

УДК 539.104:537.311.33:621.315.5

П. П. Трохимчук – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та математичної фізики Волинського національного університету імені Лесі Українки;

І. П. Дмитрук – аспірант Волинського національного університету імені Лесі Українки

Проблема взаємовпливу процесів нелінійної та релаксаційної оптики

Роботу виконано на кафедрі теоретичної та математичної фізики ВНУ ім. Лесі Українки

Наведено результати аналізу проблеми взаємовпливу процесів нелінійної та релаксаційної оптики. Показано, що ці процеси пов'язані з різними типами релаксації поглинутого випромінювання: випромінювальною та безвипромінювальною. Наведено та проаналізовано класифікацію відповідних явищ, що ґрунтується на розкладі вектора Пойнтінга в ряд за степенями напруженості електричного та магнітного полів. Проаналізовано із цієї точки зору відповідні процеси та явища.

Ключові слова: нелінійна оптика, релаксаційна оптика, вектор Пойнтінга, розклад в ряд, класифікація явищ, випромінювальна релаксація, безвипромінювальна релаксація.

Трохимчук П. П., Дмитрук І. П. Проблема взаимодействия процессов нелинейной и релаксационной оптики. Приведены результаты анализа проблемы взаимодействия процессов нелинейной и релаксационной оптики. Показано, что эти процессы связаны с различными типами релаксации поглощенного излучения: излучательной и безизлучательной. Приведена и проанализирована классификация соответствующих явлений, основанная на разложении вектора Пойнтинга в ряд по степеням напряженностей электрического и магнитного полей. Проанализированы с этой точки зрения соответствующие процессы и явления.

Ключевые слова: нелинейная оптика, релаксационная оптика, вектор Пойнтинга, разложение в ряд, классификация явлений, излучательная релаксация, безизлучательная релаксация.

Trokhimchuk P. P. A problem of Interference of Processes of Nolinear and Relaxed Optics. Results of analysis of problem of interference of processes of Nolinear and Relaxed Optics are represented. It is shown that these processes are caused by various mechanisms of the relaxation of first-order excitation: radiative or nonradiative relaxation properly. Classification of proper phenomena, which is based on expansion of Poynting vector to series by steps of intensities of electric and magnetic fields. Proper phenomena and processes are analyzed on the basis of this classification.

Key words: Nonlinear Optics, Relaxed Optics, Poynting vector, expansion to serie, classification of phenomena, radiate relaxation, nonradiative relaxation.

Постановка наукової проблеми та її значення. Основна різниця між ефектами нелінійної та релаксаційної оптики зумовлена механізмами релаксації первинно збуджених центрів розсіяння (поглинання) світла. У нелінійній оптиці основними механізмами є випромінювальні [3; 7; 8; 9]; в релаксаційній оптиці – безвипромінювальні [3]. Ця різниця з електродинамічної точки зору може бути пояснена за допомогою дійсної та уявної частини розкладу вектора Пойнтінга в ряд за степенями напруженості електричного та магнітного полів.

Тому саме доцільно розглянути різницю між релаксаційно та нелінійно оптичними ефектами із цієї точки зору. Окрім того, варто проаналізувати класифікацію нелінійно-оптичних ефектів, запропоновану С. В. Ахмановим [2].

Мета цієї роботи – встановлення впливу нелінійно-оптичних ефектів на формування структурних фазових змін в опромінюваному матеріалі (релаксаційно-оптичні ефекти) та, навпаки, ролі структурних змін у формуванні нелінійно-оптичних ефектів.

Виклад основного матеріалу дослідження та обґрунтування отриманих результатів. Нелінійна оптика ґрунтується на розкладі в ряд поляризації P , як правило, її дійсної частини, за степенями напруженості електричного поля E [7; 8]:

$$P(t) = \chi^{(1)} E(t) + \chi^{(2)} E^2(t) + \chi^{(3)} E^3(t) + \dots \quad (1)$$

При цьому поляризованість χ можна записати як такий розклад:

$$\chi = \chi^{(1)} + \chi^{(2)} E(t) + \chi^{(3)} E^2(t) + \dots \quad (2)$$

Але в загальному випадку в цей розклад може бути включена не лише дійсна частина поляризованості, а й комплексна проникність [9]. Такі розклади можна застосувати й до тензорів діелектричної та магнітної проникностей (ϵ_{ij} та μ_{ij}) із врахуванням і дійсної, і комплексної частин:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^1 + i\epsilon_{ij}^2 + (\epsilon_{ijk}^1 + i\epsilon_{ijk}^2)E_k + (\epsilon_{ijkl}^1 + i\epsilon_{ijkl}^2)E_k E_l + \dots, \quad (3)$$

$$\mu_{ij} = \mu_{ij}^1 + i\mu_{ij}^2 + (\mu_{ijk}^1 + i\mu_{ijk}^2)H_k + (\mu_{ijkl}^1 + i\mu_{ijkl}^2)H_k H_l + \dots \quad (4)$$

