PACS numbers: **01.65.+g**, **78.55.–m**, **85.60.–q**
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201112k.1341

Прогресс в области источников света и дисплеев

А.Г. Витухновский

Отмечая в этом, 2011-м, году 120 лет со дня рождения выдающегося отечественного оптика Сергея Ивановича Вавилова, необходимо отметить, что его учитель Петр Петрович Лазарев является основателем журнала *Успехи физических наук*. Эта связь накладывает определённые требования к изложению материала о современных источниках света и алфавитно-цифровых дисплеях, представленного ниже.

С.И. Вавилов заложил отечественную школу науки о люминесценции. Помимо существенного вклада в развитие фундаментальных представлений о природе люминесценции, именно благодаря организационному таланту Сергея Ивановича наша страна получила новые источники света — люминесцентные лампы, столь известные каждому. Под руководством С.И. Вавилова его соратники и ученики создали целую отрасль энергетики и внесли значительный вклад в экономию электроэнергии. Созданные при непосредственном участии С.И. Вавилова высокоэффективные люминофоры позволили в кратчайшие сроки наладить в нашей стране выпуск отечественных телевизоров.

Усилия учёных под руководством С.И. Вавилова были отмечены Сталинской (Государственной) премией СССР 1951 г. "За разработку люминесцентных ламп". Следует перечислить всех получивших эту важную награду: С.И. Вавилов (посмертно), В.Л. Левшин, В.А. Фабрикант, М.А. Константинова-Шлезингер, Ф.А. Бутаева, В.И. Долгополов. Сейчас применение люминесцентных ламп, прежде всего основательно модернизированных компактных люминесцентных ламп, является наилучшим решением задач освещения.

Несколько слов об истории ламп. В 1872 г. родилась первая лампа накаливания, что завершило тысячелетние поиски и произвело революцию в технике освещения. Случилось это в России, а первым, кто догадался откачать из стеклянной колбы воздух и поместить туда угольный стержень, накалявшийся под действием тока, был гениальный русский учёный Александр Николаевич Лодыгин. Лампы его конструкции зажглись 20 мая 1873 г. в Санкт-Петербурге. Это были восемь фонарей с лампами Лодыгина. К сожалению, лавры первооткрывателя достались не А.Н. Лодыгину, а выдающемуся американскому изобретателю Томасу Алве Эдисону, который получил соответствующий патент [1]. Эдисон всего лишь соединил проводами в одну схему лампу Лодыгина, электрогенератор, розетку и вилку!

В дальнейшем произошла замена угольного стержня вольфрамовой спиралью. Продолжалась разработка таких источников света, как ртутные, галогенные, натриевые и ксеноновые лампы. Все эти усилия были связаны с несовершенствами ламп накаливания. Лампы накаливания, являясь лучшими для своего времени (на протяжении 70–80 лет), тем не менее обладали рядом очевидных недостатков, прежде всего низкой световой отдачей. В частности, у первых ламп накаливания световая отдача составляла всего 1,5 лм $Вт^{-1}$. Сейчас она увеличилась в 10 раз и составляет 10–15 лм $Вт^{-1}$.

Около 10 лет назад в мир светотехники вошло новое достижение электроники: появился третий (после тепловых и газоразрядных) тип источников света — светодиоды (СД). Сегодня СД уже перестали быть экзотикой и стали полноправными партнёрами ламп накаливания и разрядных ламп. Эффективность источников света на неорганических (полупроводниковых) светоизлучающих диодах достигает 90 лм $Вт^{-1}$ [2] при сравнительно большом сроке эксплуатации.

