

ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ

Зубенко Владимир

Координатор: Вера МОРОЗОВА, доцент, к.ф.-м.н.

Технический Университет Молдовы

Аннотация: В работе представлено описание квантовых точек как одной из интенсивно развиваемых форм гетероструктур, перечислены причины их проникновения в современную технику. Описаны способы применения устройств на основе квантовых точек в качестве лазеров в системах связи, диодов в гибких дисплеях, в системах мечения и визуализации биологических объектов.

Ключевые слова: квантовые точки, коллоидный раствор, флуоресценция, фотостабильность, лазер, дисплей, флуорофор.

1. Введение

Квантовая точка — это полупроводник, электрические характеристики которого зависят от его размера и формы. Чем меньше размер кристалла, тем больше расстояние между энергетическими уровнями (рис.1). При переходе электрона на энергетический уровень ниже, испускается фотон. Регулируя размер квантовой точки, можно изменять энергию испускаемого фотона, а значит, можно изменять и цвет испускаемого квантовой точкой света.

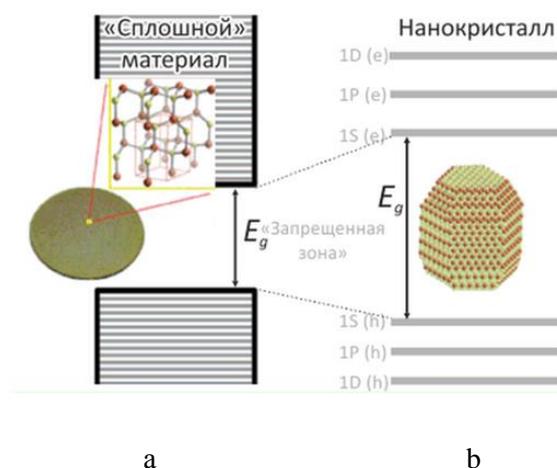


Рисунок 1. а) «Сплошной» полупроводник имеет валентную зону и зону проводимости, разделенные запрещенной зоной E_g . б) Нанокристалл из полупроводника характеризуется дискретными уровнями энергии, подобными уровням энергии одиночного атома.

Особенностью квантовых точек в форме коллоидных нанокристаллов является то, что каждая точка — это изолированный и мобильный объект, находящийся в растворителе. Причиной стремительного проникновения полупроводниковых нанокристаллов в разнообразные области науки и технологии являются их уникальные оптические характеристики:

- 1) узкий симметричный пик флуоресценции (в отличие от органических красителей, для которых характерно наличие длинноволнового «хвоста»), положение которого регулируется выбором размера нанокристалла и его составом (рис.2, слева);
- 2) широкая полоса возбуждения (рис.2, слева), что позволяет возбуждать нанокристаллы разных цветов одним источником излучения. Это достоинство принципиально при создании систем многоцветного кодирования;

- 3) высокая яркость флуоресценции, определяемая высоким значением экстинкции и высоким квантовым выходом (для нанокристаллов CdSe/ZnS — до 90%);
- 4) уникально высокая фотостабильность (рис.2, справа), что позволяет использовать источники возбуждения высокой мощности.

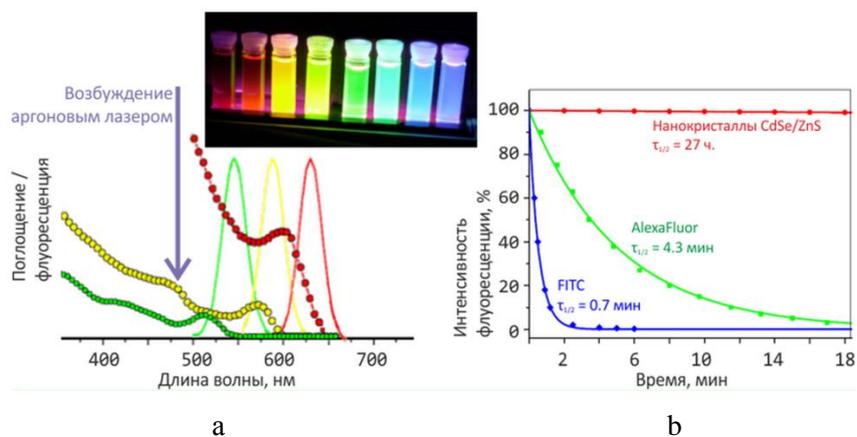


Рисунок 2. а) Зависимость интенсивности излучения КТ от длины волны. б) Сравнение интенсивности излучения во времени КТ с некоторыми органическими красителями.

