



# Спектральная эффективность и изотопические сверхрешетки



Любовь ЖУРАВЛЕВА  
Lubov M. ZHURAVLEVA

Анастасия ЗМЕЕВА  
Anastasia A. ZMEEVA



Дмитрий ЛОГИНОВ  
Dmitry A. LOGINOV

*Журавлева Любовь Михайловна – кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).*

*Змеева Анастасия Александровна – аспирант МИИТ.*

*Логинов Дмитрий Александрович – студент МИИТ.*

**Неопределенность энергетических уровней полупроводников по Гейзенбергу и флуктуации величины оптической несущей и спектральной ширины линий излучения. Влияние оптоэлектронных характеристик вещества, геометрических размеров, качества элементной базы.**

**П**овышение пропускной способности волоконно-оптических линий только путем дальнейшего наращивания скорости передачи цифровых сигналов имеет свои ограничения, обусловленные отсутствием соответствующей элементной базы [1]. Кроме того, рост скорости (уменьшение длительности элементарного импульса) усиливает влияние дисперсионных искажений в оптическом волокне при увеличении дальности связи. В результате происходит уширение импульсов, которое приводит к межсимвольным помехам и ухудшению качества, а это заставляет искать выход в том числе и за счет снижения дальности связи.

Использование технологии волнового уплотнения позволяет решить задачу увеличения пропускной способности [2], не прибегая к серьезным потерям качества. Для повышения эффективности волнового уплотнения наметилась тенденция уменьшения частотного интервала между спектральными каналами до 50 ГГц и менее (25 и даже 12,5 ГГц). Такие интервалы уже утверждены МСЭ-Т (рек. G.694.1) [2]. Однако уменьшение защитного интервала повышает риск появления перекрестных помех между волновыми каналами за счет

*Ключевые слова: оптоэлектроника, волновое уплотнение, изотопические сверхрешетки, спектральная эффективность, передача информации.*

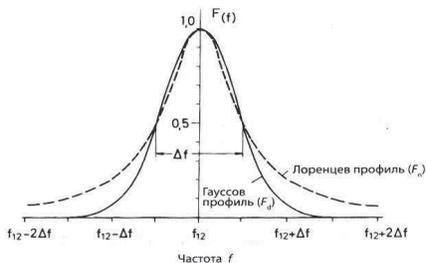


Рис. 1. Функции формы гауссовой и лоренцевой линий.

нестабильности оптической несущей  $f_n$  и спектральной ширины линии излучения лазера  $\Delta f$  ( $\Delta \lambda$ ). Так, для системы DWDM и скорости передачи 10 ГГц (STM-64) нестабильность частоты и спектральной ширины линий не должна превышать соответственно  $\pm 5$  ГГц и  $\pm 0,04$  нм. Столь жесткие условия накладывают свои требования к качеству источников излучения (полупроводниковых лазеров).

Флуктуации величины оптической несущей и спектральной ширины линий излучения связаны с известной неопределенностью Гейзенберга энергетических уровней полупроводника  $(E_2 - E_1) = \Delta E$ , где индексы 1, 2 относятся к основному и возбужденному состояниям электрона и временам нахождения на них носителей заряда  $\tau_{1,2}$  [3]. Из условия Бора, согласно которому после перехода электрона в основное состояние излучается фотон с энергией

$$\Delta E = h\nu \quad (1)$$

(где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с – постоянная Планка, а  $\nu$  – частота фотона), выводится ширина полосы  $\Delta f$  одной линии в спектре излучения лазера:

$$\Delta f = (1/2\pi)(1/\tau_1 + 1/\tau_2) \quad (2)$$

( $\tau_2$  – время нахождения электрона на верхнем уровне;  $\tau_1$  – время нахождения на нижнем (основном) энергетическом уровне).

Более точная форма уширения линии излучения  $F(f)$  (рис. 1) описывается следующей формулой [3]:

$$F(f) = \frac{(\Delta f / 2)^2}{(f - f_0)^2 + (\Delta f / 2)^2} \quad (3)$$

Наряду с естественным уширением, изображенным на рис. 1, существуют и причины уширения, связанные с неоднородными процессами (эффектом Штарка, доплеровским эффектом). Какой именно фактор является здесь решающим, зависит от типа лазера (материала). К примеру, для полупроводниковых лазеров уширение объясняется структурой энергетических зон (распределение энергий электронов и дырок), которое можно оценить по формулам (2) и (3). На структуру энергетических зон полупроводников оказывают влияние оптоэлектронные характеристики вещества, геометрические размеры, качество изготовления элементной базы. Наибольшим коэффициентом усиления обладают лазеры на низкоразмерных структурах (квантовых ямах, проволоках и точках) [4], эффективность которых во многом зависит от исходных материалов и разрешающей способности нанотехнологии.