Следует отметить *преимущества светодиодов*. В светодиоде электрический ток, в отличие от такового в лампе накаливания или люминесцентной лампе, преобразуется непосредственно в световое излучение, а не в тепло, и теоретически это может происходить почти без потерь. Действительно, светодиод (при должном теплоотводе) мало нагревается, что делает его незаменимым для некоторых приложений. Далее, светодиод излучает в узкой части спектра, его цвет чист, что особенно ценят дизайнеры, а ультрафиолетовое и инфракрасное излучения, как правило, отсутствуют. Светодиод механически прочен и исключительно надёжен, срок его службы достигает 100 тыс. часов, почти в 100 раз превышая срок службы лампы накаливания и в 5–10 раз — срок службы люминесцентной лампы. Наконец, светодиод — низковольтный электроприбор, а стало быть безопасный.

Следующим этапом развития следует считать изобретение в 1987 г. *органического* светоизлучающего диода — OLED (Organic Light Emitting Diode) [3, 4], который, обладая низкой энергией потребления, обеспечивает замечательную цветопередачу при низкой цене и эффективности до 100 лм $Вт^{-1}$ с использованием фосфоресцентных органических материалов. Сравнение характеристик источников света проведено в таблице.

Лабораторные образцы OLED-структур в настоящее время демонстрируют характеристики, сравнимые с характеристиками лучших образцов светодиодов мировых лидеров. Однако стоит отметить, что в программе развития светодиодной промышленности, разработанной Министерством энергетики США (US DOE Solid State Lighting Roadmap, July 2011), прописана стратегия, в которой технологии OLED и LED (Light Emitting Diode) рассматриваются не как конкурирующие, а как взаимодополняющие направления. К основным недостаткам LED в первую очередь стоит отнести низкую габаритную яркость и довольно малую гибкость. Именно это даёт OLED преимущество перед LED в системах общего освещения, например офисного.

Мировой уровень развития OLED-технологии перешёл на стадию коммерциализации. Эта технология всё более уверенно занимает лидирующие позиции на рынке, о чём свидетельствует пример дисплейных применений. Учитывая научные и технологические достижения, колоссальные объёмы мирового финансирования, программы развития, принятые на уровне ведущих государств и крупнейших корпораций, не возникает сомнений в успехе OLED-технологии в области освещения.

Обратимся теперь к прогрессу в области алфавитно-цифровых дисплеев (рис. 1). Очевиден прогресс в связи с

А.Г. Витухновский. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ
E-mail: alexei@sci.lebedev.ru

© А.Г. Витухновский 2011

Таблица. Характеристики различных источников света

Категория	Тип	Эффективность, лм Вт$^{-1}$	К.п.д., %
	Свеча	0,3	0,04
	100-ваттная лампа накаливания (220 В)	13,8	2,0
	Люминесцентная линейная лампа	60	9,0
	Белый светодиод	10 – 90	1,5 – 13
	Белый OLED	102	15,0

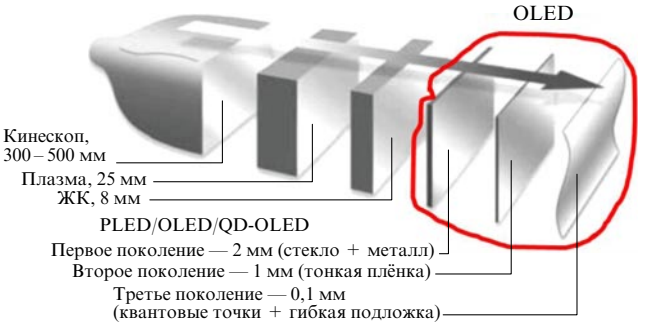

Рис. 1. Прогресс в дисплейной технологии.

переходом от классических дисплеев на основе электронно-лучевых трубок (вспомним громоздкие "Рубины" и мечты о телевизорах "Sony") к изящным плазменным панелям, а затем к современным жидкокристаллическим (ЖК) мониторам, которые не только представляют собой экраны современных телевизоров, ноутбуков, но и используются в бесчисленных так называемых гаджетах (сотовые телефоны, навигаторы и т.д.). Однако прогресс неостановим, и на смену ЖК-дисплеям приходят различные модификации органических светоизлучающих устройств: PLED (Polymer Light Emitting Diode) — на основе проводящих полимеров; OLED — на основе "малых" молекул металлоорганических комплексов; QD-OLED (органическая матрица с внедрёнными в неё полупроводниковыми квантовыми точками (QD)) — с использованием гибких подложек и гибридных материалов.

