

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО ОБРАЗА КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Л.М. Макаров<sup>1</sup>, С.В. Протасеня<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: saityvodabur@yandex.ru

## Информация о статье

УДК 519.61

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Макаров Л.М., Протасеня С.В. Моделирование фрактального образа квантового генератора // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 1. С. 116–123. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-1-116-123

**Аннотация:** Разработка и создание полупроводниковых устройств актуализирует проблему предварительного моделирования, позволяющего в значительной степени снизить затраты на проведение научных и технологических исследований. В представленной статье рассмотрен информационный подход по созданию фрактальной модели полупроводниковой структуры с учетом атомарных конструкций химических элементов, обеспечивающей возможность априорного исследования и вычисления типовых показателей рабочих процессов полупроводника. Методологическая основа процесса моделирования полупроводников представляется основой для разработки гетерогенных конструкций.

**Ключевые слова:** квантовый генератор, полупроводниковая структура, математическая модель.

Научные направления микроэлектроники и полупроводниковых приборов актуализируют внимание на совокупность информационных технологий и технических средств, необходимых для проведения фундаментальных научных исследований, а также на разработку принципов конструирования и синтеза новых материалов и приборов, в частности лазерной техники.

Определение перспективных направлений работ в области создания полупроводниковых квантовых генераторов – лазеров – начинается с построения математических моделей, сформированных с учетом специфики физических и химических свойств полупроводниковых материалов. Следует отметить, что именно такое сочетание показателей рабочих процессов в структуре полупроводника позволяет в последующем провести адекватное сопоставление результатов моделирования с имеющимися техническими показателями экспериментально созданных образцов техники.

Истоки формирования физических понятий в области оптической физики сформировались на основе работ М. Планка [1], примерно в начале XX столетия. Эти теоретические постулаты для хорошо известных явлений излучения светового потока получили развитие в работах А. Эйнштейна [2].

Введенная в научную практику серия новых понятий и терминов прошла многократную проверку, по результату которой сформировалась кван-

товая теория строения материи. Представление о дискретности событий и процессов формируется на понятии кванта энергии. Реконструкция известных понятий физики, производимая на основе нового термина, характеризующего дискретность событий, воспроизвела представление о квантовых системах, отличающихся масштабом и продолжительностью процессов.

Опираясь на представления микромира, где в качестве объектов рассматриваются атомы, молекулы и кластеры, формируется единая концепция эволюции микро- и макромира. Взаимная связь кванта энергии и полевых эффектов способствовали формированию представления о микро- и макросостояниях объектов Природы, которые во многом подобны, но различаются по уровню структурной организации материи.

Выделяя понятия микромира, акцентируется внимание на возможности повторения оптических принципов создания технических средств, но на основе квантовых эффектов. Квантовый оптический генератор, рассматривается как когерентный источник лучистого потока, реализуемый на полупроводниковой структуре.

Этот тезис является чрезвычайно важным для понимания процессов Природы. По современным представлениям, каждый химический элемент обладает уникальным спектром излучения и характеризуется определенной величиной энергии [2, 3].

Это соответствует факту существования некоторой константы – постоянной Планка, произведение которой на частоту излучения конкретного атома «воспроизводит» определенный физический эффект излучения. Наличие такого суждения способствовало укреплению теоретических основ квантовой теории, постулирующей наличие различий у всех объектов, представленных в Природе.

Микро- и макросостояния объекта соотносят с различными способами позиционирования в пространстве. Для макропространства характерно наличие описаний двух видов: корпускулярного или волнового. Принимая во внимание малые расстояния между объектами, в микропространстве одновременно реализуются два описания, различие которых возможно установить, используя вышеупомянутую постоянную Планка. Применение в теоретических расчетах постоянной Планка позволило установить показатель момента импульса фотона, характеризующий количество подвижной массы, а также распределение массы кластера фотонов относительно оси вращения. Сформулированные понятия в значительной степени изменили общий, ранее существующий постулат о принципах эволюции материи и полевых эффектах [6].

Наличие сложных процессов внутри материального объекта, в частности для атомарной конструкции химических элементов, позволило создать теоретические основы проектирования изделий и функциональных блоков микроэлектроники.

