



## ПОЛУЧЕНИЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СВЕТОДИОДАХ

**Смирнов Владимир Иванович**

Профессор, Кафедра физики твердого тела, Санкт-Петербургский  
государственный университет СПбГУ  
г. Санкт-Петербург, Россия

**Громова Елена Викторовна**

Научный сотрудник, Кафедра нанотехнологий, Санкт-Петербургский  
государственный университет СПбГУ  
г. Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

Квантовые точки представляют собой класс полупроводниковых нанокристаллов, размер которых находится в диапазоне от двух до десяти нанометров. Их уникальные оптические свойства, в частности, узкий спектр излучения и высокая квантовая эффективность, обусловлены эффектом пространственного квантового ограничения. Это делает их идеальными кандидатами для применения в светодиодных технологиях нового поколения. В данной работе представлен детальный обзор ключевых методов синтеза квантовых точек, фокусируясь на коллоидных подходах. Рассматриваются фундаментальные стадии формирования нанокристаллов, принципы контроля размера и формы, а также методы поверхностной пассивации, необходимые для достижения эксплуатационной стабильности. Отдельный раздел посвящен бескадмиевым материалам, таким как фосфид индия, и их интеграции в конструкции высокоэффективных светодиодов.

**Ключевые слова:** квантовые точки, светодиоды, коллоидный синтез, квантовое ограничение, фосфид индия, нанокристаллы, квантовая эффективность.

### Введение

Квантовые точки являются одними из наиболее перспективных материалов в области оптоэлектроники. В отличие от объемных полупроводников, энергетический зазор и, соответственно, длина волны излучения квантовой точки не фиксированы, а зависят от ее физического размера. Это явление называется эффектом пространственного квантового ограничения. Регулируя размер нанокристалла, можно точно настроить цвет его излучения в широком диапазоне видимого спектра. Этот уровень контроля позволяет создавать светодиоды с исключительной чистотой цвета, что крайне важно для высококачественных дисплеев и осветительных приборов.

Традиционные светодиоды на основе органических или объемных полупроводников часто имеют широкий спектр излучения, что приводит к низкому цветовому охвату. Квантовые точки решают эту проблему, предлагая узкополосную люминесценцию и высокую квантовую эффективность, которая достигает значений, близких к ста процентам. Разработка масштабируемых, экономичных и экологически безопасных методов синтеза таких нанокристаллов является ключевой задачей нанотехнологии.

## **Фундаментальные Принципы Синтеза Квантовых Точек**

Синтез высококачественных квантовых точек с узким распределением по размерам требует точного контроля над термодинамическими и кинетическими процессами. Коллоидный синтез, проводимый в растворе, является основным методом получения материалов для светодиодов.

Стадии Нуклеации и Роста. Процесс формирования нанокристаллов описывается классической теорией нуклеации и роста. Сначала происходит нуклеация — быстрое образование большого числа зародышей из прекурсоров при резком пересыщении раствора. На этой стадии закладывается основа для будущего числа частиц. За ней следует стадия роста, когда свободные мономеры из раствора осаждаются на поверхности образовавшихся зародышей. Для получения однородного размера необходимо обеспечить временное разделение этих двух стадий.

Контроль размера и распределения. Ключевым требованием является достижение фокусировки по размерам. Этого добиваются путем точного управления температурой и концентрацией прекурсоров. На стадии роста более крупные частицы имеют меньшую энергию активации для добавления новых мономеров, что приводит к ускоренному росту больших частиц за счет растворения мелких — этот процесс называется Оствальдовским созреванием. Управление кинетикой созревания позволяет сузить распределение размеров, что напрямую ведет к узкой и чистой спектральной полосе излучения.

## **Методы Коллоидного Синтеза**

Методы коллоидного синтеза являются наиболее приспособленными для коммерческого получения квантовых точек с высокими оптическими характеристиками.

Метод Горячей Инъекции. Метод горячей инъекции является наиболее распространенным подходом. Он основан на быстром введении холодных растворов прекурсоров в горячий, высококипящий растворитель, содержащий стабилизирующие лиганды. Резкое повышение температуры инициирует быструю нуклеацию, а последующее медленное снижение температуры обеспечивает контролируемый рост.

Использование высококипящих органических растворителей и пассивирующих агентов, таких как олеиновая кислота, позволяет контролировать скорость роста и стабилизировать поверхность нанокристаллов, предотвращая их агрегацию.

**Преимущества и Проблемы.** Основное преимущество горячей инъекции — возможность получения нанокристаллов с почти идеальной кристалличностью, высокой квантовой эффективностью и чрезвычайно узким распределением по размерам. Однако этот метод исторически был связан с использованием токсичных материалов, таких как соединения кадмия и селена, что вызывает озабоченность с точки зрения экологической безопасности и требований регулирующих органов. Это послужило толчком к разработке альтернативных, более безопасных материалов.

## **Новые Материалы и Бескадмиевые Квантовые Точки**

Поиск замены кадмию является одним из приоритетных направлений в исследованиях квантовых точек для светодиодов.

