

- точковий світлодіодний індикатор червоного кольору «!», призначений для індикації аварійної ситуації, пов'язаної з перевантаженням за струмом у вихідному ланцюзі блока керування;

- точковий світлодіодний індикатор зеленого кольору «ПУСК», призначений для індикації процесу опромінювання;

- БЗІ – блок звукової індикації, призначений для сигналізації про початок і закінчення процесу опромінювання (короткі звукові сигнали), а також для додаткової сигналізації про виникнення аварійної ситуації (переривчасті звукові сигнали до моменту відключення блока);

- Т – мережевий трансформатор, що забезпечує гальванічну розв'язку мікропроцесорної частини блока і його навантаження з живлячою мережею і знижує її напругу до рівнів, необхідних для живлення елементів схеми;

- БЖ1 – перший блок живлення, що містить у своєму складі випрямляч, ємнісний фільтр, стабілізатор напруги і призначений для стабілізації напруги на основному і додаткових виходах блока керування на рівні 14 В;

- РЕ – релейний елемент, призначений для відключення виходу першого блока живлення від подальших блоків і виходів блока керування;

- ДС – датчик струму, що дозволяє контролювати сумарний вихідний струм блока керування для організації захисту при виникненні перевантажень по струму;

- К – комутатор вихідної напруги блока керування, що забезпечує переривання струму в ланцюгах поліхромного фотонного масажера «Барва-ЛМК/ПХ» і фотонних матриць «Барва-Флекс» для модуляції світлового потоку;

- БЖ2 – другий блок живлення, що містить у своєму складі випрямляч, ємнісний фільтр, стабілізатор напруги і призначений для стабілізації напруги на рівні 5 В, яка необхідна для живлення мікроконтролера та елементів індикації;

- ДОС – джерело опорного сигналу, призначене для формування сигналу, пропорційного гранично допустимому сумарному значенню вихідного струму блока керування.

При роботі блока керування в безперервному режимі (на індикаторі

«ЧАСТОТА Гц» відображаються символи «НР») випромінювання світлодіодів фототерапевтичних апаратів буде безперервним, а потужність випромінювання – максимальною. В імпульсному режимі при будь-якій встановленій частоті модуляції світлового потоку, значення якої відображається на індикаторі «ЧАСТОТА Гц», шпаруватість вихідної напруги буде рівна 2 (тривалість імпульсу рівна половині періоду), а потужність випромінювання фототерапевтичного апарата при цьому буде в два рази менше, ніж в безперервному режимі. У скануючому режимі (на індикаторі «ЧАСТОТА Гц» відображаються символи «СР») світлодіодні групи поліхромного фотонного масажера включаються по черзі в порядку зростання довжини хвилі випромінювання (рис. 11.20).

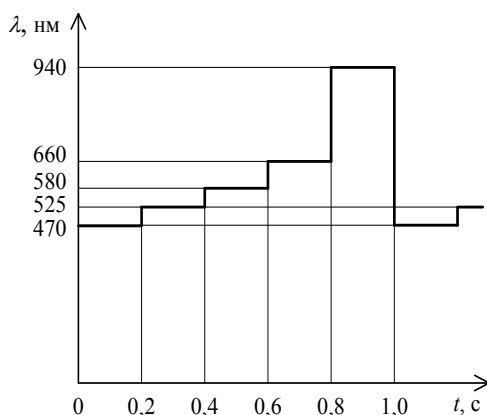


Рисунок 11.20 – Зміна довжини хвилі ЕМВ поліхромного фотонного масажера «Барва-ФМК/ПХ» в скануючому режимі

У блоці керування передбачений захист від перевантажень за струмом у вихідному ланцюзі. При виникненні такого перевантаження фототерапевтичні апарати відключаються комутатором, а переривисте свічення червоним кольором індикатора аварійних ситуацій «!» указує на виникнення перевантаження. Якщо відключення випромінювачів відбулося, то через 2 с проводиться їх автоматичне повторне включення (АПВ) і за відсутності перевантаження за струмом блок керування відновлює свою роботу. На інтервалі проведення однієї процедури допускається не більше чотирьох АПВ.

Якщо перевантаження по струму має стійкий характер (наприклад, глибоке коротке замикання в кабелі одного з фототерапевтичних апаратів), то після

п'ятого АПВ фототерапевтичні апарати остаточно відключаються релейним елементом. При цьому на індикаторі «ЧАСТОТА Гц» відобразатимуться символи « – – », а на індикаторі «ТАЙМЕР мин» буде вказана тривалість часового інтервалу, що залишився до закінчення процедури. Переривисті звуковий сигнал і свічення червоним кольором індикатора аварійних ситуацій «!» додатково вказуватимуть на стійке перевантаження за струмом, при якому подальша експлуатація блока керування недопустима.

Якщо при виникненні перевантаження, ключові елементи комутатора вийшли з ладу, то фототерапевтичні апарати відключаються релейним елементом. При цьому індикатори вкажуть на виникнення аварійної ситуації, при якій подальша експлуатація блока керування недопустима.

При виникненні аварійних ситуацій блок керування слід вимкнути, натиснувши на нижню частину клавіші мережевого вимикача, і витягнути вилку мережевого кабелю з розетки живлячої мережі. Після усунення причин струмового перевантаження, блок керування буде готовий до роботи.

Виникнення програмного збою в роботі мікроконтролера виявляється в появі на індикаторах ненормованих символів або в блокуванні кнопок керування. При цьому необхідно вимкнути блок керування мережевим вимикачем, а через 2-3 хвилини провести повторне включення. В тому випадку, якщо блок повністю відновив свою працездатність, можлива його подальша експлуатація. Якщо після програмного збою виключення і повторне включення блока керування не привело до відновлення його працездатності, блок слід відключити від мережі і звернутися по допомогу до спеціалістів.

Після закінчення встановленої тривалості опромінювання блок керування проводить автоматичне відключення фототерапевтичних апаратів (опромінювання припиняється) і подає короткий звуковий сигнал.

11.2.4. Семиканальний інтелектуальний мікропроцесорний модуль імпульсного керування ИМПМ-7/40 Г

11.2.4.1. Призначення та основні технічні дані мікропроцесорного модуля ИМПМ-7/40 Г.

Семиканальний інтелектуальний мікропроцесорний модуль імпульсного керування ИМПМ-7/40 Г призначений для забезпечення роботи універ-

сального фотонного гінекологічного зонда «Барва-ГИН/30» у безперервному, імпульсному або скануючих (сканування за зонами опромінювання) режимах, а також для дозування процедури за потужністю (в імпульсному режимі) і тривалістю дії. Крім того, до виходу модуля можуть бути підключені дві фотонні матриці «Барва-Флекс». Параметри випромінювання зонда і матриць встановлюються незалежно один від одного. Зовнішній вигляд мікропроцесорного модуля ІМПМ-7/40 Г з підключеними універсальним фотонним гінекологічним зондом «Барва-ГИН/30» і двома фотонними матрицями «Барва-Флекс» показано на рис. 11.21.