Оперируя понятием массы частиц, составляющих элементы некоторого объекта, и понятием энергии частиц, можно формально рассматривать функцию развития событий в исследуемой системе в заданном пространстве. В таком понимании рассматриваемое определение функции состояния системы из нескольких элементов декларирует наличие процесса, обладающего временной разверткой событий. В самом общем понимании такой тезис полностью соответствует теоретическим положениям термодинамики. Любой материальный объект, зафиксированный в начальный момент наблюдения, обладает энергией. Для такого объекта можно указать энергетический уровень, или иначе собственное значение квантовой системы, содержащей микрочастицы: электроны, протоны и другие элементарные частицы. По истечении некоторого времени энергетический уровень объекта понизится. В теоретическом отношении этот постулат справедлив при условии неизменности внешних факторов, хотя по своей сути отражает реальный термодинамический процесс, наблюдаемый повсеместно. Естественным логическим суждением, воспроизводимым на основе этого тезиса, является декларация наличия самопроизвольного процесса выравнивания энергетических состояний как минимум для двух объектов, находящихся в контакте (соприкосновении).

Для определенности положим наличие полупроводниковых структур. Известно, что в полупроводниковых структурах, при заданных условиях, события развиваются лавинообразно. Различают полупроводники *n*- и *p*-типа. Создание полупроводника *n*-типа осуществляется легированием, в процессе которого на поверхность из атомов базового полупроводника наносятся атомы материала донора, обладающие на валентной оболочке одним электроном больше, чем у атомов полупроводника. В полупроводниках *p*-типа основными носителями заряда являются дырки, инициализируемые включениями акцепторных примесей. Структурный профиль проводимости полупроводника определяется двумя уровнями: верхним –  $E_c$ -уровнем и нижним –  $E_v$ -уровнем. Верхний и нижний уровень характеризуют размер запрещенной зоны полупроводника  $\Delta E$ .

При создании контакта между полупроводниками возникает диффузный ток, который реализуется посредством хаотически организованного потока основных носителей заряда (электронов и дырок). В соответствии с известными понятиями термодинамики в полупроводниковой системе устанавливается динамическое равновесие основных носителей заряда. В пространственной области полупроводника, где разнородные потоки основных носителей заряда сопрягаются, частицы рекомбинируют между собой. В результате этого процесса в структуре полупроводников образуется область, не содержащая носителей заряда. Однако, следует признать, что наличие в этой области примесей создает условия формирования малых по величине токов. Это соответствует теоретическим моделям описания рабочих процессов в контактном слое [3].

Область, лишенная основных носителей заряда, находящаяся в соприкосновении с поверхностью полупроводника *p*-типа, приобретает отрицательный заряд, создаваемый потоком электронов. Напротив, контактная поверхность полупроводника *n*-типа приобретает положительный заряд, создаваемый потоком дырок.

Выделяя физическую границу раздела двух полупроводников, отмечаем естественное (самопроизвольное) образование двух слоев с пространственно распределенными зарядами противоположных знаков. Очевидно, что такая структура порождает электрическое поле, инициализирующее появление дрейфового тока, который по направлению противоположен диффузному току. В соответствии с теоретической моделью описания процессов отмечаем, что через некоторое время токовые потоки уравниваются, и в системе устанавливается условное динамическое равновесие пространственных зарядов. Такое состояние системы, представленной двумя полупроводниковыми структурами, характеризуют *p-n*-переходом.

Физические процессы на  $p$ - $n$ -переходе положены в основу работы полупроводникового прибора – диода, в котором область  $p$  является анодом, а область  $n$  – катодом. В электрической цепи диод обеспечивает проводимость только в одном направлении: от анода к катоду.

Эта физическая особенность организации рабочих процессов полупроводниковой структуры в задачах оптики реализуется иначе. Полупроводниковый оптический эффект реализуется на оптическом диоде. Первоначально, в рамках описательной модели рабочих процессов оптического диода, рассматривалась конструкция Фабри-Перо [1], где предусматривается создание двух параллельных оптических зеркальных поверхностей (рисунок 1).

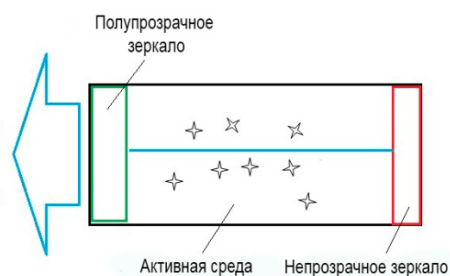


Рис. 1. Схема оптического диода

Для конструкции лазерного оптического диода необходимо запустить механизм вынужденного излучения фотонов с одинаковыми параметрами. Наиболее простое решение получается на основе кристаллического оптического резонатора. Инициализируя появление относительно небольшой группы фотонов в резонаторе, запускается множество подобных процессов, когда появляются новые фотоны с прежней поляризацией и фазой. Фотоны, летящие в других направлениях, покидают активную среду. Поддерживая определенный уровень стартового потока фотонов, можно наблюдать экспоненциальный рост числа фотонов в выходящем потоке. Этот режим соответствует большой заселенности фонами верхних уровней.