**Фосфид индия.** Фосфид индия стал наиболее перспективной и безопасной альтернативой. Квантовые точки на основе фосфида индия демонстрируют высокую квантовую эффективность и отличную стабильность. Однако синтез фосфида индия более сложен по сравнению с кадмиевыми аналогами из-за более высокой реакционной способности фосфорных прекурсоров и более сложного контроля нуклеации. Для достижения необходимой стабильности и эффективности часто требуется использование сложных многослойных оболочек.

**Структуры Ядро Оболочка.** Для повышения квантовой эффективности и эксплуатационной стабильности почти всегда используются структуры ядро оболочка. На поверхность ядра нанокристалла осаждается широкий энергетический зазорный материал, такой как сульфид цинка. Эта оболочка выполняет функцию пассивации поверхности, устраняя поверхностные дефекты, которые могут служить центрами безызлучательной рекомбинации. Электрон и дырка эффективно локализуются в ядре, что резко повышает вероятность излучательного перехода. Сложные гетероструктуры, такие как квантовые точки с градиентным легированием или квази-двумерные пластины, позволяют еще точнее настраивать кинетику рекомбинации и стабильность.

## **Поверхностная Модификация и Пассивация**

Оптические свойства квантовых точек чрезвычайно чувствительны к состоянию их поверхности. Поверхностная модификация является критически важным шагом.

**Роль Органических Лигандов.** Органические лиганды, покрывающие поверхность нанокристалла, выполняют двойную функцию. Во-первых, они стабилизируют нанокристаллы в растворе, предотвращая их агрегацию.

Во-вторых, они заполняют оборванные связи на поверхности, которые, если их не устранить, действуют как ловушки для заряда, приводя к безызлучательной рекомбинации и снижению квантовой эффективности. Наиболее распространенные лиганды, такие как олеиновая кислота или амины, должны быть тщательно подобраны для обеспечения максимальной пассивации.

**Обмен Лигандов для Интеграции.** Для внедрения квантовых точек в светодиодные устройства их необходимо перевести из неполярного органического растворителя, используемого при синтезе, в полярный растворитель, совместимый с полимерами или оксидами, используемыми в устройстве. Этот процесс обмена лигандов требует замены длинноцепочечных органических молекул на более короткие или амфифильные лиганды. Успешный обмен лигандов важен, так как он влияет на качество пленок, подвижность заряда и, следовательно, на эффективность готового светодиода.

## **Интеграция в Светодиоды**

Интеграция квантовых точек в светодиоды на основе полимерной матрицы или тонких пленок требует тщательного контроля процесса нанесения.

**Изготовление Устройств.** Светодиоды на основе квантовых точек обычно изготавливаются с использованием растворных методов, таких как центрифугирование или струйная печать. Устройство имеет многослойную архитектуру: инжекционный слой электронов, слой квантовых точек и инжекционный слой дырок, между двумя электродами. Эффективность устройства зависит от точного совмещения энергетических уровней слоев, что обеспечивает эффективную инжекцию и рекомбинацию электронов и дырок в слое квантовых точек.

**Проблемы Транспорта Заряда.** Одним из ключевых инженерных вызовов является обеспечение эффективного транспорта заряда через плотноупакованный слой квантовых точек. Лиганды, необходимые для стабилизации, действуют как изоляторы, затрудняя перемещение заряда между соседними нанокристаллами. Поэтому обмен лигандов на более короткие молекулы или создание гибридных матриц является необходимой мерой для повышения проводимости слоя квантовых точек и увеличения яркости светодиода.

## **Заключение**

Квантовые точки представляют собой технологический прорыв в области освещения и дисплеев, предлагая беспрецедентный контроль над цветом и эффективностью. Прогресс в коллоидном синтезе позволяет получать нанокристаллы высокой чистоты, а переход к бескадмиевым материалам, таким как фосфид индия, открывает путь к их широкому коммерческому применению.

Дальнейшие исследования будут сосредоточены на оптимизации поверхностной химии для улучшения транспорта заряда и на разработке новых методов печати для создания крупноформатных, стабильных и долговечных светодиодных дисплеев на основе квантовых точек.

## **Литература**

1. Смирнов В. И. Эффект квантового ограничения в полупроводниковых нанокристаллах. – СПб: Наука, 2024. – 350 с.
2. Громова Е. В. Синтез и свойства бескадмиевых квантовых точек. // Журнал нанотехнологий. – 2025. – Т. 12, № 3. – С. 55–68.
3. Пушкарев И. А. Оптоэлектроника на основе коллоидных квантовых точек. – М.: Техносфера, 220. – 410 с.
4. Борисов Л. К. Квантовая эффективность люминесценции наноструктур. – М.: Физматлит, 2019. – 280 с.
5. Alivisatos A. P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots. // Science. – 1996. – Vol. 271, № 5251. – P. 933–937.
6. Murray C. B., Norris D. J., Bawendi M. G. Synthesis and characterization of nearly monodisperse