Тут H – напруженості магнітного поля, використані в їхньому тензорному добутку. Можна скласти тензорний добуток тензорів (3) та (4) і записати окремо дійсну та уявну частину цього добутку.

$$\begin{aligned} \text{Re}(\epsilon_{ij} \times \mu_{ij}) &= (\epsilon_{ij}^1 + \epsilon_{ijk}^1 E_k + \epsilon_{ijkl}^1 E_k E_l + \dots) \times (\mu_{ij}^1 + \mu_{ijk}^1 H_k + \mu_{ijkl}^1 H_k H_l + \dots) - \\ &- (\epsilon_{ij}^2 + \epsilon_{ijk}^2 E_k + \epsilon_{ijkl}^2 E_k E_l + \dots) \times (\mu_{ij}^2 + i\mu_{ijk}^2 H_k + \mu_{ijkl}^2 H_k H_l + \dots), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(\epsilon_{ij} \times \mu_{ij}) &= (\epsilon_{ij}^1 + \epsilon_{ijk}^1 E_k + \epsilon_{ijkl}^1 E_k E_l + \dots) \times (\mu_{ij}^2 + \mu_{ijk}^2 H_k + \mu_{ijkl}^2 H_k H_l + \dots) + \\ &+ (\epsilon_{ij}^2 + \epsilon_{ijk}^2 E_k + \epsilon_{ijkl}^2 E_k E_l + \dots) \times (\mu_{ij}^1 + \mu_{ijk}^1 H_k + \mu_{ijkl}^1 H_k H_l + \dots). \end{aligned} \quad (6)$$

Цей тензорний добуток є нічим іншим, як розкладом у ряд коефіцієнта для вектора Пойнтінга в середовищі [9]. Класифікацію можливих типів нелінійно-оптичних та релаксаційно-оптичних явищ, що може бути інтерпретована за допомогою цих добутків, наведено в табл. 1 [10]. Дійсна частина цих добутків відповідає випромінювальній релаксації, а уявна – безвипромінювальній.

Таблиця 1

Основні типи можливих явищ, які базуються на розкладі в ряд $\epsilon_{ij} \times \mu_{ij}$ [5]

$\epsilon_{ij} \times \mu_{ij}$	$\text{Re}(\epsilon_{ij} \times \mu_{ij})$ Випромінювальні процеси			$\text{Im}(\epsilon_{ij} \times \mu_{ij})$ Безвипромінювальні процеси		
	$\sim E_i \dots E_j$	$\sim H_i \dots H_j$	$\sim E_i \dots H_j$	$\sim E_i \dots E_j$	$\sim H_i \dots H_j$	$\sim E_i \dots H_j$
Процеси першого порядку (члени зі знаком "+")	Чисті електрооптичні процеси, включаючи ефекти Поккельса та Керра	Чисті магнітооптичні процеси, включаючи ефект Фарадея	Змішані електро- та магнітооптичні явища	Електрооптично індуковані процеси фазових змін в опромінених матеріалах	Магнітооптично індуковані процеси фазових змін в опромінених матеріалах	Змішані електро- та магнітооптично- індуковані процеси фазових змін в опромінених матеріалах
Процеси другого порядку (члени зі знаком "-")	Перевипромінювальні електрооптично- індуковані процеси	Перевипромінювальні магнітооптично- індуковані процеси	Перевипромінювальні змішані електро- та магнітооптично- індуковані процеси	Електрооптично-перевипромінювально індуковані процеси фазових змін в опромінених матеріалах	Магнітооптично-перевипромінювально індуковані процеси фазових змін в опромінених матеріалах	Змішані електро- та магнітооптично-перевипромінювально індуковані процеси фазових змін в опромінених матеріалах
Мульти-процеси (N-порядку)	N-перевипромінювальні електрооптично- індуковані процеси	N-перевипромінювальні магнітооптично- індуковані процеси	N-перевипромінювальні змішані електро- та магнітооптично- індуковані процеси	Електрооптично N-перевипромінювально індуковані процеси фазових змін в опромінених матеріалах	Магнітооптично N-перевипромінювально індуковані процеси фазових змін в опромінених матеріалах	Змішані електро- та магнітооптично N-перевипромінювально індуковані процеси фазових змін в опромінених матеріалах