Аналитики компании "Research and Markets" (Ирландия) уверены, что дисплеи, в которых используется технология органических светоизлучающих диодов (OLED), станут основным "двигателем" отрасли в ближайшее десятилетие. Во всяком случае, такой вывод содержится в подготовленном ими отчёте "Energy Efficient Displays Technologies to 2020 — Organic Light Emitting Diodes (OLED) Displays Set to Propel Growth of the Industry" ("Технологии энергетически эффективных дисплеев до 2020 г. — дисплеи OLED как стимулятор роста промышленности").

Дисплеи OLED обладают огромным рыночным потенциалом — по оценке экспертов, объём их продаж к 2020 г. достигнет 10,6 млрд долларов.

Технология OLED уже несколько лет считается наиболее перспективной с точки зрения развития дисплеев. С 2005 г. по 2009 г. соответствующий рынок рос в среднем на 33,9 % ежегодно, увеличившись от 256 до 822 млн долларов. В ближайшие десять лет сохранится ежегодный рост в 25,5 %, как полагают специалисты "Research and Markets". К настоящему моменту основной областью применения дисплеев OLED остаются мобильные устройства. Дисплеи, используемые в сотовых телефонах (сейчас на этот сегмент приходится 65 % всего объёма в денежном выражении), цифровых камерах, проигрывателях и других подобных устройствах, имеют небольшие размеры. Спрос начнёт увеличиваться, когда OLED-панели большого размера придут в телевизоры, мониторы, персональные компьютеры.

Предполагается, что органические дисплеи вытеснят жидкокристаллические. Поэтому основным фактором, сдерживающим распространение OLED, названо постоянное усовершенствование и удешевление ЖК-дисплеев. Однако аналитики надеются, что нововведения в технологии и переход к массовому выпуску продукции позволят снизить цену дисплеев OLED.

Следует детально остановиться на последнем достижении в области современных дисплеев — технологии QD-OLED. Основным элементом такого рода устройств является коллоидная квантовая точка (нанокристалл) размером 2 – 7 нм. Как правило, используются так называемые квантовые точки ядро – оболочка (core – shell). Примеры квантовых точек, полученных методами коллоидной химии [5], и поведение их энергетических уровней представлены на рис. 2.

На рисунке 2а показаны также квантовая точка CdS без оболочки и распределение электронов и дырок как функция расстояния. Квантовая точка CdSe/CdS (рис. 2б) соответствует наногетероструктуре так называемого типа I, когда электроны и дырки находятся в ядре (core). Иной характер распределения электронов и дырок имеет квантовая точка CdTe/CdSe (рис. 2в). Эта наногетероструктура относится к типу II, и в ней электрон преимущественно находится в оболочке, в то время как дырка располагается в ядре наночастицы. (О классификации гетероструктур см., например, [6].)

Помещая квантовые точки между двумя слоями органических проводников n- и p-типа и прикладывая напряжение на внешние электроды, можно возбудить квантовые точки и в итоге получить электронно-дырочную излучательную рекомбинацию [7]. Простейшая схема QD-OLED приведена на рис. 3.

Очевидным преимуществом использования такой гибридной схемы являются возможность перестройки длины волны излучения, которая определяется только размером наночастицы, а также её стабильность (долговечность, достигаемая за счёт использования в качестве эмиттера неорганического материала) и дешевизна синтеза коллоидных наночастиц. Немаловажным факто-