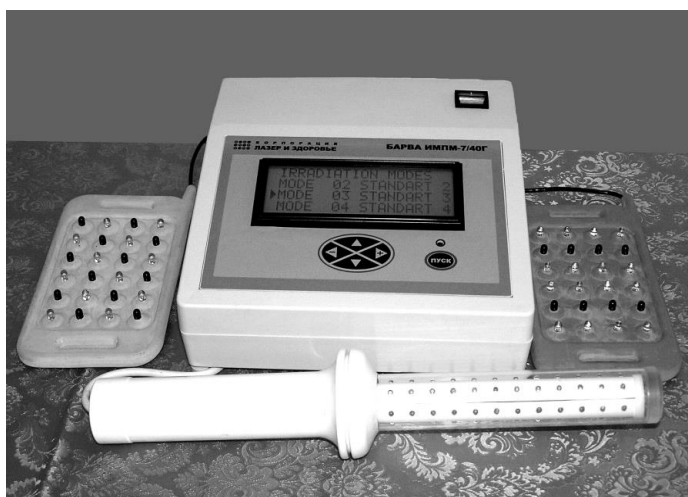


Рисунок 11.21 – Зовнішній вигляд семиканального інтелектуального мікропроцесорного модуля імпульсного керування ІМПМ-7/40 Г

Основні технічні дані мікропроцесорного модуля ІМПМ-7/40 Г наведено в табл. 11.10.

Таблиця 11.10 – Технічні дані мікропроцесорного модуля ІМПМ-7/40 Г

Найменування параметра	Од. вим.	Значення
1	2	3
Напруга живлення	В	220 ± 22
Частота змінної напруги живлення	Гц	50
Максимальна потужність, споживана з мережі змінної напруги	ВА	10

Закінчення табл. 11.10

1	2	3
Вихідна напруга кожного каналу в безперервному режимі	В	14 ± 0,3
Номінальне значення вихідного струму кожного з семи каналів основного виходу	мА	40
Максимальне значення вихідного струму кожного додаткового виходу	мА	100
Діапазон регулювання частоти модуляції світлового потоку в імпульсному і скануючому режимах	Гц	1–99
Допустиме відхилення частоти модуляції світлового потоку від встановленого значення	%	0,2
Діапазон регулювання потужності світлового потоку в імпульсному режимі	%	1–99
Потужність випромінювання зонда в скануючому режимі	%	16,67
Діапазон установки тривалості опромінювання	хв	1–99
Допустиме відхилення тривалості опромінювання від встановленого значення	с	0,5
Габаритні розміри модуля, не більше	мм	225×220×85
Маса модуля, не більше	кг	2,0

Для полегшення проведення процедур у мікропроцесорному модулі ИМПМ-7/40 Г передбачено вісім стандартних режимів роботи (див. табл. 11.11).

Таблиця 11.11 – Стандартні режими роботи мікропроцесорного модуля ИМПМ-7/40 Г

Стандартний режим роботи модуля і його характеристика	Випромінювач	Режим роботи	Частота модуляції ЕМВ, Гц	Потужність випромінювання, %	Час випромінювання, хв
1	2	3	4	5	6
ИНТРАСКАН – дія скануючим променем зонда всередині	Боковий вип. зонда	СР	1	16,67	15
	Торцевий вип. зонда				
	Матриці	–	–	–	–

Закінчення табл. 11.11

1	2	3	4	5	6
СУПЕРСКАН – дія скануючим променем зонда всередині підсилена дією ЕМВ матриць (50 %) ззовні	Боковий вип. зонда	СР	1	16,67	15
	Торцевий вип. зонда				
	Матриці	ІР	1	50	15
ГИПЕРСКАН – дія скануючим променем зонда всередині більшою мірою підсилена дією ЕМВ матриць (100 %) ззовні	Боковий вип. зонда	СР	1	16,67	15
	Торцевий вип. зонда				
	Матриці	БР	0	100	15
МИНИПУЛЬС – дія короткими імпульсами ЕМВ зонда всередині та матриць ззовні	Боковий вип. зонда	ІР	77	50	15
	Торцевий вип. зонда				
	Матриці				
МАКРОПУЛЬС – дія довгими імпульсами ЕМВ зонда всередині та матриць ззовні	Боковий вип. зонда	ІР	10	50	15
	Торцевий вип. зонда				
	Матриці				
ТРАНСЛУЧ – дія безперервним ЕМВ матриць ззовні	Боковий вип. зонда	–	–	–	–
	Торцевий вип. зонда				
	Матриці				
ИНТРАЛУЧ – дія безперервним ЕМВ зонда всередині	Боковий вип. зонда	БР	0	100	15
	Торцевий вип. зонда				
	Матриці	–	–	–	–
ГИПЕРЛУЧ – дія безперервним ЕМВ зонда всередині та матриць ззовні	Боковий вип. зонда	БР	0	100	15
	Торцевий вип. зонда				
	Матриці				

У табл. 11.11 використано такі позначення:
БР – безперервний режим роботи випромінювача;
ІР – імпульсний режим роботи випромінювача;
СР – скануючий режим роботи (тільки для зонда).

11.2.4.2. Конструкція мікропроцесорного модуля ИМПМ-7/40 Г.

Конструктивно інтелектуальний мікропроцесорний модуль імпульсного керування ИМПМ-7/40 Г виконаний у пластмасовому корпусі, що складається з верхньої і нижньої кришок, а також задньої вставної панелі. Електронні компоненти модуля змонтовані на друкованій платі і разом з рідкокристалічним дисплеєм і мережевим трансформатором розміщені усередині корпусу. Верхня кришка корпусу служить лицьовою панеллю. Мікропроцесорний модуль ИМПМ-7/40 Г з боку лицьової панелі показаний на рис. 11.22. На лицьовій панелі мікропроцесорного модуля розташовані:

1 – клавіша-індикатор мережевого вимикача, призначеного для включення і виключення блока;

2 – рідкокристалічний дисплей (чотири рядки по 20 знаків) для відображення режимів роботи модуля, параметрів опромінювання і іншої інформації про роботу модуля;

3 – точковий світлодіодний індикатор зеленого кольору «ПУСК» (світиться у будь-якому режимі роботи);

4 – кнопка «ПУСК», призначена для розпізнавання параметрів опромінювання в програмованих режимах, початку процесу опромінювання і його дострокового припинення;

5 – кнопки «▲», «▼», «◀» і «▶» для вибору режиму роботи модуля, випромінювачів і задання параметрів опромінювання.