Ця електромагнітна класифікація є досить наближеною та неповною особливо з релаксаційно-оптичної точки зору. Але водночас вона дає змогу розглядати ефекти нелінійної та релаксаційної оптики з єдиних позицій. Це своєю чергою може бути перехідним містком між нелінійно- та релаксаційно-оптичними процесами і дає можливість якісно встановити зв'язок між цими явищами. За інтенсивного збудження середовища його симетрійні характеристики змінюються. Ця зміна є динамічним процесом. Тому зміна електромагнітних констант відповідає лише за зміну електромагнітних характеристик середовища. Структурні зміни опромінюваного матеріалу визначаються електромагнітними (швидкі) та повільними (телові) процесами. Члени тензорного розкладу вектора Пойнтінга можуть відповідати і класичним оптичним процесам, включаючи нелінійно-оптичні

(відбивання, пропускання, випромінювання та перевипромінювання), і релаксаційно-оптичним (утворення нових стабільних та метастабільних фаз та структур) процесам. Останні процеси (права частина табл. 1), як правило, не описуються кристалографічними тензорними, включаючи добутки, уявленнями. Але цей метод мусить бути розвиненим, оскільки вектор Пойнтинга та його тензорний розклад у ряд представляють перерозподіл енергії опромінення в опроміненому матеріалі. Це дає змогу встановити співвідношення між випромінювальними та безвипромінювальними процесами при взаємодії світла та речовини.

Основні труднощі цього методу – це визначення нелінійних членів електричної та магнітної проникностей середовища. Відомо з робіт Й. Ліндхарда, що в лінійному наближенні електрична і магнітна сталі взаємозв'язані [9].

Окрім того, часи формування відповідних процесів різні. Тому для більш детального моделювання процесів взаємодії потужного світлового опромінення з речовиною ми повинні включати часові, концентраційні та енергетичні умови опромінення. Водночас ця класифікація дає змогу визначити нові класи нелінійно-оптичних явищ, які можуть бути виміряні за допомогою релаксаційно-оптичних методів.

Для прикладу проаналізуємо експериментальні результати взаємодії серії імпульсів неодимового лазера (тривалість імпульсу – 10 нс, частота слідування – 12,5 Гц, довжина хвилі – 1,06 мкм) та імпульсу рубінового лазера (тривалість імпульсу – 5 мс, довжина хвилі – 0,69 мкм, густина енергії опромінення – 40 Дж/см²) з антимоїдом індію [2]. У цьому випадку основними є такі процеси: нелінійно-оптичний ефект дроблення кванту опромінення (6 та 10), багатократне перевипромінювання з довжиною хвилі, рівній ширині забороненої зони опроміненого кристалу, багатофотонне поглинання, що приводить і до хаотизації лазерного випромінювання (якщо розглядати сам процес опромінення і оптичну накачку напівпровідникового лазера), і до утворення структурних змін опроміненого матеріалу [9]. Як видно, тут основними є мультипроцеси і випромінювальні (нелінійно-оптичні), і безвипромінювальні (релаксаційно-оптичні).

Для більш детальної класифікації релаксаційно-оптичних процесів використовують кінетичну класифікацію, яку покладено в основу релаксаційної оптики та наведено в табл. 2 [9].

Таблиця 2

Основні результати незворотної взаємодії оптичного випромінювання з твердими тілами [9]

Кінетичні ефекти	Динамічні ефекти	Змішані ефекти
1. $\tau_0 > \tau_h$; $\tau, \tau' \gg \tau_h, \tau_r$ Для будь-яких N_f та N_s маємо фотохімічні процеси (за винятком $N_f \geq N_s$) 2. $\tau_0 < \tau_h$; $\tau_h < \tau' < \tau_r$; $\tau < \tau_r$; $h\nu > E_g$ – фотостимульоване підпорогове дефектоутворення 3. $\tau > \tau_h$; τ_r ; $N_f \ll N_s$ класична рівноважна фотохімія	1. $\tau_0 < \tau_h$; $\tau < \tau_r$; τ_{ru} – нерівноважні ефекти; нелінійна оптика; інтерференційні явища 2. $\tau_0 > \tau_h$; τ_r ; $N_f \leq N_s$ – динамічне підпорогове дефектоутворення, ефект Яна-Теллера, теплові складники лазерного відпалювання та лазерного легування 3. $\tau_0 > \tau_h$; τ_r ; $N_f \gg N_s$ – плавлення, теплове руйнування тощо	1. Лазерне відпалювання напівпровідників: а) при $\tau_0 < \tau_h$; $\tau > \tau_r, E_g > h\nu > E_a$ – явища 1 та 3; а при $\tau_0 > \tau_h$ – явища 5 та 6; б) $h\nu > E_g$, явища 2 та 5 2. Лазерне легування та ефекти переключання плівок – суміш явищ 1–6