Так, в качестве возможных причин нестабильности величины оптической несущей можно назвать механические напряжения в гетеропереходах наноструктур, возникающие из-за разности постоянных кристаллической решетки полупроводников. Эти напряжения могут растягивать или сжимать эпитаксиальные слои полупроводника, а следовательно и изменять, например, ширину ям и барьеров между ними (рис. 2). Известно, что случайные искажения размеров приводят к флуктуациям энергетических уровней, разности  $\Delta E$  и частоты излучения лазера  $\nu$  (1),  $f$  (2). Для уменьшения нестабильности оп-

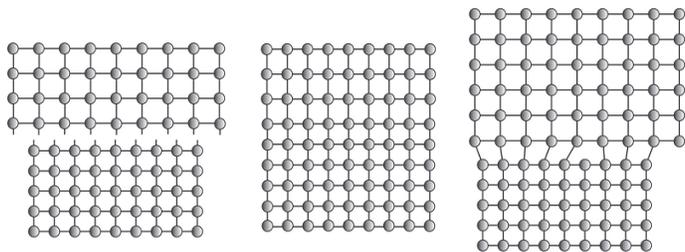
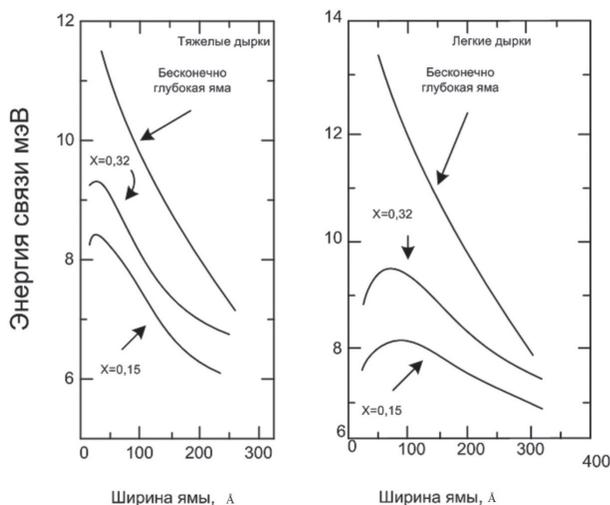


Рис. 2. Напряженные слои сверхрешетки.



Рис. 3. Зависимость энергии связи от ширины ямы для арсенида галлия.



тической несущей следует совершенствовать наноструктуры и создавать новые материалы, способные обеспечить минимально возможные отклонения величины  $f$ . Значения флуктуаций оптической несущей можно оценить с помощью математического моделирования или экспериментальных исследований полупроводниковых материалов [5]. Аналогичное влияние на нестабильность оптической несущей оказывают технологии производства лазеров, которые могут обеспечить точность изготовления в некоторых границах, определенных разрешающей способностью [1].

Кроме оптической несущей на межканальный частотный интервал влияет величина спектральной ширины линий  $\Delta f$ . Исходя из формулы (2), можно сделать вывод, что чем больше значения  $\tau_{1,2}$ , тем меньше ширина линий  $\Delta f$ . Продолжительность «жизни» экситона (связанное состояние электрона и дырки) напрямую зависит от энергии связи  $E_{св}$ . Наибольшее значение этой энергии обеспечивает максимальное время «жизни» экситона ( $\tau_2$ ) [4]. Максимум энергии связи наступает при определенной ширине квантовой ямы (рис. 3), зависящей от типа полупроводника. Как видно из рисунка, незначительные отклонения от оптимальной ширины (для арсенида галлия она составляет 3 нм) приводят к резкому изменению энергии связи. Отсюда точность изготовления квантовых структур должна быть менее 1 нм. Сегодня ни одна нанотехнология не имеет такой высокой точности [6].