Система зеркал (резонатор) позволяет выбрать преимущественное направление движения фотонов – вдоль оси, или точнее, под очень малыми углами к ней. Эти фотоны отражаются от зеркал и опять возвращаются в активную среду, провоцируя другие атомы метастабильного уровня к вынужденному переходу в основное состояние. В целом для создания лазерного диода требуется наличие управляющего потока фотонов и положительной обратной связи

Для возникновения генерации лазерного излучения необходимо, чтобы на длине резонатора  $L$  укладывалось целое число полувольт:

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $n = \overline{1, m}$ .

При достижении определенной мощности излучение выходит через полупрозрачное зеркало. Понимание физического процесса позволило установить малую эффективность лазерного диода, обладающего одним  $p$ - $n$ -переходом (одной гомоструктурой).

На практике развитие получила конструкция с двойной  $p$ - $n$ -гетероструктурой (ДГС). Двойная гетероструктура может создаваться на основе разных материалов и обладать малой шириной запрещенной зоны, конструктивно расположенной между слоями из материала с большой шириной запрещенной зоны. Такая конструкция ДГС обеспечивала существенное увеличение концентрации разнополярных носителей в тонком слое, что способствовало проявлению положительной обратной связи. При этом отражение фотонов от гетеропереходов способствует развитию процессов, направленных на понижение концентрации в области низкого усиления [3, 4].

Для конструкции оптического резонатора Фабри-Перо достаточно просто создаются многочисленные потоки отражения, а, следовательно, происходит усиление лучистого потока, изначально инициализированного в активной среде резонатора. Задавая коэффициент отражения для полупрозрачного зеркала около 50 %, а для непрозрачного зеркала – около 98 %, реализуется оптический эффект многократного усиления. Для полупроводниковой структуры этот принцип сохраняется, но запуск инжекционного процесса осуществляется на  $p$ - $n$ -переходе посредством выбора режима работы управляемого источника тока. На этом принципе реализована конструкция полупроводникового квантового генератора – лазера. Обобщенная схема конструкции оптического полупроводникового лазера представлена на рисунке 2.

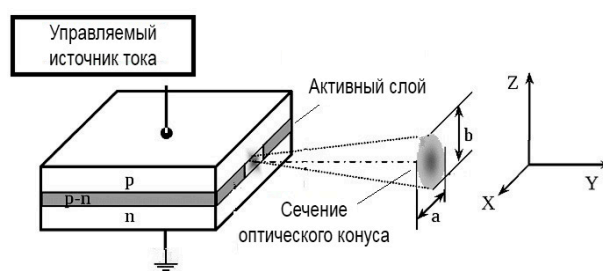


Рис. 2. Схема конструкции лазера на  $p$ - $n$ -переходе

В отличие от лазеров других типов, в полупроводниковых лазерах используются квантовые уровни с большой энергией, дислоцированные между разрешенными энергетическими зонами, а не между дискретными атомарными уровнями энергии. Инверсная населенность создается с помощью инжекции через  $p$ - $n$ -переход неравновесных носителей тока, путем приложения внешнего напряжения в прямом направлении.

По современным технологиям полупроводниковый лазер создается на кристалле, противоположные стороны которого отполированы и представляют поверхности отражения лучистого потока, наподобие оптического резонатора по конструкции Фабри-Перо. Между поверхностями располагается  $p$ - $n$ -переход. Достаточно малая площадь торцевого сечения  $p$ - $n$ -перехода позволяет создать направленный лучистый поток. Выходную поверхность можно рассматривать как щель, через которую проходит излучение. Апертурная характеристика излучения лазера определяется дифракционными параметрами полупроводниковых материалов. При толщине  $p$ - $n$ -перехода в 20 мкм и ширине – 120 мкм, типовая угловая расходимость соответствует приблизительно  $6^0$  в плоскости  $XZ$  и  $1^0$  – в плоскости  $YZ$  [3].

По факту профиль поперечного сечения светового конуса близок к эллипсу. Структура полупроводникового лазера подобна структуре светодиода. Торцевые грани конструкции сколоты по определенным кристаллографическим плоскостям, которые образуют почти идеальные зеркальные поверхности, обеспечивающие многократное отражение фотонных потоков и тем самым реализующие условие оптического резонанса.

В такой конструкции генерация когерентного излучения реализуется посредством инжекции основных носителей заряда в виде спонтанных потоков, направленных встречно, что воспроизводит эффект рекомбинации частиц, при котором выделяется энергия в виде потока фотонов.

