



## НАНОЛАЗЕРЫ

Мирзаева Умидахон Муроджон кизи<sup>1</sup>,

Андижанский госуниверситет,  
Узбекистан (магистрант)<sup>1</sup>,

Матбобоева Саида Дилмурод кизи<sup>2</sup>,

Андижанский госуниверситет,  
Узбекистан (докторант)<sup>2</sup>,

Носиров Мурод Зокирович<sup>3</sup>

Андижанский госуниверситет,  
Узбекистан (преподаватель)<sup>3</sup>.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7269600>

### ARTICLE INFO

Received: 11st October 2022

Accepted: 20th October 2022

Online: 31st October 2022

### KEY WORDS

Нанолазер, электрон,  
потенциальная среда,  
уравнение Шредингера,  
волновая функция.

Нанолазеры представляют собой полупроводниковые наногетероструктуры размером порядка  $\sim 10^{-9}$  м. Гетероструктура представляет собой монокристалл из материала с двумя химическими составами: на полупроводник нанесен слой йода таким образом, что на границе между разными материалами вообще нет дефекта. Развитие полупроводниковых лазеров связано с квантовыми эффектами в тонких пленках. Поле потенциальных носителей заряда в узкозонном слое было густым. Если слой сделать еще тоньше, электрон в такой пленке будет интерференцировать с другими электронами как свет. Новые физические свойства нанолазеров позволяют записывать очень большие объемы данных на компакт-диски [6, 7]. Американские ученые под руководством Ч.Либеры создали очень маленький минилазер с одной трубкой

### ABSTRACT

*В статье представлена информация о создании, типах, принципе действия и применении нанолазеров. Также обсуждаются решение уравнения Шредингера для квантовых ям в виде одномерного потенциала и уровней энергии электрона.*

из полупроводникового материала на основе сульфида кадмия, который можно использовать в полупроводниковых микросхемах. Эти нанотрубки в будущем будут использоваться в информационных технологиях, позволяя делать компьютеры очень компактными и очень быстрыми. Из-за больших размеров обычных лазеров их нельзя использовать в полупроводниковых чипах, но переход на наноразмеры позволяет решить эту проблему. Нескольким группам ученых удалось создать нанолазеры, но для их включения и выключения требуется оптический импульс с использованием других лазеров, а также электричества [8, 9].

Электрический ток используется в лазере из нановолокон сульфида кадмия, смонтированных на кремниевой основе, созданном группой Ч.Либеры. Здесь электрический контакт



осуществляется с поверхностью нановолокна через слой металлического проводника. Если на этот контакт подать напряжение, то через структуру потечет ток и концы нановолокон будут излучать синеголубой свет 490 нм. Когда ток достигает определенного значения, излучение становится чрезвычайно монохроматичным, что указывает на то, что излучение является лазерным. Используя другие полупроводниковые материалы, такие как нитрид галлия и фосфид индия, можно получить лазеры, перекрывающие весь спектр от ультрафиолетового до инфракрасного.

## **Теория**

Нанолазер был создан из изогнутой нити, диаметр которой меньше длины волны лазерного излучения. Эта инновация, предложенная китайскими учеными, имеет уникальное простое решение: этот «нанолазер» состоит всего из одной нити и одного регулируемого режима. Эта особенность имеет большое практическое значение. Нанолазер состоит из светоизлучающего резонатора, который соответствует частотным и пространственным характеристикам падающего на него света. Лазеры обычно состоят из нескольких мод. Одномодовые лазеры используются в критически важных областях, таких как дальняя связь и лазерная сварка, не тратя лишнюю энергию на другие режимы [1, 8].

Частота излучения нанолазера находится на верхнем пределе видимого спектра — 738 нм. Диаметр нити всего 200 нм, а длина 50-75 мкм. Для того, чтобы лазер запустился, он стимулируется другим лазером

определенной частоты. Изменяя размер пары колец в струне, можно изменить частоту лазера. Нынешние дисплеи сделаны на гибких подложках и изображение можно рассматривать под любым углом, но срок их службы очень короткий. Если органические материалы заменить неорганическими, срок службы мониторов можно значительно продлить. Южнокорейские ученые первыми добились этого. Они создали дисплей со всеми цветами на основе «квантовых точек». Квантовые точки — это полупроводниковые нанокристаллы, которые дают разные цвета в зависимости от их размера. Созданный ими четырехдюймовый дисплей был не очень ярким, но создавался как образец. Как увеличить свет?

Этот вопрос совместно решали ученые институтов автоматизации и электротехники и неорганической химии РАН. Они присоединили цветные металлы к наночастицам в квантовом состоянии. Эта система работает как нанолазер. Здесь в качестве активной среды выступают квантовые точки, а в роли резонатора - металлическая наночастица. Наночастицы производят поверхностные волны - плазмоны. Причиной этого являются коллективные колебания электронов проводимости относительно ионов. Квантовые точки действуют как доноры энергии для плазмонных колебаний. Форма электромагнитных колебаний, возникающих в нанолазере, соответствует резонансной длине волны плазмонов. Резонансная длина волны определяется типом металла и формой наночастицы, то есть при взятии разных металлов получаются



лазеры разного цвета: серебро - синий, золото - синий, медь – красный [2, 9].