Следует отметить, что точность изготовления зависит от дисперсионных искажений. Дисперсионные ограничения возникают или непосредственно при облучении заготовок (нанолитография), или при измерении, например, точности ширины эпитаксиального слоя. Дисперсионные искажения не могут быть меньше длины волны используемого излучения. По этому показателю наилучших результатов можно добиться с помощью ядерных технологий. Так, облучая заготовку тепловыми нейтронами с длиной волны порядка 1 нм, можно создать с высокой точностью наноструктуру из собственных изотопов исходного вещества [1]. Среди наиболее перспективных моделей новых материалов особое место занимают микроструктурированные на базе сверхрешеток [1,4,5].

Сверхрешетка — это твердотельная периодическая структура, в которой на носители заряда наряду с потенциалом кристаллической решетки действует дополнительный встроенный потенциал, созданный путем чередования слоев из разных полупроводниковых материалов определенной ширины [5].

Модель сверхрешетки, благодаря нанометровой ширине слоев и определенной их периодичности, позволяет проектировать новые полупроводниковые материалы с заранее заданными оптоэлектронными характеристиками. Из таких материалов можно получать низкоразмерные структуры разной формы (плоские, цилиндрические, шарообразные, конусообразные, кольцеобразные, эллипсообразные и т. д.).

К преимуществам низкоразмерных сверхрешеток можно отнести возможности:

1) создания нового материала с заданной энергетической структурой;

2) использования этого материала для полупроводниковых лазеров на квантовых точках инжекционного типа, которые являются самыми эффективными сегодня по коэффициенту усиления и обладают наиболее узким спектром излучения, высокой стабильностью (симметричностью спектра), а также не требуют сверхнизкого охлаждения [4];

3) применения нового материала при создании фотодетекторов на переходах между уровнями размерного квантования (сверхрешетках) в инфракрасном (длинном и сверхдлинном) диапазоне волн 3–35 мкм, что исключено для обычных полупроводников из-за сравнительно широкой запрещенной зоны [4].

Общие недостатки сверхрешеток на разных полупроводниках, в том числе легированных:

1) технологические трудности при создании массивов квантовых точек для лазеров (однородных по размерам, формам и бездефектных [4] даже с использованием метода самоорганизации на основе осаждения паров и молекулярно-лучевой эпитаксии);

2) наличие большего фонового тока (теплового), уменьшающего чувствительность фотодетектора при наличии легирующих добавок со свободными электронами, легко переводящихся в зону проводимости из-за колебаний кристаллической решетки и столкновений с фононами.

С учетом отмеченных особенностей предлагается за основу сверхрешеток взять изотопы одного и того же вещества.

В изотопических сверхрешетках пространственное ограничение (квантовые ямы) для носителей заряда внутри кристаллов создается сочетанием слоев из разных изотопов идентичного вещества – в отличие от просто сверхрешеток, где чередуются разные полупроводниковые материалы (хотя и с минимальной разницей постоянных кристаллической решетки). Разница в кристаллических решетках влияет на распределение энергетических зон (например, расщепление валентной зоны для тяжелых

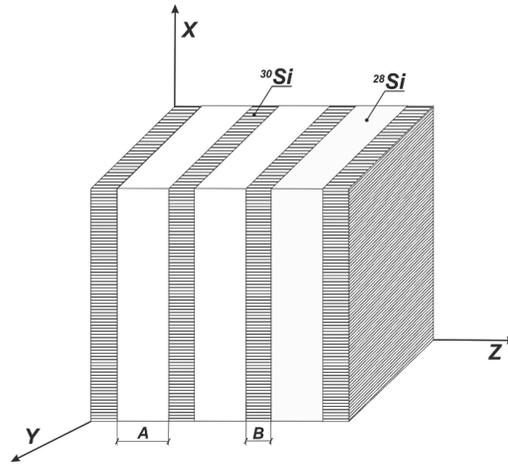


Рис. 4 Модель сверхрешетки.