Квантовая теория, оперируя понятиями электронной и кристаллической структуры полупроводника, позволяет констатировать наличие запрещенной зоны  $E_g$ , определяемой как пространство, в котором отсутствуют электроны. Фактически такая зона находится между полностью заполненной электронами области при температуре  $T = 0$  и валентной зоной  $E_v$  при такой же температуре. При действии некоторого напряжения на  $p$ - $n$ -переходе запускается процесс инжекции электронов и дырок.

Введение в рассмотрение показателя  $E_g$  позволяет создать таксономическое правило выделения полупроводников, металлов и диэлектриков. С другой стороны, для полупроводниковых лазеров такое правило способствует формированию предварительной оценки мощности излучения, что важно для практики.

Инжекция осуществляется с учетом физических свойств полупроводника, в котором выделяют валентную зону и зону проводимости. Разность энергий этих зон определяет энергетические свойства полупроводника, и характеризуются шириной запрещенной зоны. При температуре 300 °К у кремния ширина запрещенной зоны  $\Delta E = 1,12$  эВ; у германия  $\Delta E = 0,66$  эВ; у арсенида галлия  $\Delta E = 1,43$  эВ; у карбида кремния примерно  $\Delta E = 2,4 \sim 3,4$  эВ [1].

Комбинация как минимум из двух полупроводниковых материалов позволяет создать конструкцию квантового генератора. Для этого используют два различных примесных полупроводника, один из которых вырожден по электронам, другой по дыркам. Контакт двух таких полупроводников образует  $p$ - $n$ -переход и резонатор.

Лазерный резонатор – активный резонатор; в конструктивном отношении сложное устройство. Различают пассивные и активные резонаторы. Следует отметить, что рабочие режимы пассивных резонаторов значительно проще и достаточно полно изучены. Напротив, для активных резонаторов полные понятия о рабочих режимах находятся в стадии изучения. Наибольший практически интерес в изучении рабочих режимов активных резонаторов уделяется вопросам формирования энергетических портретов затухания различных мод. Принимая во внимание, что при наличии блока управления можно создавать высокодобротные моды, обратимся к рассмотрению внутренней среды квантового резонатора.

Рассмотрим основные параметры модели описания рабочих процессов в резонаторе, созданном на основе нескольких полупроводниковых структур. Уточним понятие моды. Предположим, что мода характеризуется одной из составляющих набора вычисленных функций, которые образуют сигнал. В этом смысле справедливо и обратное утверждение, согласно которому любой сигнал можно позиционировать некоторым набором вычисленных мод. Разложение сигнала на эмпирические функции позволяет проводить построение моделей и исследовать локальные явления.

В соответствии с принятым физическим описанием процесса внутри резонатора и наличием устойчивого процесса рекомбинации электронов – дырок, отмечаем наличие некоторого значения плотности энергии излучения.

В построении описания модели используются основные понятия квантовой механики и теории электромагнитного поля [2]. В таком случае принимаем постулат, что в атомарной конструкции из как минимум двух полупроводников реализуется два энергетических уровня  $E_1$  и  $E_2$ , отождествляемыми с волновыми функциями:

$$\begin{aligned} \varphi_1(r, t) &= u_1(r) \exp\left(-i \left(\frac{E_1}{\hbar}\right) t\right), \\ \varphi_2(r, t) &= u_2(r) \exp\left(-i \left(\frac{E_2}{\hbar}\right) t\right). \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда частота перехода между энергетическими уровнями определяется выражением:

$$\omega_0 = \frac{E_2 - E_1}{2\pi\hbar}, \quad (3)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка;  $E$  – электрическое поле, определяемое выражением:



$$E = E_0 \sin(\omega t). \quad (4)$$

Введем в рассмотрение принцип добротности резонатора для разных мод. Фактически такой принцип позволит оценить роль каждой из мод и, одновременно с этим, установить оценку эффективности рабочих процессов квантового генератора. Очевидно, что различные моды в резонаторе будут иметь уникальные показатели затухания. Воспользуемся этим физически аргументированным понятием и констатируем, что реальная полупроводниковая структура квантового генератора обладает базовым значением частоты излучения, которая полностью определяется атомарной конструкцией материала полупроводников. Добротность моды будем определять из выражения:

$$Q = 2\pi \frac{E_{\text{полная}}}{E_{\text{потерь}}(T)}, \quad (5)$$

где  $E_{\text{полная}}$  – полная энергия, запасенная в резонаторе;  $E_{\text{потерь}}(T)$  – энергия, теряемая за период. Из этого выражения следует, что изменение энергии  $E_{\omega}$ , запасенной в моде частотой  $\omega$  за время  $dt$ , определяется выражением:

$$dE_{\omega}(t) = -E_{\omega} \frac{\omega}{Q} dt. \quad (6)$$

В таком случае констатируем, что запасенная в резонаторе энергия со временем будет уменьшаться по экспоненциальному закону:

$$E_{\omega}(t) = E_{\omega}(0) \exp\left(-\left(\frac{\omega}{Qt}\right)\right). \quad (7)$$

Это свидетельствует, что изменение мощности излучения в течение установленного периода наблюдения полностью совпадает с аналогичным режимом работы типичного осциллятора.