На задній панелі корпусу мікропроцесорного модуля (рис. 11.23) встановлені:

6 – утримувач плавкого запобіжника (315 мА);

7 – роз'єм для підключення знімного мережевого кабеля;

8 – роз'єм першого додаткового виходу апарата для підключення фотонної матриці;

9 – роз'єм другого додаткового виходу апарата для підключення фотонної матриці;

10 – роз'єм основного семиканального виходу апарата для підключення універсального фотонного гінекологічного зонда «Барва-ГИН/30».

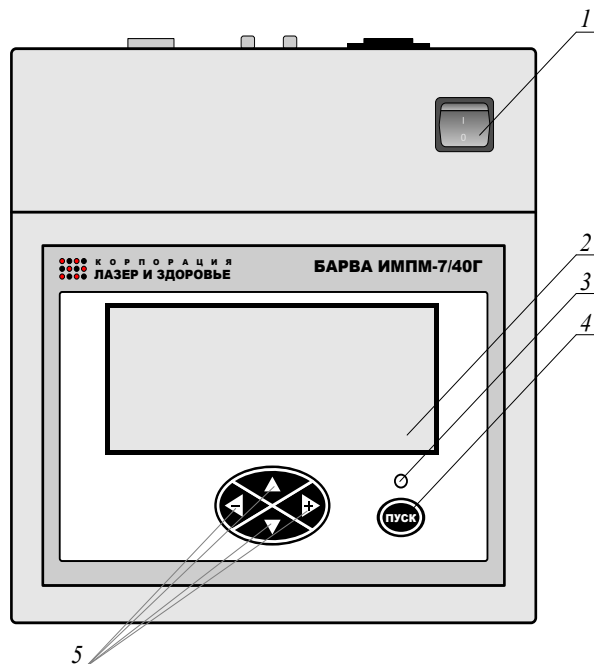


Рисунок 11.22 – Мікропроцесорний модуль імпульсного керування ИМПМ-7/40 Г (вигляд з боку лицьової панелі)

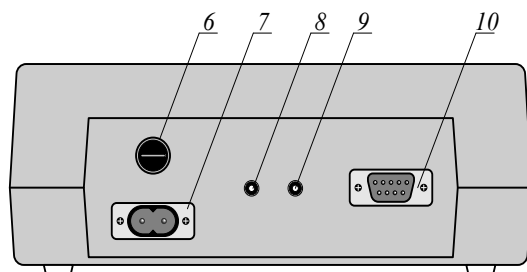


Рисунок 11.23 – Мікропроцесорний модуль імпульсного керування ИМПМ-7/40 Г (вигляд з боку задньої панелі)

У зв'язку з тим, що при роботі мікропроцесорного модуля не треба захисного заземлення (занулення), його підключення до живильної мережі здійснюється за допомогою мережевого кабелю із стандартною двополюсною вилкою.

опромінювання фотонним зондом і фотонними матрицями відповідно. ЦПП3 з ЧП і ЦПП4 з ШП формують частоту проходження і тривалість імпульсів вихідної напруги для електроживлення випромінювачів зонда, а ЦПП6 з ЧП і ЦПП7 з ШП – для електроживлення фотонних матриць.

За допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) вихідна напруга П з Ф перетвориться у цифровий код і вводиться в БОІ для корекції тривалості імпульсів керування, формованих ЦПП1 з ШП. Введення такого зворотного зв'язку при відповідному програмному забезпеченні дозволяє стабілізувати вихідну напругу модуля на заданому рівні як при зміні напруги живильної мережі, так і при зміні струму навантаження.

Крім того до складу мікропроцесорного модуля входять:

– ПК – пульт керування, що дозволяє вибирати режим роботи фототерапевтичних апаратів (безперервний, імпульсний, скануючий або стандартний), задавати частоту модуляції випромінювання в герцах і потужність випромінювання у процентах (при імпульсному режимі роботи), а також тривалість опромінювання у хвилинах;

– БЗСІ – блок звукової і світлової індикації в своєму складі містить:

- рідкокристалічний дисплей для вибору режиму роботи фототерапевтичних апаратів, задання частоти модуляції випромінювання, потужності випромінювання і тривалості опромінювання;

- точковий світлодіодний індикатор «ПУСК», призначений для індикації процесу опромінювання;

- звуковий індикатор, призначений для сигналізації про початок і закінчення процесу опромінювання (короткі звукові сигнали), а також для додаткової сигналізації про виникнення аварійної ситуації (переривчасті звукові сигнали до моменту виключення модуля);

– Т – мережевий трансформатор, що забезпечує гальванічну розв'язку системи керування і навантаження модуля з живильною мережею і знижує її напругу до рівня, необхідного для живлення елементів схеми;

– ВФ – випрямляч з ємнісним фільтром, призначений для випрямлення напруги вторинної обмотки мережевого трансформатора і згладжування його пульсацій;

– П і Ф – імпульсний перетворювач з індуктивно-ємнісним фільтром,

що забезпечує (спільно з МК) стабілізацію вихідної напруги модуля на заданому рівні методом широтно-імпульсної модуляції;

- БЖ – блок живлення, що містить в своєму складі випрямляч, ємнісний фільтр, стабілізатор напруги і призначений для стабілізації напруги на рівні 5 В, яка необхідна для живлення мікроконтролера, точкового світлодіодного і звукового індикаторів;

- РЕ – релейний елемент, призначений для відключення виходу ІП з Ф від подальших блоків і виходів каналів мікропроцесорного модуля;

- ДС – датчик струму, що дозволяє контролювати сумарний вихідний струм каналів мікропроцесорного модуля для організації захисту при виникненні перевантажень за струмом;

- ДОС – джерело опорного сигналу, призначене для формування сигналу, пропорційного гранично допустимому сумарному значенню вихідного струму мікропроцесорного модуля;

- К – напівпровідниковий комутатор імпульсів вихідної напруги каналів блока керування, що забезпечує за сигналами від ЦП4 з ШП, ЦП7 з ШП і МК переривання струму у ланцюгах фототерапевтичних апаратів для модуляції світлового потоку в імпульсному або скануючому режимах.

При роботі мікропроцесорного модуля в безперервному режимі випромінювання світлодіодів фотонного зонда і фотонних матриць буде безперервним, а потужність випромінювання – максимальною.

