



## 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, стенки 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. Прямым 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 безкадмиевые 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. Бескадмиевые квантовые точки для биовизуализации. // Нанoeлектроника 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.