Применяя определенный режим управления инжекционными потоками в полупроводнике, можно реализовать дробно-периодический режим излучения, обладающий установленной частотой фотонного потока, формируемой сквозь полупрозрачную торцевую поверхность кристалла.

Полагаем, что добротность обратно пропорциональна скорости затухания собственных колебаний в системе. То есть, чем выше добротность колебательной системы, тем меньше потери энергии за каждый период и тем медленнее затухают колебания. В таком случае значение добротности максимальны при 1. В этом случае минимальны потери и, как следствие для резонатора лазера, отсутствие излучения наружу. Это соответствует физическому пониманию процесса излучения на полупроводниковой структуре. Наличие значений добротности меньше единицы соответствует случаю, так называемых, полезных частичных потерь фотонного потока. Это случай обнаружения фотонного потока снаружи полупроводниковой структуры, что и характеризует процесс лазерного излучения.

Принимая указанные суждения, оценим величину параметра  $\varepsilon$ , характеризующего, на сколько процентов отличается частота  $\omega$  затухающих колебаний резонатора, созданного на полупроводниках разной проводимости, от частоты  $\omega_0$  собственных колебаний резонатора. Фактически такой показатель характеризует величину потерь от общего фотонного потока и тождественен потоку фотонов, составляющих излучение лазера.

В методологическом отношении используем типовой метод решения. В таком случае добротность колебательного контура определим выражением:

$$Q = \frac{\pi}{\delta}, \quad (8)$$

где  $\delta$  – логарифмический декремент затухания, определяемый по выражению:  $\delta = \beta T$ . При условии, что величина  $\beta$  фиксирована, значение  $\delta$  прямо пропорциональна периоду колебаний  $T$ . Применение на практике логарифмического декремента затухания  $\delta$  продиктовано простотой расчета реального значения. Если известны два значения амплитудных колебаний, с интервалом в один период, то можно определить коэффициент затухания  $\beta$ :

$$Q = \frac{\pi}{\beta T} - \frac{\pi\omega}{2\pi\beta} = \frac{\omega}{2\beta} \Rightarrow \beta = \frac{1}{2Q}. \quad (9)$$

Рассчитаем значение частоты  $\omega^2$ :

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2. \quad (10)$$

Разделим две части равенства на  $\omega^2$ :

$$\frac{\omega^2}{\omega^2} = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} - \frac{\beta^2}{\omega^2} \Rightarrow \frac{\omega_0^2}{\omega^2} = 1 + \frac{\beta^2}{\omega^2}. \quad (11)$$

И далее:

$$\frac{\omega_0^2}{\omega^2} = 1 + \frac{1}{4Q^2} = \frac{4Q^2 + 1}{4Q^2}. \quad (12)$$

Преобразуем это выражение к виду:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{2Q}{\sqrt{4Q^2 + 1}} = \varepsilon, \quad (13)$$

где  $\varepsilon$  – искомый параметр, позволяющий оценить эффективность работы квантового генератора (полупроводникового лазера). Это полезные потери фотонного потока, который с учетом конструктивных особенностей резонатора способен проникнуть во внешнюю среду.

Построение математической модели рабочих процессов лазера на полупроводниковой структуре, созданной как минимум из двух разных полупроводниковых материалов, проведем по функциональному выражению развертки событий посредством уравнения эпициклоиды, где  $t = [0, 2\pi]$ :

$$\begin{aligned} X(t) &= (R + r)\cos(t) - r\cos\left(\frac{R+r}{r}t\right), \\ Y(t) &= (R + r)\sin(t) - r\sin\left(\frac{R+r}{r}t\right). \end{aligned} \quad (14)$$

Полагаем, что физические основы полупроводниковой конструкции квантового генератора требуют наличия двух поверхностей, обладающих разной квантовой характеристикой проводимости. Образование контактного слоя на основе таких материалов создает условия инжекции «электрон – дырка» носителей заряда, рекомбинирующих в *p-n*-переходе и инициализирующих образование фотонного потока.