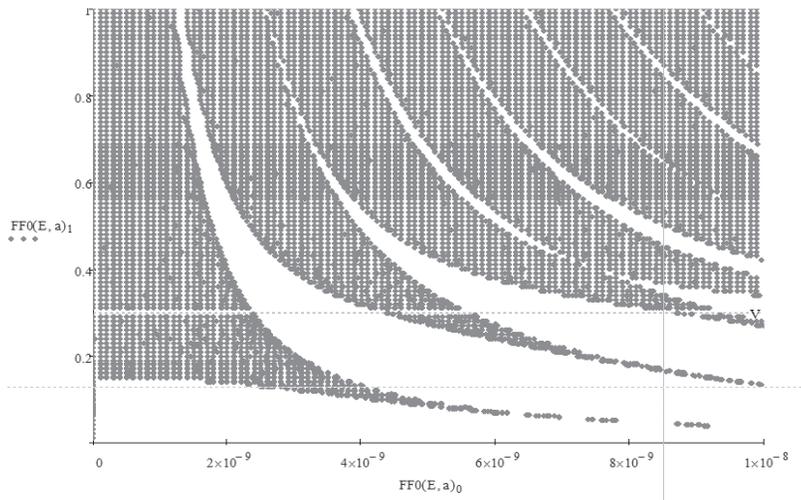
и легких дырок [4]), затрудняет проектирование нового материала с заданными параметрами и создание лазеров с узкой и симметричной шириной спектра излучения.

Использование собственных изотопов обеспечивает определенные преимущества. Как известно, изотопы имеют практически идентичную кристаллическую решетку, одинаковые химические и разные физические свойства, например ширину запрещенной зоны. С помощью изотопов можно не только получать пространственное ограничение для носителей заряда, но и создавать квантовые структуры с «идеальными» гетеропереходами, дающими минимальные флуктуации ширины спектра излучения.

При оценке возможного выигрыша от применения изотопических сверхрешеток нужно исследовать влияние механических искажений в гетеропереходах и точности изготовления сверхрешеток на распределение энергетических уровней, а так же влияние флуктуаций ширины ямы и барьера на время «жизни» экситонов. В основе таких исследований лежит расчет зависимости энергий квантования носителей заряда от ширины ямы (барьера). С помощью подобной функции можно оценить и взаимозависимости механических напряжений кристаллических решеток и качества изготовления геометрических размеров квантовых структур.

Расчет зонной структуры сверхрешеток возможен с участием модели Кронига-Пенни [4], согласно которой электроны





$$\begin{aligned}
 e &:= 1.602 \cdot 10^{-19} \\
 h &:= 1.055 \cdot 10^{-34} \\
 m_0 &:= 9.11 \cdot 10^{-31}
 \end{aligned}$$

```

k0(E) := sqrt(2m·E·e / h^2)    q(E) := sqrt(2m·(V - E)·e / h^2)
fl(E, a, b) := ( (q(E)^2 - k0(E)^2) / (2·q(E)·k0(E)) ) · sinh(q(E)·b) · sin(k0(E)·a) + cosh(q(E)·b) · cos(k0(E)·a)
Given
|fl(E, a, a)| ≤ 1
FF0(E, a) := Find(a, E)
    
```

Текст программы в Mathcad:

Рис. 5. Зависимость разрешенных значений энергии (закрашены) от толщины слоев чередующихся материалов.

двигаются в периодическом потенциале из строго прямоугольных ям.

Структура сверхрешетки изображена на рис. 4, где показаны ее основные параметры (ширина ямы  $a$ , ширина барьера  $b$ , период решетки  $d$ , высота потенциального барьера  $V_0$ ). Для внутренних областей ямы выражение волновой функции свободного электрона  $\psi(z)$  с энергией  $E$  и эффективной массой  $m = \gamma m_0$  (где  $\gamma$  – коэффициент,  $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг [8]) на основании уравнения Шредингера записывается в виде:

$$\psi(z) = Ae^{ik_0z} + Be^{-ik_0z},$$

где  $A, B$  – коэффициенты уравнения,  $k_0$  – волновой вектор,  $k_0^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$ .

Внутри энергетического барьера волновая функция имеет вид  $\psi(z) = Ce^{qz} + De^{-qz}$ ,

где  $C, D$  – коэффициенты уравнения,  $q$  – волновой вектор, который находится из уравнения  $V_0 - E = \frac{\hbar^2 q^2}{2m}$ .

