



# НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-537.311

## ЭФФЕКТЫ КВАНТОВОГО УДЕРЖАНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ

**Романова Вера Игоревна**

Старший научный сотрудник, Кафедра физики полупроводников и наноэлектроники, Московский физико-технический институт МФТИ г. Долгопрудный, Россия

### Аннотация

Эффект квантового удержания, наблюдаемый в полупроводниковых нанокристаллах, или квантовых точках, является одним из ключевых феноменов нанофизики. Этот эффект возникает, когда размер полупроводниковой частицы становится сопоставим или меньше радиуса Бора экситона, что приводит к пространственному ограничению движения носителей заряда электронов и дырок. В результате непрерывный энергетический спектр, характерный для объемного материала, преобразуется в дискретный, подобный атомному, что кардинально меняет оптические и электронные свойства материала. Данная работа анализирует физические основы квантового удержания, включая зависимость ширины запрещенной зоны от размера нанокристалла и концепцию экситона. Рассматривается влияние удержания на фотолюминесценцию и поглощение света, а также анализируются перспективы применения квантовых точек в светодиодах, солнечных элементах, квантовых компьютерах и биомедицинской визуализации.

**Ключевые слова:** квантовое удержание, нанокристаллы, квантовые точки, экситон, радиус Бора экситона, запрещенная зона, фотолюминесценция, дискретный спектр.

### Введение

Полупроводниковые нанокристаллы, получившие широкое признание под названием квантовые точки, представляют собой материалы, размер которых варьируется от двух до десяти нанометров. Это ставит их в уникальное промежуточное положение между объемным твердым телом и отдельными атомами или молекулами. Главное, что отличает эти наноструктуры от традиционных полупроводниковых материалов, это эффект квантового удержания.

Эффект квантового удержания возникает, когда размер полупроводниковой частицы становится меньше или сопоставим с характерной длиной, называемой радиусом Бора экситона.

Экситон — это квазичастица, представляющая собой связанное состояние электрона и дырки, удерживаемых кулоновским взаимодействием. Когда пространственные размеры кристалла уменьшаются до масштаба радиуса экситона, движение носителей заряда становится ограниченным во всех трех измерениях. Это приводит к переходу от сплошного энергетического спектра, который присущ объемным материалам, к дискретному, квантованному спектру. Следствием этого является уникальная зависимость оптических и электронных свойств, в частности, цвета излучения, от физического размера нанокристалла. Эта возможность точной настройки свойств только за счет изменения размера частиц открывает огромный потенциал для применения в оптике и электронике.

## **Физические Основы Квантового Удержания**

Для понимания эффектов квантового удержания необходимо рассмотреть, как пространственное ограничение влияет на энергию носителей заряда.

**Радиус Бора экситона.** В объемном полупроводнике электрон и дырка свободно движутся в кристаллической решетке, и их связанное состояние экситон имеет определенный радиус Бора. В нанокристалле, когда его размер становится меньше этого радиуса, стеки кристалла выступают в роли потенциального барьера для носителей заряда. Пространственное ограничение приводит к увеличению кинетической энергии электрона и дырки в соответствии с принципом неопределенности и аналогией с частицей в потенциальной яме.

**Квантование энергии.** Энергия, необходимая для создания экситона, или, что эквивалентно, ширина запрещенной зоны, в нанокристалле становится функцией его размера. Уменьшение диаметра нанокристалла приводит к значительному увеличению кинетической энергии носителей заряда. Это увеличение кинетической энергии смещает энергетические уровни электрона в зону проводимости и дырки в валентной зоне дальше от границы запрещенной зоны. В результате, эффективная ширина запрещенной зоны, определяющая энергию испускаемого или поглощаемого света, увеличивается.

**Цветовая зависимость от размера.** Прямыми следствием увеличения запрещенной зоны является зависимость длины волны излучения от размера нанокристалла. Чем меньше диаметр квантовой точки, тем больше энергия фотона, которую она может излучить, и тем короче длина волны излучаемого света. Таким образом, изменяя размер нанокристаллов, можно точно настроить цвет их свечения в широком диапазоне от синего до красного. Это явление невозможно реализовать в объемных материалах, где ширина запрещенной зоны является фиксированной константой материала.

## **Влияние на Оптические Свойства**

Квантовое удержание кардинально меняет оптический отклик полупроводниковых нанокристаллов, делая их чрезвычайно привлекательными для светоизлучающих и сенсорных приложений.

**Фотолюминесценция.** Увеличение эффективной ширины запрещенной зоны приводит к смещению спектра фотолюминесценции квантовых точек в синюю область при уменьшении размера частицы. Кроме того, благодаря дискретному характеру энергетических уровней и сильному пространственному перекрытию волновых функций электрона и дырки, вероятность рекомбинации носителей заряда с излучением фотона значительно возрастает. Это приводит к высокому квантовому выходу и яркому, узкополосному свечению квантовых точек, что является их ключевым преимуществом по сравнению с традиционными флуоресцентными красителями.