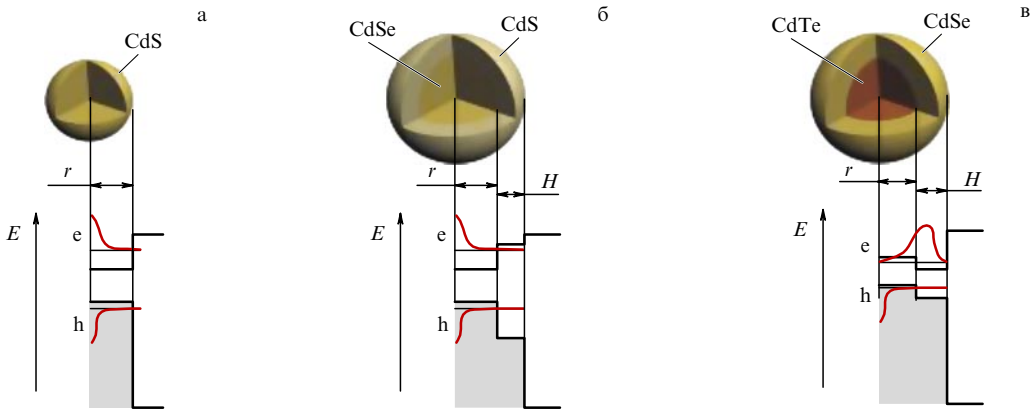

Рис. 2. Структура энергетических уровней наиболее популярных коллоидных квантовых точек халькогенидов кадмия.

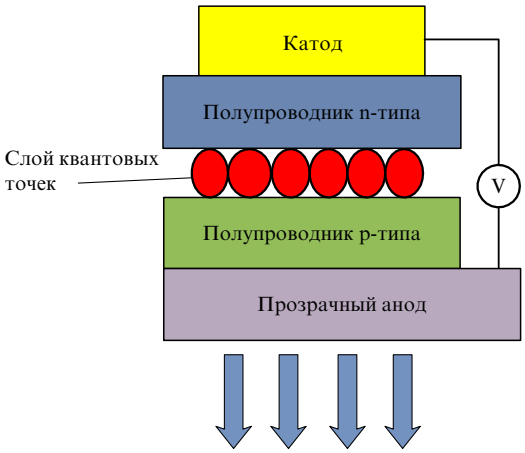

Рис. 3. Схема действия простейшего органического светоизлучающего диода (пикселя дисплея) с полупроводниковыми квантовыми точками (QD-OLED).

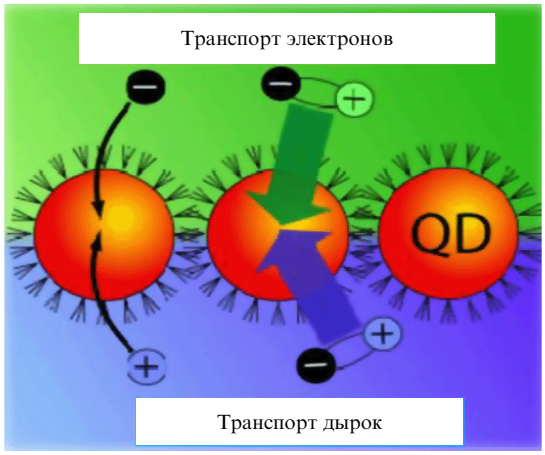

Рис. 5. Механизмы возбуждения квантовых точек на границе органических слоёв n-типа (транспорт электронов) и p-типа (транспорт дырок).

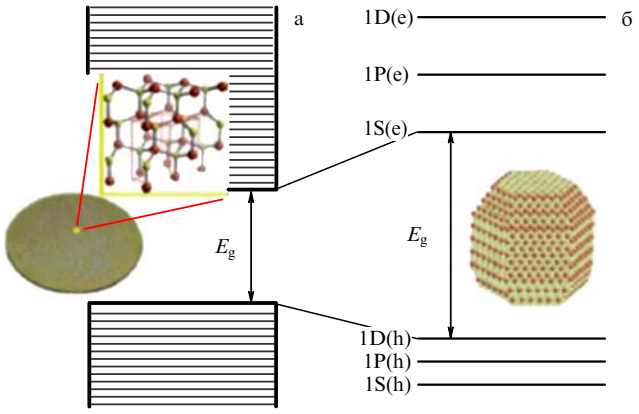

Рис. 4. Энергетическое строение двух типов объектов: массивного (а) и наноразмерного (б).