Используя условие непрерывности волновых функций и их производных при  $z = 0, z = a$ , а также свойства блоховских волновых функций с вектором  $k$  –  $\psi(a) = \psi(-b)e^{ik(a+b)}$ , составляется система уравнений, решение которой дает дисперсионное уравнение [4]:

$$\frac{q^2 - k_0^2}{2qk_0} shk_0 a \cdot \sin qb + chk_0 a \cdot \cos qb = \cos k(a+b)$$

Решение его численными методами с помощью программы Mathcad пред-

ставлено на рис. 5 в виде графиков зависимости энергии электрона от ширины ямы (для  $AlGaAs/GaAs$  при  $a=b$ ,  $m=0,067m_0$ ,  $V_0=0,3$  эВ). Как следует из рисунка, для значений  $a \geq 10$  нм энергии электронов четко определены и соответствуют отдельным квантовым ямам. При ширине  $a \leq 6$  нм в структуре происходит расщепление зон на разрешенные (они закрашены) и запрещенные. Эффект расщепления может оказать принципиальное влияние на характер прямых и непрямых переходов в полупроводниковых структурах и улучшить оптоэлектронные показатели непрямозонных полупроводников, например кремния и германия.

Сверхрешетки позволяют создавать с помощью чередования монослоев двух типов полупроводников новые материалы. Использование в качестве монослоев разных изотопов одного и того же химического элемента может значительно повысить качественные характеристики сверхрешеток, но при наличии заданной исполнительской точности. Изотопические слои создаются из чистых изотопов с применением тех технологий (молекулярно-лучевой эпитаксии, ядерного легирования), которые обеспечивают самую высокую точность изготовления.

## ВЫВОДЫ

Сверхрешетки на изотопах способны дать лазерам наименьшие флуктуации оптической несущей и полосы спектра излучения. Это предполагает увеличить скорость передачи информации (бит/с) и информационную нагрузку волоконно-оптических систем, повысить спектральную

эффективность за счет наращивания числа волновых каналов, а также энергетическую эффективность (дальность и качество волоконно-оптической связи).

Рост энергетической эффективности может быть связан и с повышением чувствительности фотодетекторов на сверхрешетках, поскольку отсутствие легирующих добавок в детекторах позволит уменьшить тепловой ток. Использование ядерных технологий для производства изотопических сверхрешеток обеспечит необходимое качество изготовления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлева Л. М., Плеханов В. Г. Перспективы применения нанотехнологий в телекоммуникационных системах//Успехи нанотехнологий: электроника, материалы, структуры/Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона.— М.: Техносфера, 2011.
2. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи.— М.: Солон-Пресс, 2004.—261 с.
3. Айхлер Ю., Айхлер Г. -И. Лазеры. Исполнение, управление, применение.— М.: Техносфера, 2008.
4. Мартинес-Дуарт Дж., Мартин-Палма Р., Агулло-Руеда Ф. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники.— М.: Техносфера, 2007.
5. Борисенко В. Г., Воробьева А. И., Уткина Е. А. Нанoeлектроника.— М.: Бином, 2009.
6. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника/Под ред. П. П. Мальцева.— М.: Техносфера, 2006.
7. Журавлева Л. М., Плеханов В. Г. Изотопическая нанотехнология низкоразмерных структур//Нано- и микросистемная техника.— 2010.— № 9.
8. Верещагин И. К., Кокин С. М., Никитенко В. А. и др. Физика твердого тела.— М.: Высшая школа, 2001.
9. Шлимак И. С. Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников: наука и приложение// Физика твердого тела.— 1999.—Т. 41, вып. 5.
10. Журавлева Л. М., Змеева А. А., Новожилов А. В. Нанотехнологии и волоконно-оптическая связь//Мир транспорта.— 2011.— № 4.
11. Журавлева Л. М., Кручинин А. С., Новожилов А. В. Математическое моделирование распространения света//Мир транспорта.— 2012.— № 1.
12. Журавлева Л. М., Кручинин А. С., Змеева А. А. Быстродействие волоконно-оптических систем//Мир транспорта.— 2012.— № 3. ●

## SPECTRAL EFFICIENCY AND ISOTOPIC SUPER LATTICES

**Zhuravleva, Lubov M.** – Ph. D. (Tech), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

**Zmeeva, Anastasia A.** – Ph. D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

**Loginov, Dmitry A.** – student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The authors describe the uncertainty of energy state of semiconductors after Heisenberg, fluctuations of a value of the optical carrier and of a spectral width of emission line. They study the influence of optoelectronic behavior of the matter, of geometrical dimensions, and of the circuitry quality.

**Key words:** optoelectronics, wave consolidation, isotopic super lattices, spectral efficiency, data transmission.

Координаты авторов (contact information): Журавлева Л. М. – zhlubov@mail.ru, Змеева А. А. – a\_zmeeva@mail.ru, Логинов Д. А. – dima979837@yandex.ru.