В уравнении эпициклоиды это условие реализуется парой параметров: *R* и *r*. Физическая интерпретация параметров такова, что позволяет установить размер запрещенной зоны  $E_g$ , а также оценить добротность полупроводниковой конструкции *Q* и вычислить показатель эффективности  $\epsilon$  в рабочих режимах конструкции лазера.

В терминах обсуждаемой модели это справедливые и достаточные условия. Действительно, в случае идентичных полупроводниковых материалов, в физическом отношении, не образуется *p-n*-переход, а, следовательно, отсутствует эффект излучения, а уравнение эпициклоиды реализуется при условии, что  $R = r$ . Следуя этим представлениям, полагаем:  $Q = r/R$ . Ширину запрещенной зоны  $E_g$  определим по выражению:

$$E_g = \left( \frac{\sqrt{(x_0 - x_{2\pi})^2 + (y_0 - y_{2\pi})^2}}{R - r} \right), \quad (15)$$

где  $x_0, x_{2\pi}$  и  $y_0, y_{2\pi}$  – начальные и конечные значения функции (14), представленные на интервале  $2\pi$  развертки событий в модели.

Отождествляя *R* с количеством нейтронов обобщенной полупроводниковой структуры и *r* с количеством протонов, проведем расчеты. Создадим фрактальные портреты полупроводниковых структур, представленных в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Атомарные конструкции лазера

№	Атомарный состав п/проводника	Масса (а.е.м)	Количество нейтронов	Количество протонов
1.	ZnO	82	44	38
2.	ZnS	99	53	46
3.	ZnSe	145	81	64
4.	CdSe	192	110	82
5.	CdTe	241	100	141
6.	CdS	146	82	64
7.	GaAs	144	80	64
8.	GaP	100	54	46
9.	GaN	83	45	38
10.	InN	127	71	56

Моделируя сложный диффузионный процесс на границе раздела полупроводниковых структур, используем классические определения массы химических элементов и изотопного состава. Для конструкции полупроводникового лазера создаем полный численный показатель массы, а протонную и нейтронную составляющие указываем отдельно

[2]. Выделение «протон – нейтрон» пары создает идентификатор конструкции, который в физическом отношении характеризует особенности организации и поддержки фотонных потоков в полупроводниковом лазере, где инициализируются запрещенная зона, зона проводимости и валентная зона. Проведем необходимые расчеты параметров: «добротность», «количество мод», «ширина запрещенной зоны», также укажем справочные данные [3] (таблица 2). Коэффициент корреляции расчетных и справочных данных оказался равен  $\eta = 0,745071$ .

ТАБЛИЦА 2. Расчетные показатели и справочные данные атомарных конструкций лазеров

№	Атомарный состав	Добротность	Количество мод, $\epsilon$ (%)	Ширина запрещенной зоны $E_g$ , эВ	
				Расчетные показатели	Справочные данные
1.	ZnO	0,86	13,46	6,03	3,37
2.	ZnS	0,87	13,35	6,05	3,50
3.	ZnSe	0,79	15,5	5,58	2,7
4.	CdSe	0,75	16,95	5,15	1,74
5.	CdTe	0,71	18,27	4,68	1,45
6.	CdS	0,78	15,8	5,5	2,42
7.	GaAs	0,8	15,2	5,66	1,43
8.	GaP	0,85	13,76	5,98	2,25
9.	GaN	0,84	13,95	5,94	3,25
10.	InN	0,79	15,54	5,57	2,6

Избранный перечень атомарных конструкций является типичным и обладает простыми, хорошо интерпретируемыми показателями, в частности, показателем запрещенной зоны, на основе которого классифицируются различные материалы в электротехнике. Малые значения запрещенной зоны отождествляют с металлами, средние значения – с полупроводниками, а высокие значения относят к категории диэлектриков. Можно показать, что этот тезис соответствует модели. Другими словами, при абсолютной идентичности полупроводников, лишь формально образующих контактный слой, получаем типичные значения  $E_g$ , близкие к нулю. В теоретическом отношении это свидетельствует о возможности сочетания двух идентичных материалов без зоны перехода, а фактически – с единой кристаллической структурой. Принимая это суждение, декларируем адекватность математической модели, физическому процессу воспроизведения запрещенной зоны.

Относительно несложный анализ данных таблицы 2 наглядно показывает абсолютное присутствие полупроводников. Сопоставляя расчетные значения запрещенной зоны полупроводника со справочными данными [3], убеждаемся в наличии общих тенденций, которые в терминах модели требуют уточнения. Обнаружение общего принципа построения вариативного ряда, исключительно по результатам

расчетов в модели, может свидетельствовать об определенной адекватности реальных и моделируемых процессов. Подмечая этот феномен, представим подборку из нескольких фрактальных образов

атомарных конструкций полупроводников, составляющих основу конструкции лазера (рисунок 4), где по оси абсцисс – позитронная компонента, а по оси ординат – нейтронная компонента.