На данный момент ученые подготовили нанолазер, состоящий из 10-нанометровых наночастиц золота, окруженных 6-нанометровой кремниевой оболочкой и заполненных красителем. В данном случае нанолазеры помещались в тонкую твердую пленку, называемую «фотонный кристалл», что позволяет кристаллу снизить порог лазерной генерации и направить лазерный луч в одном направлении. Такие нанолазерные мониторы имеют множество преимуществ перед другими мониторами с точки зрения надежности и срока службы, четкости и качества изображения. На этом возможности нанолазеров не заканчиваются. Уникальной особенностью этого нанолазера является то, что его размер меньше длины волны излучающего лазера. Его размер порядка размеров вирусов, что позволяет сделать шаг вперед в биомедицине. Эти нанолазеры позволяют изучать отдельные клетки и даже молекулы.

Нанолазеры помогают создать новое поколение нанoeлектроники, где лазеры заменяют электрический ток. Кроме того, обсуждается использование нанолазеров для создания метаматериалов. С их помощью можно добиться эффекта «невидимости». Когда фотон света проходит через кристалл, препятствия нет, и объект невидим!

### Результаты и обсуждение

Ультратонкие нанометровые слои полупроводников используются в современной оптоэлектронике. В этих структурах формируются

потенциальные ямы для электронов. Если ширина этих ям порядка длины волны де Бройля, энергетические уровни электронов в них начинают квантоваться. Такие гетеропереходы стали основой для создания сверхбыстрых транзисторов. Наиболее широко используемая двумерная полупроводниковая структура состоит из наноразмерной пленки GaAs, окруженной с обеих сторон  $Al_xGa_{1-x}As$ . При этом появляется потенциальная яма высотой 0,2 эВ для электронов и 0,4 эВ для дырок. Поскольку в направлении, перпендикулярном яме, имеется препятствие, носители заряда не могут двигаться в этом направлении, а в других направлениях они свободны и движение не ограничено [3, 7].

В системах, ограниченных в одном направлении волновая функция и энергетические уровни электрона определяется выражениями

$$\Psi_n(z) = (2/a)^{1/2} \sin \frac{\pi n z}{a} \quad (1)$$

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* a^2} n^2 \quad (2)$$

где  $m^*$  — эффективная масса электрона,  $a$  — ширина потенциальной ямы. Из этих выражений вытекает несколько важных характеристик. Во-первых, квантовые эффекты возникают при малых значениях величин  $m^*$ ,  $a$ . В рассматриваемых наноструктурах (GaAs)  $m^* = 0,067m_0$  ( $m_0$  — масса свободного электрона). Другими словами, квантовые эффекты наблюдаются в системах с высокой подвижностью. Кроме того, эффекты квантового масштаба хорошо наблюдаются при низких температурах,



когда средняя тепловая энергия носителей заряда порядка  $kT$  [4, 10].

Полную волновую функцию электрона можно представить как произведение волновых функций во всех направлениях

$$\Psi = \Psi_x \Psi_y \Psi_z \quad (3)$$

где  $\Psi_x$ ,  $\Psi_y$  — решения уравнения Шредингера для свободного электрона в направлениях  $x$  и  $y$ , т. е. плоские волны, а  $\Psi_z$  — решение уравнения Шредингера для прямоугольного потенциального поля. С учетом сказанного полная энергия электрона можно записать как

$$E(k_x, k_y, k_z) = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2) + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* a^2} n^2 \quad (4)$$

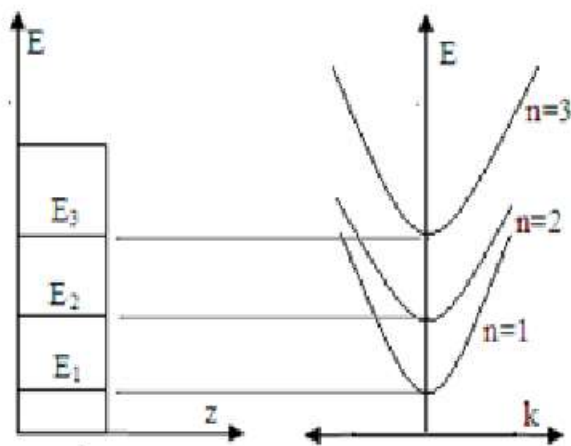


Рис. 1. Энергия электрона в потенциальной яме

На рис. 1 показаны дискретные значения энергии электрона в направлении  $z$  и зависимость  $E(k)$ . Зоны определяются для каждого дискретного значения  $E$ . Важно, что минимальная энергия электронов отлична от нуля. Это противоречит законам классической механики, но соответствует законам квантовой механики.  $E = E_1$  называется нулевой энергией рассматриваемой системы. Из