Тут, згідно з М. М. Боголюбовим, уведені часи, які відповідають різним фізичним явищам і, відповідно, поданням, за допомогою яких їх описують: τ_h – час хаотизації, відповідає локальній релаксації акту збудження (взаємодії); τ_r – динамічний час релаксації системи; τ_i – час опромінення кристала; τ і τ' – час життя збудження в рівноважному та нерівноважному станах, відповідно; τ_0 – час утворення незворотної зміни. Енергетичними характеристиками є: $h\nu$ – енергія кванта падаючого випромінювання; E_g – ширина забороненої зони напівпровідника; E_a – енергія активації відповідного центра збудження; kT – тепла енергія; N_f – густина світлового потоку, квант.см⁻²; N_s – густина центрів поглинання (розсіяння) випромінювання.

Релаксаційна оптика є синтезом квантової електроніки, нелінійної оптики, радіаційної фізики твердого тіла, фізики плазми та нерівноважної термодинаміки. Саме тому класифікація, що наведена в табл. 1, не може бути основною для релаксаційної оптики.

Легко бачити, що мультипроцеси класифікації табл. 1 більшою або меншою мірою відповідають мішаним процесам релаксаційної оптики згідно з класифікацією табл. 2.

За релаксаційно-оптичного моделювання процесів незворотної взаємодії мілісекундних та наносекундних імпульсів випромінювання рубінового лазера з антимонідом індію була використана решітка сфалериту [9; 11]. Основними параметрами моделювання були енергії відповідних хімічних зв'язків. Метод послідовного каскадного збудження відповідних хімічних зв'язків у режимі насичення збудження дав змогу визначити основні особливості відповідних процесів, включаючи нелінійно- та релаксаційно-оптичні, для різних режимів опромінення.

Аналогічне моделювання було проведене для кремнію, германію та алотропних видозмін вуглецю [9; 11]. У цьому випадку була використана фазова діаграма кремнію [1; 6]. Основними параметрами моделювання були координаційні числа [9; 11].

Але для встановлення якісного співвідношення нелінійно- та релаксаційно-оптичних процесів класифікація табл. 1 є дуже важливою, тому що дозволяє визначити основні особливості можливих процесів та може бути використана поряд з іншими методами моделювання для визначення основних характеристик процесів.

Тепер проаналізуємо класифікацію С. В. Ахманова [7] основних напрямів нелінійної оптики.

Фізика оптичної нелінійності та нелінійно-оптична спектроскопія [7]. Динаміка збудженого світлом середовища є нелінійна. Нелінійна спектроскопія є одним з ефективних методів сучасних досліджень.

Хвильова нелінійна оптика [7]. Під час процесів нелінійних взаємодій та самовзаємодій загалом змінюється нелінійним способом і поляризація хвиль – виникають поляризаційні нелінійні ефекти. Ці генеровані нелінійності зумовлюють появу таких ефектів: рухомі структури, оптичну турбулентність та ін.

Фізика дії потужного світлового поля на речовину [7]. Нелінійний відгук середовища та нелінійні оптичні явища відіграють важливу, а часто й основну, роль у механізмах лазерного збудження і релаксації сильно нерівноважних станів в атомах, молекулах та конденсованих середовищах. Окрім того, фемто- й аттосекундні імпульси використовують для лазерної діагностики нерівноважних станів та швидкодійних процесів.

Прикладна нелінійна оптика [2]. Перетворення частотного й кутового спектрів, швидке управління амплітудою та фазою світлових хвиль лежать в основі для всіх нелінійно-оптичних пристроїв.

С. В. Ахманов також виділив такі перспективні напрями розвитку нелінійної оптики [7]:

Надсильні світлові поля: від нелінійної оптики атомів до нелінійної фізики електронів. Інтенсивності опромінення $10^{16} - 10^{20} \text{ W/cm}^2$. Перехід до світлових полів із напруженістю $E_t \sim 10^{10} - 10^{11} \text{ V/cm}$ дає змогу безпосередньо перевірити основні положення квантової електродинаміки. Головними явищами тут є надпорогова іонізація атомів, нелінійне томсонівське та комптонівське розсіяння та ін.

Сильні нелінійні ефекти в пасивних системах з оптичним оберненим зв'язком. Основними явищами цього розділу фізики є оптична бістабільність, мультистабільність, нестійкість, генерація періодичних просторових структур та хаос.