В імпульсному режимі роботи частота модуляції f_M і відносна потужність ЕМВ P_i^* для фотонного зонда (f_{M3} та P_3^*) і фотонних матриць (f_{MM} та P_M^*) можуть бути встановлені різними. При цьому світлодіодна група торцевого випромінювача (ТВ) зонда і шість світлодіодних груп (СДГ) його бічного випромінювача (БВ) (якщо їх включення передбачене у вибраному режимі роботи) включатимуться одночасно під дією прикладеної напруги $u_{Т1}$ і $u_{СДГ1-СДГ6}$. Ця напруга є сукупністю синхронізованих імпульсних послідовностей з періодом модуляції T_{M3} і тривалістю τ_{I3} . (рис. 11.25, а-ж).

До обох фотонних матриць (якщо їх включення передбачене) прикладатиметься напруга у вигляді імпульсної послідовності u_M з періодом T_{MM} і тривалістю τ_{IM} (рис. 11.25, з).

У всіх випадках тривалість імпульсів напруги обчислюється мікроконт-

ролером (окремо для зонда і для матриць) з урахуванням заданої частоти модуляції f_{Mi} і відносного значення потужності випромінювання P_i^* за виразом:

$$\tau_{li} = \frac{P_i^*}{f_{Mi} \cdot P_{\max}}$$

де P_{\max} – максимальне значення потужності випромінювання фотонного зонда або фотонної матриці, які підключені медичним персоналом до модуля перед початком проведення процедури фототерапії.

На рис. 11.25 часові діаграми відповідають потужності випромінювання 25 % для випромінювачів фотонного зонда і 50 % для фотонних матриць, при $f_{MM} = 1,5f_{M3}$.

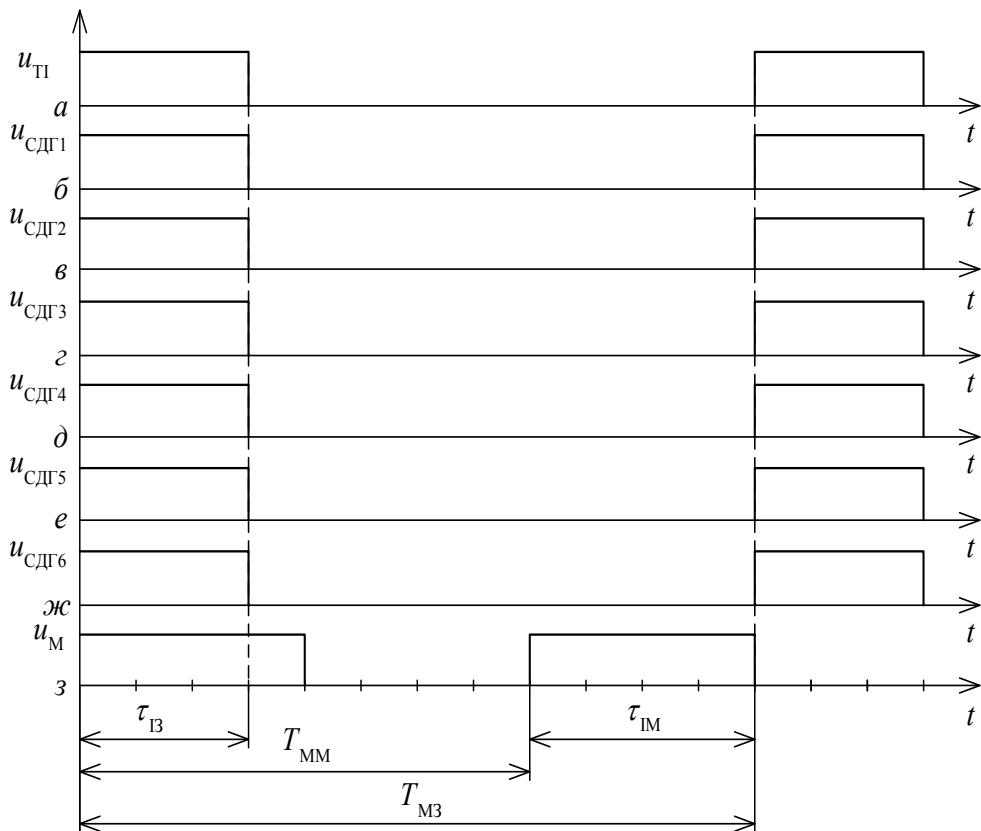


Рисунок 11.25 – Часові діаграми вихідної напруги мікропроцесорного модуля ІМПМ-7/40 Г в імпульсному режимі: торцевий випромінювач зонда (а); бічний випромінювач зонда (б-ж); матриці (з)

У скануючому режимі частота сканування $f_{СК}$ зон опромінювання бічним випромінювачем фотонного зонда задається в діапазоні від 1 до 99 Гц, а потужність випромінювання зонда не регулюється і становить 16,67 % (на дисплеї відображається як 16 %). Суть сканування за зонами опромінювання полягає у цьому випадку в тому, що світлодіодні групи бічного випромінювача зонда включаються по черзі на 1/6 частину періоду сканування $T_{СК}$ (рис. 11.26). Включення світлодіодної групи торцевого випромінювача (якщо це передбачено у вибраному режимі роботи) синхронізоване з включенням першої світлодіодної групи бічного випромінювача. Тривалість імпульсів напруги обчислюється мікроконтролером в цьому випадку тільки з урахуванням заданої частоти сканування $f_{СК}$ ЕМВ фотонного зонда:

$$\tau_{В} = \frac{1}{6 \cdot f_{СК}} = \frac{T_{СК}}{6}.$$

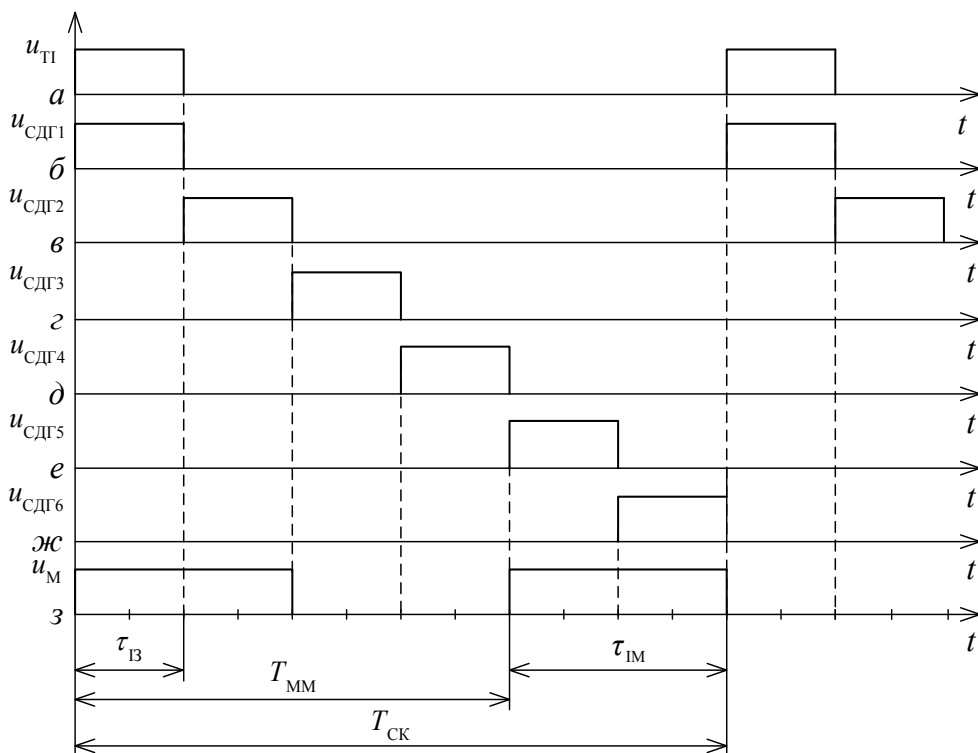


Рисунок 11.26 – Часові діаграми вихідної напруги мікропроцесорного модуля ИМПМ-7/40 Г в режимі сканування для зонда – торцевий випромінювач (а); бічний випромінювач (б-ж); в імпульсному режимі для матриць (з)

Якщо вибраним режимом роботи мікропроцесорного модуля передбачено включення матриць, то для них можуть бути задані параметри імпульсного режиму (частота модуляції і потужність) або заданий безперервний режим випромінювання.

У мікропроцесорному модулі передбачений захист від перевантажень за струмом у вихідному ланцюзі кожного каналу. При виникненні такого перевантаження фототерапевтичні апарати (зонд і матриці) відключаються, на дисплей виводиться напис:

					В	Н	И	М	А	Н	И	Е		!					
						А	В	А	Р	И	Я		!						
	О	Т	К	Л	Ю	Ч	И	Т	Е			А	П	П	А	Р	А	Т	
						О	Т		С	Е	Т	И	!						

а переривчастий звуковий сигнал додатково указуватиме на виниклу аварійну ситуацію, при якій подальша експлуатація мікропроцесорного модуля неприпустима.

При виникненні аварійних ситуацій мікропроцесорний модуль слід виключити, натиснувши на нижню частину клавіші мережевого вимикача (положення «0»), і витягнути вилку мережевого кабелю з розетки живильної мережі. Після усунення причин струмового перевантаження модуль буде готовий до роботи.

Виникнення програмного збою в роботі мікроконтролера може виявлятися в появі на дисплеї ненормованих символів або в блокуванні кнопок керування. При цьому необхідно виключити модуль мережевим вимикачем, а через 2–3 хвилини провести його повторне включення.

У тому випадку, якщо модуль повністю відновив свою працездатність, можлива його подальша експлуатація. Якщо після програмного збою виключення і повторне включення модуля не привело до відновлення його працездатності, модуль потрібно відключити від мережі і звернутися по допомогу до спеціалістів.

Після закінчення встановленої тривалості опромінювання мікропроцесорний модуль проводить автоматичне відключення фототерапевтичних апаратів (опромінювання припиняється) і подає короткий звуковий сигнал.

11.3. ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТ БЛОКІВ ЖИВЛЕННЯ ТА КЕРУВАННЯ

Всі блоки живлення та керування за способом захисту пацієнта і медичного персоналу від враження електричним струмом відповідають класу II, тип ВF.

Експлуатація блоків живлення та керування повинна здійснюватися за таких кліматичних умов:

- температура навколишнього повітря, °C +10 – +35;
- атмосферний тиск, мм рт. ст. 720–780;
- відносна вологість повітря при температурі 25 °C, не більше, % 80.

Не рекомендується підключати блоки живлення і керування до мереж електроживлення з відхиленнями напруги від номінальної більше ніж 10 %.

Для забезпечення надійної роботи блока керування необхідно періодично, але не рідше одного разу в півроку проводити його технічне обслуговування. При проведенні технічного обслуговування необхідно строго дотримувати таких заходів безпеки:

- візуальний огляд в ході технічного обслуговування блока керування повинен проводитися тільки при відключеній напрузі живильної мережі (вилка мережевого кабелю витягнута з розетки живильної мережі);

- до роботи з блоком керування допускаються особи, що вивчили інструкцію з експлуатації і методики проведення процедур фототерапії, а також, що пройшли інструктаж з техніки безпеки;

- під час експлуатації блока керування не слід допускати попадання вологи і пилу на контакти роз'ємів і всередину корпусу;

- заміна плавкого запобіжника, розміщеного на друкованій платі усередині корпусу, повинна здійснюватися обслуговуючим персоналом, що має достатню кваліфікацію, тільки при витягнутій вилці мережевого кабелю з розетки живильної мережі.

Технічне обслуговування блоків проводиться шляхом їх візуального огляду і перевірки працездатності. При проведенні візуального огляду особливу увагу слід приділяти цілісності корпусів і кабелів, а також відсутності вологи і пилу на контактах роз'ємів.

При виявленні під час технічного обслуговування невідповідностей або дефектів подальша експлуатація блока керування не допускається.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Вкажіть основні переваги випромінюючих діодів та доцільність їх використання як джерел електромагнітного випромінювання оптичного діапазону в терапевтичних апаратах.

2. У чому полягають конструктивні особливості фотонних матриць «Барва-Флекс»? Вкажіть основні технічні дані цих матриць.

3. Поясніть доцільність використання у фотонних матрицях «Барва-Флекс» діодів з різною довжиною хвилі випромінювання.

4. Перерахуйте основні способи розташування фотонних матриць «Барва-Флекс» по відношенню до тіла пацієнта.

5. У чому полягає поєднання терапевтичного впливу масажерів «Барва-ЛМК» і «Барва-ФМК/ПХ». Вкажіть основні технічні дані цих масажерів.

6. Наведіть ескізне креслення масажера «Барва-ЛМК». Перерахуйте його складові частини і вкажіть їх призначення.

7. Вкажіть галузі використання фотонного зонда «Барва-ГПУ» і його відмінності від апаратів аналогічного призначення, що реалізовані на основі традиційного підходу.

8. Наведіть креслення фотонного зонда «Барва-ГПУ». Перерахуйте його складові частини і вкажіть їх призначення. Вкажіть основні технічні дані.

9. Вкажіть конструктивні особливості універсального фотонного гінекологічного зонда «Барва-ГИН/30» і наведіть його технічні дані.

10. Наведіть ескізне креслення універсального фотонного гінекологічного зонда «Барва-ГИН/30». Перерахуйте його складові частини і вкажіть їх призначення.