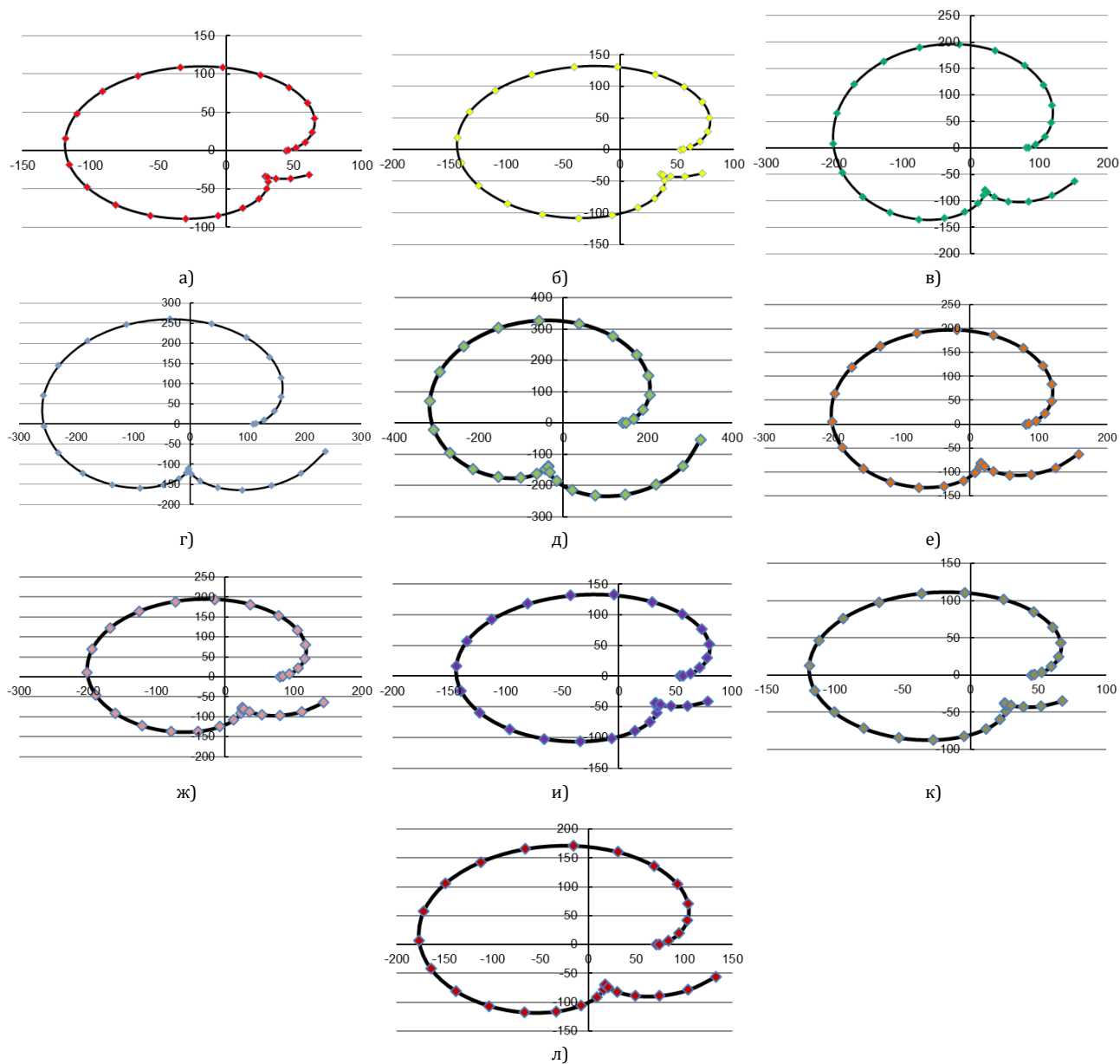


Рис. 4. Фрактальный образ атомарной конструкции лазера на полупроводниках: а)  $\text{SnO} / 44-38/$ ; б)  $\text{SnS} / 53-46/$ ; в)  $\text{ZnSe} / 81-64/$ ; г)  $\text{CdSe} / 110-82/$ ; д)  $\text{CdTe} / 141-100/$ ; е)  $\text{CdS} / 82-64/$ ; ж)  $\text{GaAs} / 80-64/$ ; и)  $\text{GaP} / 54-46/$ ; к)  $\text{GaN} / 45-38/$ ; л)  $\text{InN} / 71-56/$