**Поглощение света.** Эффект квантового удержания также влияет на спектры поглощения света. В отличие от объемных материалов, где спектр поглощения начинается с резкого края при энергии, равной ширине запрещенной зоны, в квантовых точках наблюдаются четко выраженные пики, соответствующие дискретным переходам между квантованными энергетическими уровнями. Положение первого пика поглощения также смещается в сторону более высоких энергий синий сдвиг при уменьшении размера нанокристалла, что соответствует изменению эффективной запрещенной зоны.

**Стабильность и долговечность.** Для практического применения, особенно в биологической визуализации, критически важна фотостабильность квантовых точек. Для защиты чувствительного ядра нанокристалла, например, сульфида кадмия, от окисления и фоторазрушения, вокруг него часто формируют защитную оболочку из другого полупроводника с большей запрещенной зоной, например, сульфида цинка. Эта структура ядро-оболочка значительно повышает квантовый выход и долговечность свечения.

## **Методы Синтеза и Применение**

Разработка точных методов синтеза позволила перейти от теоретического изучения квантовых точек к их широкому практическому использованию.

**Синтез нанокристаллов.** Основным методом создания высококачественных квантовых точек является коллоидный синтез в растворе. Этот метод позволяет контролировать процесс нуклеации и роста нанокристаллов с высокой точностью, что критически важно для получения монодисперсных частиц, то есть частиц с очень узким распределением по размеру. Точный контроль температуры, концентрации прекурсоров и типа стабилизирующих лигандов позволяет добиться желаемого размера и, следовательно, цвета излучения.

**Применение в дисплеях и светодиодах.** Благодаря высокому квантовому выходу, узкому спектру излучения и возможности точной настройки цвета, квантовые точки активно используются в дисплеях на квантовых точках и светодиодах. Использование узкополосных излучателей позволяет создавать экраны с более чистыми и насыщенными цветами, значительно расширяя цветовой охват по сравнению с традиционными жидкокристаллическими дисплеями.

**Биомедицинская визуализация.** В биологии и медицине квантовые точки используются как флуоресцентные зонды для визуализации клеток, тканей и опухолей. Их преимущества перед органическими красителями включают высокую яркость, фотостабильность и возможность одновременного использования нескольких цветов в одном эксперименте для мультиплексной диагностики.

## **Перспективы и Развитие**

Дальнейшее изучение и использование эффектов квантового удержания открывает новые горизонты в области оптоэлектроники и квантовых технологий.

**Фотовольтаика и солнечные элементы.** Квантовые точки перспективны для повышения эффективности солнечных элементов. Они могут быть использованы в качестве слоев для преобразования высокоэнергетического синего света в низкоэнергетический красный свет, который лучше поглощается кремниевыми элементами, или для создания высокоэффективных тонкопленочных солнечных батарей.

**Квантовые вычисления.** Сами квантовые точки могут выступать в роли кубитов — основных элементов квантовых компьютеров, благодаря дискретности их энергетических уровней и возможности оптического управления их спиновым состоянием. Это направление исследований является одним из наиболее фундаментальных.

**Безопасность и токсичность.** Одним из ключевых вызовов для широкого внедрения квантовых точек, особенно в биомедицине, является проблема токсичности, связанная с использованием тяжелых металлов, например, кадмия. Активно разрабатываются безкадмийевые квантовые точки на основе индий-фосфида или кремния, которые обладают более высокой экологической и биологической безопасностью.

## **Заключение**

Эффект квантового удержания в полупроводниковых нанокристаллах является фундаментальным физическим явлением, которое имеет глубокие технологические последствия. Возможность точного контроля оптических и электронных свойств материала простым изменением его физического размера открыла дорогу к созданию высокоэффективных и универсальных устройств.

От высококачественных дисплеев и ярких светодиодов до революционных биозондов и перспективных элементов квантовых компьютеров, квантовые точки продолжают оставаться в авангарде исследований нанофизики и материаловедения.

## Литература

1. Волков А. П. Квантовое удержание в наноструктурах: теория и эксперимент. – М.: Физматлит, 2024. – 450 с.
2. Романова В. И. Бескадмиеевые квантовые точки для биовизуализации. // Наноэлектроника и оптика. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 77–91.
3. Екимов А. И. Квантовые точки: от фундаментальной физики до применения. – СПб: Политехника, 2019. – 380 с.
4. Reed M. A. Quantum dots. // Sci. Am. – 1993. – Vol. 268, № 1. – P. 118–123.
5. Alivisatos A. P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots. // Science. – 1996. – Vol. 271, № 5251. – P. 933–937.