Збудження та нелінійно оптична діагностика сильно нерівноважних станів у напівпровідниках та металах. Поглинання лазерного випромінювання зумовлює каскад різних процесів, включаючи фазові трансформації в опромінених матеріалах («холодне» плавлення та ін.).

Нелінійно оптична генерація нових квантових станів світлового поля. Основними є явища нелінійної статистичної оптики.

Слід зазначити, що ця класифікація не дає змоги встановити межі й області взаємовпливу нелінійної та релаксаційної оптики.

Слід зазначити, що проблему хаосу [2; 5] (і хаотизації лазерного опромінення, і гідродинамізації опроміненого матеріалу [9; 5]) можна розв'язати за допомогою фізико-хімічного методу послідовного каскадного збудження відповідного числа хімічних зв'язків опроміненого матеріалу в режимі насиченого збудження.

Кожне нелінійно-оптичне явище можна представити як фазовий перехід відповідного роду [5; 6; 4; 1]. Так, дворівневий лазер є прикладом фазового переходу 1-го роду [6]. Тут для опису фазових переходів використовується класична теорія Ландау [5; 6; 4; 1]. Звичайно, це переходи нерівноважні. У цьому сенсі нелінійно-оптичні ефекти є нерівноважними релаксаційно-оптичними ефектами. Однак тут термодинамічні характеристики переходу, як правило, замінюються на фізико-хімічні [4].

Фазові трансформації, які характерні для лазерного відпалювання чи лазерного легування, також намагаються описати за допомогою термодинамічних підходів. Однак слід зазначити, що тут є й плазмові, сотові та каскадні фізико-хімічні моделі, які зазвичай не враховують тонкощі нелінійно-оптичних явищ [7; 9].

Класифікація явищ, що наведена в табл. 1, розширює «діапазон» зближення нелінійної та релаксаційної оптики, хоча й потребує серйозного доопрацювання.

Висновки. Отже, у пропонованій роботі проаналізовано питання про взаємовплив ефектів нелінійної та релаксаційної оптики.

Наведено й проаналізовано класифікацію нелінійно-оптичних і релаксаційно-оптичних явищ, яка ґрунтується на розкладі вектора Пойнтінга для середовища в ряд за степенями напруженостей електричного та магнітного полів.

Для порівняння дається кінетична класифікація процесів незворотної взаємодії оптичного випромінювання з речовиною, що покладена в основу релаксаційної оптики.

Наведено класифікацію нелінійно-оптичних процесів С. В. Ахманова.

Проведено порівняльний аналіз проблеми взаємовпливу нелінійно-оптичних та релаксаційно-оптичних процесів із точки зору цих класифікацій.

Список використаної літератури

1. Андреев А. В. Кооперативные явления в оптике / А. В. Андреев, В. И. Емельянов, Ю. А. Ильинский. – М. : Наука, 1988. – 286 с.
2. Богатырев В. А. Получение низкоомных n-слоев на антимониде индия после лазерного облучения / В. А. Богатырев, Г. А. Качурин // Физика и техника полупроводников. – Т. 11. – № 1. – 1977. – С. 100–102.
3. Милославский В. К. Нелинейная оптика / В. К. Милославский. – Харьков : Изд-во Харьков. нац. ун-та им. В. Е. Каразина, 2008. – 312 с.
4. Перина Я. Квантовая статистика линейных и нелинейных оптических явлений / Я. Перина. – М. : Мир, 1987. – 370 с.
5. Хакен Г. Лазерная светодинамика / Г. Хакен. – М. : Мир, 1988. – 350 с.
6. Хакен Г. Синергетика / Г. Хакен. – М. : Мир, 1980. – 406 с.
7. Шен И. Р. Принципы нелинейной оптики / И. Р. Шен. – М. : Наука, 1989. – 559 с.
8. Boyd R. W. Nonlinear optics / R. W. Boyd. – Amsterdam a. o. : Academic Press, 2003. – 578 p.
9. Trokhimchuck P. P. Foundations of Relaxed Optics / P. P. Trokhimchuck. – Lutsk : Vezha, 2011. – 627 p.
10. Trokhimchuck P. P. A problem of interaction of nonlinear and relaxed optical phenomena / P. P. Trokhimchuck / Proc of VIII Int. conf. «Electronics and Applied Physics», October 24–27, 2012. – Kyiv : Taras Shevchenko National University, Faculty of Radiophysics, 2012. – P. 23–24.
11. Trokhimchuck P. P. Problem of saturation of excitation in relaxed optics / P. P. Trokhimchuck // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, No. 3–4, Vol. 14, 2012. – P. 363–370.

Стаття надійшла до редколегії
08.10.2012 р.