2. Методы применения квантовых точек

2.1 Лазер на квантовых точках

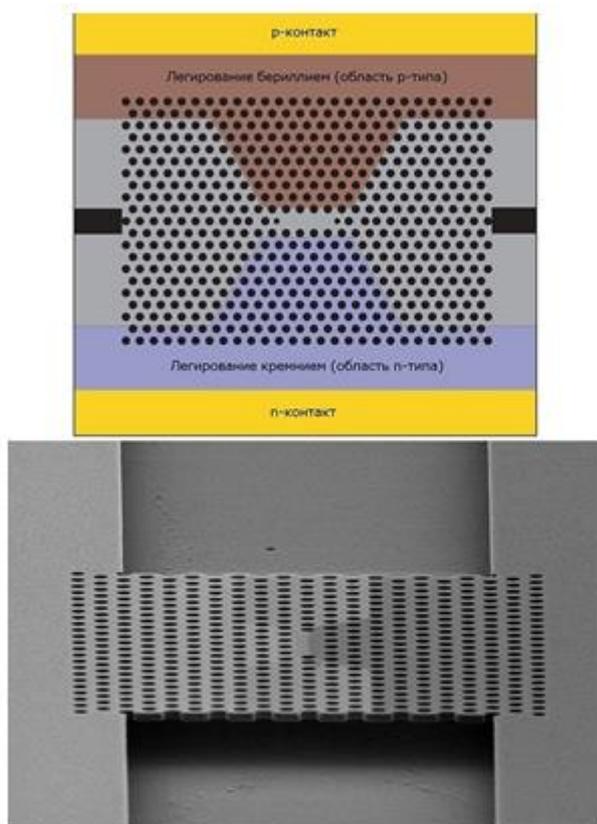


Рис.3. Сверху расположена схема нового лазера, а снизу — микрофотография готового устройства. Область собственной электропроводности в центре пластины сужается, чтобы направить ток в активную область лазера.

Лазер на квантовых точках — полупроводниковый лазер, который использует в качестве активной лазерной среды квантовые точки в их излучающей области. Основой устройства служит выращенная по методу молекулярно-лучевой эпитаксии пластина из арсенида галлия, толщина которой составляет 220 нм (рис.3). В ходе изготовления в её объёме создаются три слоя квантовых точек (фрагментов полупроводника, ограниченных по всем трём пространственным измерениям) из арсенида индия. Затем пластину превращают в фотонный кристалл — структуру с периодически изменяющимся показателем преломления. Чередование показателей задается самым простым способом: в заготовке проделываются круглые отверстия, расположенные в виде упорядоченного массива. Эти отверстия играют роль зеркал,

отражающих фотоны обратно к центральной области пластины.

Достоинствами такого типа конструкции являются способность работать в непрерывном режиме при комнатной температуре и простота объединения с волноводами на оптоэлектронных интегральных схемах. Для того, чтобы решить проблему электрической накачки, ток направляется к активной области лазера с помощью р-і-п-перехода, контакта областей дырочной (р) и электронной (n) проводимости и собственного (нелегированного, і) полупроводника. Для этого в участки пластины, расположенные симметрично относительно центра, методом ионной имплантации вводят ионы бериллия и кремния, создавая области р- и n-типа. Центральную часть пластины оставляют нетронутой. Устройство передачи, скорость работы которого 10 Гбит/с, нечувствительное к колебаниям температуры, разработано с применением этой технологии для работы в оптических линиях связи и оптических сетях.

2.2 Дисплей на квантовых точках

В феврале 2011 года исследователи из Samsung Electronics представили разработки первого полноцветного дисплея на основе квантовых точек — QLED (Quantum Light Emmited Diode). Дисплей управляется активной матрицей, это означает, что каждый цветной пиксель с квантовой точкой может включаться и выключаться тонкопленочным транзистором. Исследователи сделали прототип на гибком пластике (рис.4).

Для создания прототипа на кремниевую плату наносится слой раствора квантовых точек и напыляется растворитель. Затем в слой квантовых точек аккуратно запрессовывается резиновый штамп с гребенчатой поверхностью, отделяется и штампуется на гибкий пластик. Так осуществляется нанесение полосок квантовых точек на подложку.

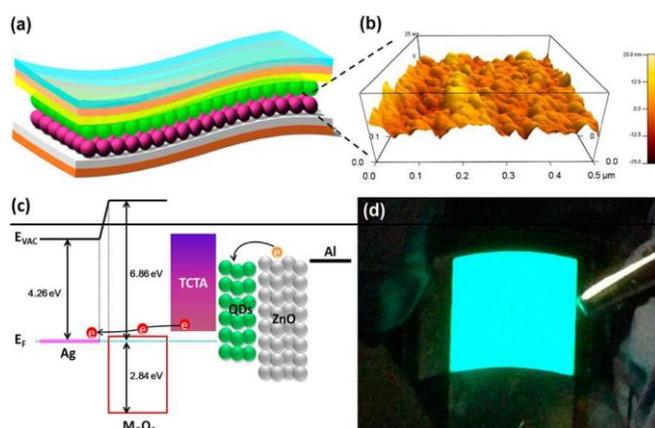


Рисунок 4. а) Слои сверху вниз: полимерная плёнка из каптона/Al/ZnO наночастицы/CdSe-CdS-ZnS квантовые точки/полимер TCTA/MoO₃/Ag); б) AFM-изображение полученной плёнки; в) диаграмма электронных уровней; д) работающий QLED.