ром является высокий квантовый выход электролюминесценции квантовых точек.

На рисунке 3 показано изменение энергетической структуры материала при переходе от массивного (bulk) (рис. 4а, где E_g — ширина запрещённой зоны) к наноразмерному (рис. 4б, где E_g — энергия нижайшего перехода). Эта величина определяется простой формулой: $\Delta E = h/(2md^2)$, связывающей диаметр наночастицы (квантовой точки) d и энергию перехода.

Очевидно, что, изменяя размер наночастицы (квантовой точки), можно получить излучение в разных частях видимой части спектра, что и необходимо для получения полноцветного дисплея.

В настоящее время нет ясности с механизмами возбуждения квантовых точек в QD-OLED. Рассмотрим возможные схемы возбуждения квантовых точек, приведённые на рис. 5.

Возможна прямая рекомбинация электрона и дырки на квантовой точке, что приведёт к её возбуждению и, как следствие, к испусканию фотона с соответствующей энергией. Но возможен и другой сценарий: электронно-дырочная рекомбинация может произойти либо в органическом слое n-типа, либо в слое p-типа. В этих случаях происходит перенос энергии электронного возбуждения от возбуждённой молекулы в органическом слое к квантовой точке. Такой перенос энергии происходит по механизму Фёрстера [8]. Например, в работе [9] исследован перенос энергии электронного возбуждения от излучающего в синей части спектра конъюгированного полимера poly[(9,9-dihexylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-co(9,ethyl-3,6-carbazole)] к коллоидной квантовой точке ядро – оболочка CdSe/ZnS. Показано, что перенос энергии осуще-

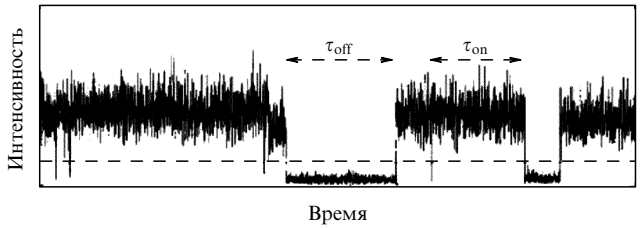

Рис. 6. Мерцающая люминесценция одиночной квантовой точки (blinking).

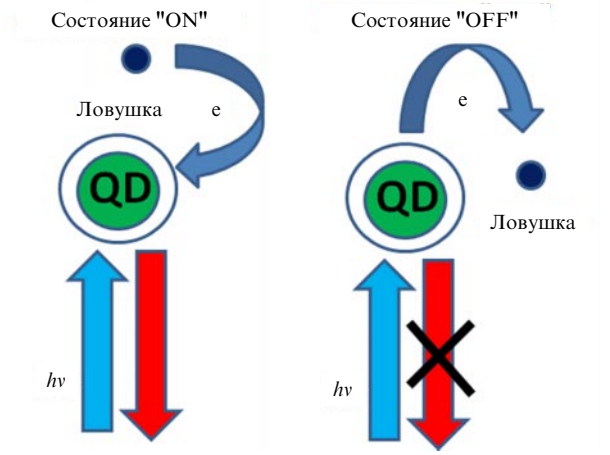

Рис. 7. Связь мерцающей люминесценции квантовой точки с захватом и освобождением носителя заряда ловушкой.

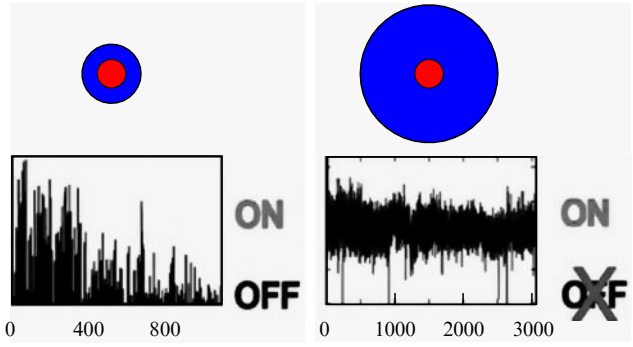

Рис. 8. Иллюстрация роли толщины оболочки квантовой точки ядро – оболочка.