11. Вкажіть основні переваги терапевтичних апаратів, розроблених у Харківській науково-виробничій медико-біологічній корпорації «Лазер і Здоров'я».

12. Побудуйте функціональну схему спеціалізованого блока живлення для фототерапевтичних апаратів та поясніть принцип її роботи.

13. Вкажіть призначення двоканального мікропроцесорного блока імпульсного керування МПБ-2С/80. Назвіть його функціональні можливості та

основні технічні дані.

14. Наведіть функціональну схему двоканального мікропроцесорного блока імпульсного керування МПБ-2С/80 і поясніть принцип його дії.

15. У чому полягає особливість режиму сканування двоканального мікропроцесорного блока імпульсного керування МПБ-2С/80?

16. Яким чином можна перевірити робочий стан двоканального мікропроцесорного блока імпульсного керування МПБ-2С/80?

17. Вкажіть призначення п'ятисканального мікропроцесорного блока імпульсного керування МПБ-5С/20. Перерахуйте його функціональні можливості й основні технічні дані.

18. Наведіть функціональну схему п'ятисканального мікропроцесорного блока імпульсного керування МПБ-5С/20 і поясніть принцип його дії.

19. У чому полягає особливість режиму сканування п'ятисканального мікропроцесорного блока імпульсного керування МПБ-5С/20?

20. Яким чином можна перевірити робочий стан п'ятисканального мікропроцесорного блока імпульсного керування МПБ-5С/20?

21. Вкажіть призначення семисканального інтелектуального мікропроцесорного модуля імпульсного керування ІМПМ-7С/40 Г. Перерахуйте його функціональні можливості та основні технічні дані.

22. Наведіть функціональну схему семисканального інтелектуального мікропроцесорного модуля імпульсного керування ІМПМ-7С/40 Г і поясніть принцип його дії.

23. Вкажіть особливості вибору режимів роботи і завдання параметрів опромінення в семисканальному інтелектуальному мікропроцесорному модулі керування ІМПМ-7С/40 Г.

24. Яким чином здійснюється регулювання потужності випромінювання фотонного зонда і матриць за допомогою семисканального інтелектуального мікропроцесорного модуля керування ІМПМ-7С/40 Г?

25. У чому полягає особливість режиму сканування семисканального інтелектуального мікропроцесорного модуля керування ІМПМ-7С/40 Г?

26. Яким чином можна перевірити робочий стан семисканального інтелектуального мікропроцесорного модуля керування ІМПМ-7С/40 Г?

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники / Ю.В. Байбородин. – К. : Вища школа. Главное изд-во, 1981. – 408 с.
2. Пихтин А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники : учеб. пособие для вузов / А.Н. Пихтин. – М. : Высш. шк., 1983. – 304 с.
3. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике : учеб. руководство / Н.В. Карлов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 336 с.
4. Ярив А. Квантовая электроника / А. Ярив ; пер. с англ.; под ред. Я.И. Ханина. – 2-е изд. – М. : Сов. радио, 1980. – 488 с.
5. Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто; пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Мир, 1984. – 400 с.
6. Хансперджер Р. Интегральная оптика: Теория и технология / Р. Хансперджер; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 384 с.
7. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника / Ю.Р. Носов. – М. : Сов. радио, 1977. – 232 с.
8. Шарупич Л.С. Оптоэлектроника : учебник для техникумов / Л.С. Шарупич, Н.М. Тугов. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 256 с.
9. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника / Ю.Р. Носов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989. – 360 с.
10. Суэмацу Я. Основы оптоэлектроники / Я. Суэмацу; пер. с яп. – М. : Мир, 1988. – 288 с.
11. Яблонский Ф.М. Средства отображения информации : Учеб. для вузов спец. «Промышленная электроника» / Ф.М. Яблонский, Ю.В. Троицкий. – М. : Высш. шк., 1985. – 200 с.
12. Барановский Д. Оптоэлектронные реле серии КР293. Справочный листок / Д. Барановский, В. Федосеев // Радио – 1996. – № 6. – С. 55–58.
13. Юшин А.М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги : справочник / А.М. Юшин. – М. : ИП РадиоСофт, 1998. – 2002 с.
14. Тарасов Л.В. Лазеры: действительность и надежды / Л.В. Тарасов. – М. : Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1985. – 176 с.
15. Колесник Ю.И. Квантовая электроника : учеб. пособ. /

Ю.И. Колесник. – Х. : НТУ «ХПИ», 2004. – 132 с.

16. Колесник Ю.И. Квантовая электроника. Применение лазеров : учеб. пособ. / Ю.И. Колесник, А.В. Кипенский. – Х. : НТУ «ХПИ», 2005. – 156 с.

17. Москвин С.В. Эффективность лазерной терапии / С.В. Москвин. – М. : НПЦЛ «Техника», 2003. – 265 с.

18. Боголюбов В.М. Общая физиотерапия / В.М. Боголюбов, Г.Н. Пономаренко. – М. : Медицина, 1999. – 432 с.

19. Шевченко В.Л. Современная концепция построения лазерных терапевтических аппаратов / В.Л. Шевченко // Фотобиология и фотомедицина : международный научно-практический журнал. – Х. : ХГУ, 1999. – Т. II, – № 1. – С. 90–96.

20. Иванов В.И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы : справочник / В.И. Иванов, А.И. Аксенов, А.М. Юшин. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 448 с.

21. Кипенский А.В. Цифро-импульсные преобразователи в системах модуляции электромагнитных излучений терапевтических аппаратов / А.В. Кипенский // Сборник научных трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ' 2005) 19-23 сентября 2005 г., Харьков, Украина. – Х. : АНПРЭ; ХНУРЭ, 2005. – Т. 5. – С. 217–220.

22. Козлов В.И. Основы лазерной физио- и рефлексотерапии / В.И. Козлов, В.А. Буйлин, Н.Г. Самойлов. – Самара-Киев, 1993. – 216 с.

23. Кипенский А.В. Импульсно-цифровые и цифро-импульсные преобразователи : учеб. пособие / А.В. Кипенский. – Х. : НТУ «ХПИ», 2000. – 112 с.

24. Сокол Е.И. Микропроцессорные блоки импульсного управления фотонными излучателями терапевтического назначения / Е.И. Сокол, А.В. Кипенский, Е.И. Король и др. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – К. : ІЕД НАНУ, 2005. – Ч. 4. – С. 113–118.

25. Кольцов Ю.В. Накачка биологических объектов модулированным по амплитуде инжекционным лазером / Ю.В. Кольцов, В.Н. Королев // Биомедицинская радиоэлектроника. – 1998. – № 4. – С. 40–48.