Основные проблемы в создании гибких дисплеев: ограниченный круг подходящих материалов и плохая механическая устойчивость к перегибам и скручиванию. Однако, использование полиимида, каптона, позволяет решить часть проблем, оптимизировать процесс и получить на выходе довольно большие дисплеи с рекордной яркостью в области гибких диодов.

Механические свойства полученного устройства настолько хороши, что его можно использовать как стикер, приклеивая и отклеивая по нескольку раз, а также изгибая во всевозможных направлениях (яркость в относительных единицах падает незначительно, не более, чем на 5%). Что касается оптических характеристик, то изготовленные диоды выдержали тест, продемонстрировав максимальную яркость в 20 000 кд/м² при внешней квантовой эффективности в 4%.

2.3 Флуорофоры в медицине и биологии

Уникальные свойства КТ позволяют использовать их практически во всех системах мечения и визуализации биологических объектов, для чего КТ можно вводить в объект непосредственно или с «пришитыми» распознающими молекулами (обычно это антитела или олигонуклеотиды). Нанокристаллы проникают и распределяются по объекту в соответствии со своими свойствами (рис.5, слева). Например, нанокристаллы разных размеров по-разному проникают сквозь биологические мембраны, а поскольку размер определяет цвет флуоресценции, разные области объекта оказываются окрашенными также по-разному. Наличие распознающих молекул на поверхности нанокристаллов позволяет реализовать адресное связывание: нужный объект (например, опухолевый) окрашивается заданным цветом (рис.5, справа).

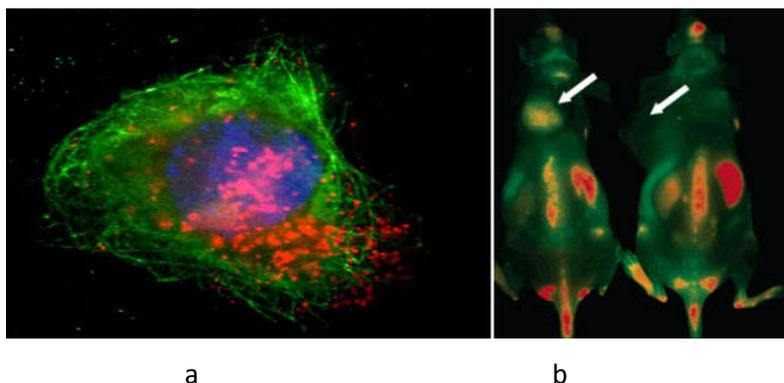


Рисунок 5. а) Изображение распределения квантовых точек на фоне микроструктуры клеточного цитоскелета и ядра фагоцитов человека. б) Накопление нанокристаллов, «сшитых» с пептидом RGD в опухолевой области (стрелка). Правее — контроль, введены нанокристаллы без пептида (CdTe нанокристаллы, 705 нм).

3. Вывод

Резюмируя, я хочу подчеркнуть то, что квантовые точки в форме коллоидных нанокристаллов являются перспективнейшими объектами нано-, бионано- и биомеднанотехнологий. В последние годы наметился резкий подъем: накопление идей и их реализаций определили прорыв в области создания новых устройств и инструментов, основанных на применении полупроводниковых нанокристаллических квантовых точек в электронной технике, технологии использования солнечной энергии, биологии, медицине, и так далее. Конечно на этом пути еще много нерешенных проблем, но растущий интерес, растущее число коллективов, которые работают над этими проблемами, растущее число публикаций, посвященных этому направлению, позволяют надеяться, что квантовые точки станут основой техники и технологий следующего поколения.

4. Литература

1. Олейников В.А. *Квантовые точки в биологии и медицине*. Природа № 3 (2010), с.22;
2. Олейников В.А., Суханова А.В., Набиев И.Р. *Флуоресцентные полупроводниковые нанокристаллы в биологии и медицине. Российские нанотехнологии № 2 (2007)*, 160–173;
3. Sukhanova A., Venteo L., Devy J., Artemyev M., Oleinikov V., Pluot M., Nabiev I. (2002). *Highly Stable Fluorescent Nanocrystals as a Novel Class of Labels for Immunohistochemical Analysis of Paraffin-Embedded Tissue Sections*. Laboratory Investigations 82, 1259–1261.