Отмечая подобие фрактальных образов, трудно увидеть и отличия, которые проявляются на завершающем этапе реализации потока событий. Завершающие элементы трека событий фрактального образа характеризуются разной продолжительностью и отличаются в точках пресечения с координатными осями. Представленные фрактальные образы реализованы по уравнению эпициклоиды, составляющей основу информационной модели развертки событий в полупроводниковой структуре, созданной минимум из двух разнопроводящих материалов. Принимая во внимание, в том числе и физический аспект создания

полупроводниковой конструкции лазера на исключительно чистом химическом материале, декларируется необходимость учета «позитрон – нейтрон» пары, выраженной не в массовой, а количественной оценке.

По существу, такое условие позволяет достаточно полно установить особенности реализации рабочих режимов инжекции, и, одновременно с этим, создать графический образ, который при необходимости можно тиражировать благодаря функциональной особенности выбранного математического выражения.

Использование устойчивые во времени атомарные конструкции, где количество протонов и нейтронов соотносится с большим временем жизни кристалла, указывает на возможность априорного вычисления по модели адекватных оценок запрещенной зоны [2].

Примененный метод построения математической модели развертки событий в полупроводниковой структуре, на примере лазерной конструк-

ции позволяет значительно сократить объем вычислений в рамках квантовой механики, что сокращает время получения конечного суждения. Также в рамках предложенного подхода оказывается возможным значительно расширить набор других полупроводниковых материалов, что в полной мере отвечает современным тенденциям конструирования гетерогенных полупроводниковых структур.

#### Список используемых источников

1. Планк М. Введение в теоретическую физику. Оптика. М: КомКнига, 2010. 160 с.
2. Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. Квантовая физика: учебное пособие. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 527 с.
3. Макаров Л.М., Поздняков А.В., Протасеня С.В. Эргодическая модель атомарных конструкций // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 3. С. 74–84. DOI:10.31854/1813-324X-2018-4-3-74-84
4. Демтредер В. Современная лазерная спектроскопия: учебное пособие. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2014. 1072 с.
5. Пихтин Н.А. Слипченко С.О., Соколова З.Н., Тарасов И.С. Внутренние оптические потери в полупроводниковых лазерах // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. №. 3. С. 374–381.
6. Басов Н.Г. Прохоров А.М. Молекулярный генератор и усилитель // Успехи физических наук. 1955. Т. 57. № 3. С. 485–501.

\* \* \*

## THE FRACTAL SIMULATION IMAGE OF THE QUANTUM GENERATOR

L. Makarov<sup>1</sup>, S. Protasenya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

#### Article info

Article in Russian

**For citation:** Makarov L., Protasenya S. The Fractal Simulation Image of the Quantum Generator. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(1):116–123. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-1-116-123>

**Abstract:** Development and creation of semiconductor devices updates a problem of the preliminary modeling allowing lowering substantially costs of carrying out scientific and technological research. In the presented material of work information approach on creation of fractal model of the semiconductor structure taking into account atomic designs of chemical elements providing a possibility of a priori research and calculation of standard indicators of working processes of the semiconductor is considered. The methodological basis of process of modeling of semiconductors is represented a basis for development of heterogeneous designs.

**Keywords:** quantum generator, semiconductor structure, mathematical model.

#### References

1. Planck M. *Vvedenie v teoreticheskuiu fiziku. Optika*. [Introduction to theoretical physics. Optics]. Moscow: Komkniga Publ.; 2010. 160 p. (in Russ.)
2. Martinson L.K., Smirnov E.V. *Kvantovaya fizika: uchebnoe posobie* [Quantum Physics. A Tutorial]. Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2012. 497 p. (in Russ.)
3. Makarov L., Pozdnyakov A., Protasenya S. Ergodic Model of Atomic Designs. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2018;4(3):74–84. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2018-4-3-74-84>
4. Demtredere V. *Sovremennaya lazernaya spektroskopiya: uchebnoe posobie* [Modern Laser Spectroscopy. A Tutorial]. Dolgoprudnyi: Intellekt Publ.; 2014. 1072 p. (in Russ.)
5. Pikhitin N.A., Slipchenko S.O., Sokolova Z.N., Tarasov I.S. Internal optical loss in semiconductor lasers. *Semiconductors*. 2004;38(3):360–367. Available from: <https://doi.org/10.1134/1.1682615>
6. Basov N.G., Prokhorov A.M. Molekuliarnyi generator i usilitel [The molecular oscillator and amplifier]. *Physics-Uspeski*. 1955;57(3):485–501. (in Russ.)