26. Сокол Е.И. Применение светоизлучающих диодов с управляемым цветом свечения в аппаратах квантовой терапии / Е.И. Сокол, А.В. Кипенский, Ю.И. Колесник, И.В. Заяц // Применение лазеров в медицине и биологии : материалы XXII Международной научно-практической

конференции. Ялта, 12–16 октября 2004 г. – X. : НПМБК «Лазер и Здоровье», 2004. – С. 144 – 145.

27. Лазеры в клинической медицине. Руководство для врачей / Под ред. С.Д. Плетнева. – М. : Медицина, 1996. – 432 с.

28. Улащик В.С. Общая физиотерапия : Учебник / В.С. Улащик., И.В. Лукомский. – Мн. : Интерпрессервис; Книжный дом, 2003. – 512 с.

29. Неворотин А.И. Введение в лазерную хирургию : Учеб. пособие / А.И. Неворотин – СПб. : СпецЛит, 2000. – 175 с.

30. Самосюк И.З. Лазеротерапия и лазеропунктура в клинической и курортной практике / И.З. Самосюк, В.П. Лысенюк, М.В. Лобода. – К. : «Здоров'я», 1997. – 240 с.

31. Шевченко В.Л. Классификация способов применения лазерного излучения / В.Л. Шевченко // Новые направления лазерной медицины : материалы междунар. конф. – М. : 1996. – С. 343.

32. Гримблатов В.М. Современная аппаратура и проблемы низкоинтенсивной лазерной терапии / В.М. Гримблатов // Применение лазеров в биологии и медицине : материалы междунар. конф. – К. : 1996. – С. 123–127.

33. Лазерная безопасность. Общие положения. ГОСТ 12.1040–83* ССБТ – Введ. 01.01.84. Изм. 1986.

34. Коробов А.М. Фототерапевтические аппараты Коробова серии «Барва» / А.М. Коробов, В.А. Коробов, Т.А. Лесная. – X. : ИПП «Контраст», 2008. – 176 с.

35. Применение аппарата фотонная матрица Коробова «Барва-Флекс» в практической медицине : подборка методических материалов / Под ред. А.М. Коробова и Л.Д. Тондия. – X. : НПМБК «Лазер и Здоровье», 2004. – 27 с.

36. Коробов А.М. Рекомендация по проведению фототерапии и хромотерапии фотонными матрицами Коробова «Барва-Флекс» / А.М. Коробов, В.А. Коробов. – X. : НПМБК «Лазер и Здоровье», 2002. – 16 с.

37. Лазерный массажер Коробова «Барва-ЛМК». Руководство по эксплуатации и методические материалы / Под ред. А.М. Коробова и Л.Д. Тондия. – X. : НПМБК «Лазер и Здоровье», 2002. – 20 с.

38. Применение аппарата фотонный зонд Коробова «Барва-ГПУ» в медицинской практике. Методические рекомендации для специалистов гинекологов, урологов, проктологов / А.М. Коробов, А.Л. Черняев, Е.А. Черняева, В.А. Коробов. – X. : НПМБК «Лазер и Здоровье», 2002. – 10 с.

39. Коробов А.М. Универсальный фотонный гинекологический зонд

Коробова А.– Коробова В. «Барва-ГИН» / А.М Коробов., В.А.Коробов // Материалы XXIV Международной научно-практической конференции «Применение лазеров в медицине и биологии», 5–8 октября 2005 г., г. Ялта. – Ялта, 2005. – С. 161–162.

40. Сокол Е.И. Новые возможности фототерапевтических аппаратов корпорации «Лазер и Здоровье» / Е.И. Сокол, А.В. Кипенский, Е.И. Король и др. // Материалы XXIII Международной научно-практической конференции «Применение лазеров в медицине и биологии», 25–28 мая 2005 г., г. Николаев. – Николаев, 2005. – С. 127–132.

41. Кипенский А.В. Совершенствование программно-математического обеспечения микропроцессорных блоков импульсного управления, как средство повышения качества фототерапевтических аппаратов / А.В. Кипенский, Е.И. Король, Т.В. Сокол // Материалы XXIV Международной научно-практической конференции «Применение лазеров в медицине и биологии», 5–8 октября 2005 г., г. Ялта. – Ялта, 2005. – С. 157–158.

42. Сокол Е.И. Микропроцессорная система импульсного управления универсальным фотонным гинекологическим зондом «Барва-ГИН» / Е.И. Сокол, А.В. Кипенский, А.М. Коробов и др. // Материалы XXIV Международной научно-практической конференции «Применение лазеров в медицине и биологии», 5–8 октября 2005 г., г. Ялта. – Ялта, 2005. – С. 172–174.

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Фізичні основи квантової електроніки	5
1.1. Основні поняття хвильової теорії випромінювання	5
1.2. Постулати і принципи квантової теорії	14
Запитання і завдання для самоперевірки	19
2. Квантові підсилювачі. Оптичні резонатори	21
2.1. Квантові підсилювачі	21
2.1.1. Класифікація, принцип дії та основні характеристики квантових підсилювачів	21
2.1.2. Властивості парамагнітних кристалів	24
2.1.3. Модель квантового підсилювача	28
2.1.4. Оптичні квантові підсилювачі	30
2.1.5. Квантові підсилювачі біжучої хвилі	35
2.2. Елементи оптичних систем лазерів	38
2.3. Системи оптичного накачування	41
Запитання і завдання для самоперевірки	46
3. Квантові генератори – лазери	48
3.1. Твердотільні імпульсні лазери	48
3.1.1. Модель твердотільного імпульсного лазера	48
3.1.2. Активна речовина твердотільного лазера	53
3.1.3. Чотирирівневий твердотільний лазер	56
3.1.4. Системи охолодження і термостабілізації лазерних головок	59
3.2. Газові лазери	66
3.2.1. Загальна характеристика газових лазерів	66
3.2.2. Лазер на нейтральних атомах гелій-неонової суміші	68
3.2.3. Іонний аргонний лазер	72
3.2.4. Молекулярний CO ₂ лазер	74
3.2.5. Газодинамічні лазери	78
3.3. Напівпровідникові лазери	80
3.3.1. Процеси в напівпровідниковій активній речовині	80
3.3.2. Принцип дії і конструкція інжекційного лазера	85
3.3.3. Гетеропереходи і гетеролазери	91
3.3.4. Плівкові напівпровідникові лазери	96
Запитання і завдання для самоперевірки	99
4. Квантові прилади оптоелектроніки	101
4.1. Оптичні випромінювачі	101
4.2. Фотоприймачі	107
4.3. Оптрони і оптопари	116