ствляется по механизму Фёрстера и полимер выступает в роли донора, а квантовая точка — в роли акцептора. Определён радиус Фёрстера: (80 ± 15) Å. Исследование процессов на интерфейсе органический слой – квантовая точка необходимо для создания эффективного пикселя дисплея. Существует также ряд физических задач, решение которых необходимо для оптимизации работы QD-OLED.

Известно, что квантовая точка при непрерывном возбуждении излучает свет дискретно [10]. Это явление мерцающей люминесценции (blinking — в англоязычной литературе). На рисунке 6 приведена интенсивность люминесценции одиночной квантовой точки при непрерывном возбуждении. Отчётливо видны интервалы свечения и интервалы отсутствия света.

Изменяющаяся во времени интенсивность люминесценции квантовой точки при непрерывном возбуждении характеризуется состояниями "ON" (свет испускается) и "OFF" (свет не испускается). Одно из объяснений данного явления сводится к изменению заряда квантовой точки. Точка, "теряющая" заряд, не люминесцирует, но заряд по истечении некоторого времени может "вернуться" (фактически это процесс захвата и освобождения ловушек на интерфейсе квантовая точка – окружающая среда). Схематически этот процесс представлен на рис. 7. Данное явление играет негативную роль при создании эффективного пикселя дисплея. В связи с этим нужно исследовать причины мерцающей люминесценции (blinking) и найти способы её устранения. Имеются лишь первичные указания на то, какую роль в этом явлении играет толщина оболочки квантовой точки ядро – оболочка (см., например, [11]). На рисунке 8 показана мерцающая люминесценция квантовой точки с разной толщиной оболочки.

Невозможно в небольшой статье охватить все аспекты прогресса в области современных источников света и дисплеев, но даже в отдельном случае использования QD-OLED в качестве пикселя очевидны огромные возможности использования гибридных наноматериалов. Действительно, сочетание полупроводниковых коллоидных наночастиц (квантовых точек) и органических интерфейсов приводит к качественно новому типу дисплея, обладающего большим временем жизни, высокой светоотдачей и возможностью перестройки излучения во всём видимом спектральном диапазоне. Очевидно, что такого рода оптоэлектронные устройства должны быть востребованы промышленностью. С другой стороны, сложность системы органический интерфейс – квантовая точка представляет большой интерес для фундаментальной физики.

Работа поддержана частично грантом РФФИ № 09-02-00546-а и контрактом № 16.516.11.6071 с Министерством образования и науки РФ.

Список литературы

1. Edison T A, U.S. Patent No. 865,367 (1907)
2. Zheludev N *Nature Photon.* **1** 189 (2007)
3. Tang C W, VanSlyke S A *Appl. Phys. Lett.* **51** 913 (1987)
4. Бочкарев М Н, Витухновский А Г, Каткова М А *Органические светоизлучающие диоды* (*OLED*) (Н. Новгород: ДЕКОМ, 2011)
5. Murray C B, Norris D J, Bawendi M G *J. Am. Chem. Soc.* **115** 8706 (1993)
6. Алферов Ж И *ФТП* **32** 1 (1998) [Alferov Zh I *Semiconductors* **32** 1 (1998)]
7. Coe S et al. *Nature* **420** 800 (2002)
8. Förster Th *Discuss. Faraday Soc.* **27** 7 (1959)
9. Anni M et al. *Appl. Phys. Lett.* **85** 4169 (2004)
10. Barkai E, Jung Y, Silbey R *Annu. Rev. Phys. Chem.* **55** 457 (2004)
11. Chen Y et al. *J. Am. Chem. Soc.* **130** 5026 (2008)