физики твердого тела известно, что многие физические характеристики веществ зависят от энергетического спектра и вида функции плотности состояния. Известно, что в трехмерной системе эта функция имеет форму параболы. В двух измерениях ситуация меняется. Как и в трехмерном случае, в двумерном случае величины  $k_y$ ,  $k_z$  имеют допустимые значения с периодом  $2\pi/L$ . Количество состояний внутри кольца, ограниченного  $k$  и  $k+dk$  равно

$$n_{2D}(k)dk = 2\pi k dk / (2\pi/L)^2,$$

и количество состояний на единицу поверхности

$$n_{2D}(k) = k/2\pi \quad (5)$$

Для расчета функции плотности состояний по энергиям в зоне необходимо вычислить функцию  $n_{2D}(E)$ , где величина  $n_{2D}(E)\delta E$  равна числу состояний в диапазоне  $\delta E$ . Плотность состояний и волновые векторы связаны соотношением

$$n_{2D}(E)\delta E = n_{2D}(k)\delta k \quad (6)$$

где  $E = \hbar^2 k^2 / 2m^*$ . Из выражений (5) и (6) можно получить

$$n_{2D}(E) = m^* / \pi \hbar^2 \quad (7)$$

Стоит отметить, что функция плотности состояний для двумерной точки постоянна и не зависит от энергии, а полная функция плотности состояний состоит из ступенек одинаковой высоты. Из рис. 1 видно, что электроны могут находиться в зоне  $n = 1$  в диапазоне энергий  $E_1 < E < E_2$ . Как видно из выражения (7), функция плотности состояний равна  $m^* / \pi \hbar^2$ . В диапазоне энергий  $E_2 < E < E_3$  электроны могут одновременно находиться в двух зонах, а функция плотности состояний удваивается, т. е.  $2m^* / \pi \hbar^2$  и т. д. Ступенчатый характер функции  $n_{2D}(E)$



подтверждается измерениями оптического поглощения.

В реальных материалах высота потенциального барьера конечна. Но для практических целей используются решения, полученные для потенциального барьера бесконечной высоты, в котором не учитываются электроны с очень глубокими энергетическими уровнями.

Волновая функция связанных состояний внутри ямы подобна волновой функции бесконечной петли, т. е. представлена косинусами или синусами и сохраняет симметрию или асимметрию. Из квантовой механики известно, что решение вне барьера убывает экспоненциально.

Предполагается, что эффективная масса электрона внутри и снаружи барьера одинакова, поскольку физические характеристики барьера и материала барьера (GaAs и AlGaAs) близки друг к другу. Также для низких случаев вероятность входа в барьер очень мала. На границе барьера волновые функции внутри и вне барьера и их производные должны быть равны. Из этих условий выводится трансцендентное уравнение,

которое легко решается численными методами. В слабосвязанных случаях коэффициент экстинкции очень мал, что позволяет волновой функции проникать глубоко в барьер. В случаях сильной связи коэффициент экстинкции велик и препятствует проникновению волновой функции вглубь барьера.

### **Заключение**

Таким образом, свойства создаваемых сегодня нанолазеров описываются решением уравнения Шрёдингера для движения электрона в потенциальной яме, а лазерные технологии используются в промышленной и бытовой электронике для обработки новых и традиционных материалов, изготовления 3D-структур, создания ультрасовременных материалов, сверхбольших ИС, при разработке и производстве трехмерных (многослойных) изделий, создании интеллектуальных систем, производстве МЭМС-устройств на основе тонких пленок, производстве сверхлегких и гибких компонентов, мембран, панели и т.д., а также при решении ряда задач.

### **References:**

1. Федоров М.В. “Электрон в сильном световом поле” — М: Наука, 1991.
2. Маршал Т. “Лазеры на свободных электронах” пер. С англ. — М: Мир, 1987
3. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1988.
4. Звельто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990.
5. Тарасов Л.В. Физические основы квантовой электроники. М.: Советское радио, 1976.
6. Frost T. One to One new MMI Poll: what is the future for CD? // One to One. – 2002. – № 1. – R. 31-32.
7. Petrov V.V., Shanoylo S.M., Kryuchin A.A., Kozheshcurt V.I., Tokar A.P., Zymenko V.I. Optical immersion as a new way to increase information recording density // Proc. SPIE. – 1991. – Vol. 1831. – P. 2-11.
8. Guo F., Schlesinger T.E., Stancil D.D. Optical field study of near-field optical recording with a solid immersion lens // Appl. Optics. – 2000. – Vol. 39, № 1. – R. 324-331.



9. Зайнобидинов С., Носиров М., Каримов И., Позилова С. Лазеры нового типа, мат.межд.конф."Физика конденсированных сред", Наманган, 2016, с.185.
10. Носиров М., Мадумарова Л., Эралиев А. Движение частицы в потенциальном поле, авторское свидетельство на программный продукт DGU 04957, 2017.