4.4. Елементи оптичної індикації	120
Запитання і завдання для самоперевірки	130
5. Застосування лазерів у науці	132
5.1. Лазерні вимірники швидкості	132
5.2. Лазерні далекоміри	138
5.3. Використання лазерів у фізиці і хімії	140
5.4. Застосування лазерів для оптичного зв'язку	145
5.5. Лазери в процесах вимірювань і контролю	147
Запитання і завдання для самоперевірки	150
6. Застосування лазерів у техніці	152
6.1. Оптична голографія	152
6.2. Обробка матеріалів лазерним променем	161
6.2.1. Дія лазерного променя на речовину	161
6.2.2. Особливості «лазерних свердел»	164
6.2.3. Лазерне зварювання	166
6.2.4. Зварювання через скляні перегородки	168
6.2.5. Використання лазерів при виготовленні мікросхем	168
6.2.6. Різання матеріалів лазерним променем	169
6.2.7. Сучасні лазерні технології	172
6.2.8. Термообробка	172
6.3. Лазерні гіроскопи	174
Запитання і завдання для самоперевірки	177
7. Спеціальні лазерні технології	179
7.1. Лазери в обчислювальній техніці	179
7.1.1. Лазерний принтер	179
7.1.2. Оптична цифрова пам'ять	180
7.1.3. Лазерно-оптичне зчитування і запис інформації	180
7.2. Лазерні технології в мікроелектроніці	187
7.2.1. Трафаретний друк	188
7.2.2. Лазерна обробка трафаретів	188
7.2.3. Устаткування для лазерної обробки сталевих трафаретів	189
7.2.4. Полімерні трафарети	192
7.2.5. Устаткування для лазерної обробки полімерних трафаретів	193
7.2.6. Паяльно-ремонтний центр IR500A	194
Запитання і завдання для самоперевірки	197
8. Застосування лазерів у медицині	198
8.1. Історичні аспекти лазерної медицини	198
8.2. Частотно-часові параметри лазерного випромінювання	201
8.2.1. Електромагнітне випромінювання оптичного діапазону	201
8.2.2. Режими генерації лазерного випромінювання	204
8.2.3. Модуляція лазерного випромінювання	206
8.3. Основні напрями медичного застосування лазерів	210

8.3.1. Лазерна діагностика.....	210
8.3.2. Лікувальна дія лазерів. Лазерна терапія.....	213
8.3.3. Застосування лазерів у хірургії.....	213
Запитання і завдання для самоперевірки.....	215
9. Лазерна терапія і лазерні терапевтичні апарати.....	217
9.1. Взаємодія НЕЛВ з біологічними об'єктами.....	217
9.2. Класифікація способів терапевтичного опромінювання НЕЛВ....	220
9.3. Загальні принципи побудови апаратів лазерної терапії.....	222
9.4. Універсальні апарати лазерної терапії «Мустанг-2000».....	224
9.5. Апарат лазерної терапії «Мулат» для внутрішньовенного опромінювання крові.....	231
9.6. Магнітолазерний терапевтичний апарат «МИЛТА-Ф».....	233
9.7. Універсальний апарат квантової терапії «РИКТА 04/4».....	236
Запитання і завдання для самоперевірки.....	239
10. Лазерна хірургія і лазерні хірургічні апарати.....	240
10.1. Взаємодія випромінювання хірургічних лазерів з біологічною тканиною.....	240
10.2. Техніка лазерних хірургічних втручань.....	243
10.3. Організація лазерної операційної і заходи захисту від лазерного випромінювання.....	246
10.4. Лазерні хірургічні апарати.....	250
Запитання і завдання для самоперевірки.....	257
11. Терапевтична апаратура на випромінюючих діодах.....	259
11.1. Фотонні апарати (випромінювачі).....	259
11.1.1. Фотонні матриці Коробова «Барва-Флекс».....	259
11.1.2. Лазерні і фотонні масажери Коробова «Барва-ЛМК» і «Барва-ФМК/ПХ».....	265
11.1.3. Фотонні зонди Коробова «Барва-ГПУ».....	269
11.1.4 Універсальний фотонний гінекологічний зонд «Барва-ГИН/30».....	272
11.2. Блоки живлення та імпульсного керування для фотонних апаратів.....	275
11.2.1. Спеціалізований блок живлення.....	276
11.2.2. Двоканальний мікропроцесорний блок імпульсного керування МПБ-2С/80.....	278
11.2.3. П'ятиканальний мікропроцесорний блок імпульсного керування МПБ-5С/20.....	287
11.2.4. Семиканальний інтелектуальний мікропроцесорний модуль імпульсного керування ИМПМ-7/40 Г.....	295
11.3 Технічне обслуговування і ремонт блоків живлення та керування.....	307
Запитання і завдання для самоперевірки.....	308
Список джерел інформації.....	310

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ



КОЛЕСНИК Юрій Ігоревич доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», кандидат технічних наук.

Автор понад 80 наукових та навчально-методичних робіт.

Спеціаліст у галузі оптоелектроніки, мікропроцесорного керування перетворювачами електричної енергії і різними медичними апаратами, пристроїв квантової електроніки, датчиків для збору технічної інформації.

Проводить заняття з таких дисциплін: «Промислова електроніка», «Мікропроцесорна техніка», «Квантова електроніка», «Електронні пристрої вимірювання та узгодження сигналів».



КІПЕНСЬКИЙ Андрій Володимирович декан факультету інтегральної підготовки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри промислової і біомедичної електроніки, доктор технічних наук.

Автор біля 350 наукових та навчально-методичних робіт.

Спеціаліст у галузі мікропроцесорних систем імпульсного керування і автоматичного регулювання для перетворювачів параметрів електроенергії, систем автоматизації технологічних процесів, медичних діагностичних приладів і терапевтичних апаратів.

Читає лекції з навчальних дисциплін: «Інформаційні пристрої електронної медичної апаратури», «Біометрія», «Електронні апарати для нетрадиційної терапії», «Сучасні проблеми, технології і перспективи розвитку медичної електроніки»

Для нотаток

Для нотаток

Навчальне видання

КОЛЕСНИК Юрій Ігоревич
КІПЕНСЬКИЙ Андрій Володимирович

ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Навчальний посібник
для студентів денної та заочної форм навчання,
які вивчають квантову електроніку

Відповідальний за випуск проф. *С.Ю. Кривошеєв*

Редактор *Л.А. Пустовойтова*

Роботу до видання рекомендував проф. *В.Т. Долбня*

План 2015 р., поз. 108.

Підписано до друку 15.06.15 р.
Формат 70x90/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 18,6.
Наклад 300 прим. Зам. № 2588

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»
61024, м. Харків, вул. Ольмінського, 11
Тел.: (057) 756-53-25
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
Серія ДК № 4399 от 27.08.2012 р.

www.madrid.in.ua e-mail: info@madrid.in.ua

