

Андрей Старостин | Валерий Сушков | tonkiysvet@mail.ru
Андрей Микрюков |

Развитие полупроводниковой светотехники

В связи с формированием программы по энергосбережению и определением направлений ее реализации большое внимание уделяется полупроводниковой светотехнике. Интерес к данной теме очевиден. Ученые, производственники и государственные структуры, работая по созданию высокоэффективных светотехнических приборов, сталкиваются по своим направлениям с рядом проблем.

В предлагаемой статье обзорно рассматриваются вопросы создания и развития полупроводниковых источников света — светодиодов. Мы надеемся, что представленная краткая информация позволит читателям получить представление о развитии полупроводниковой светотехники.

История создания светодиода

Явление электролюминесценции, заключающееся в излучении фотонов твердым телом под воздействием электрического тока, было открыто в начале XX века. В том, что электролюминесценция может происходить при комнатной температуре, и заключается ее главное отличие от теплового свечения.

В 1907 году английский инженер Х. Д. Раунд случайно заметил, что у работающего детектора вокруг точечного контакта возникает свечение. Всерьез же заинтересовался этим физическим явлением и его практическим применением Олег Владимирович Лосев.

Обнаружив в 1922 году свечение кристаллического детектора, он перешел к экспериментам.

Стремясь получить устойчивую генерацию кристалла, он пропускал через точечный контактный диодного детектора ток от батарейки.

В 1928 году Лосев опубликовал результаты своих исследований. Он установил, что излучение света в одних диодах возникает только при их смещении в обратном направлении, а в других — как в прямом направлении, так и в обратном.

Первые светодиоды были изготовлены из SiC, а в 1936 г. появилась публикация о создании Ж. Дестрио светодиодов на основе кристаллов цинка ZnS.

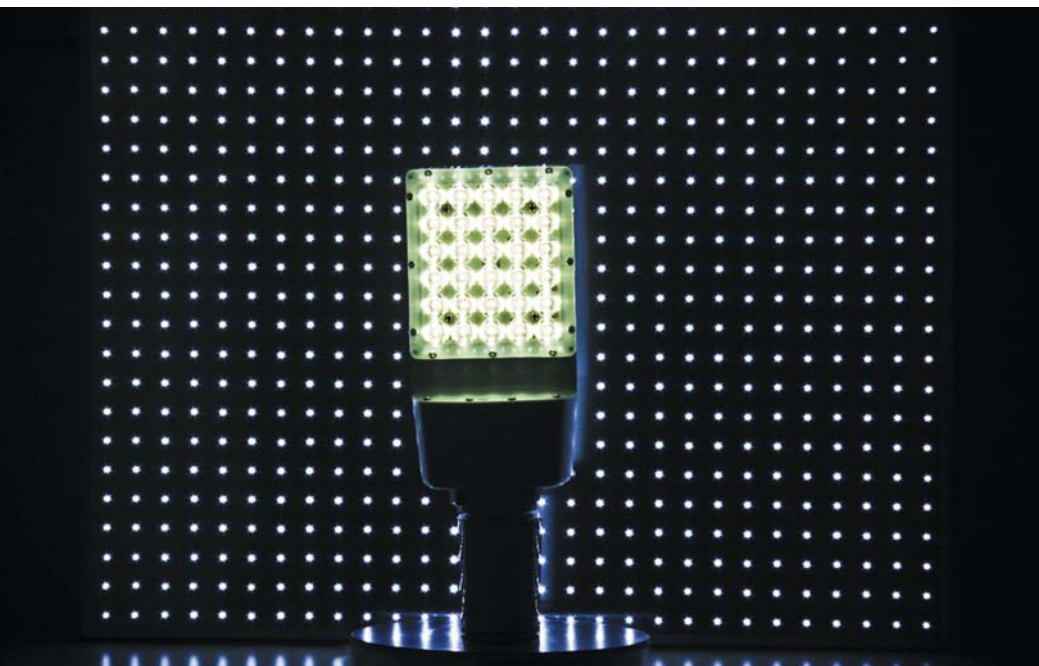
В 1961 году экспериментаторы Роберт Биард и Гари Питтман обнаружили, что GaAs испускал инфракрасную радиацию при прохождении электрического тока.

Первый светодиод видимого спектра (красный) был разработан в 1962 году Ником Холоньяком-младшим, когда он работал в компании «Дженерал Электрик». Холоньяк был назван отцом светодиодов. Джордж Крэффорд, прежний аспирант Холоньяка, избрал первый светодиод желтого цвета и улучшил яркость красного и красно-оранжевого светодиодов в десятки раз в 1972 году. В 1976 г. Т. Р. Пирсал получил первые светодиоды высокой яркости и производительности для волокон оптических телекоммуникаций, избрав новые материалы полупроводников, приспособленные к оптическим длинам волн передачи оптики.

Практическое применение на первых этапах

До 1968 года видимые и инфракрасные светодиоды были чрезвычайно дорогостоящими — до \$200 за единицу, и поэтому имели небольшое практическое применение. Корпорация Monsanto была первой организацией, которая наладила серийный выпуск видимых светодиодов, использующих фосфид арсенида галлия в 1968 г., чтобы произвести красный светодиод, подходящий для индикаторов. Компания Hewlett Packard (HP) начала использовать светодиоды в том же 1968 году, первоначально — GaAsP, поставляемый Monsanto. Технология в основном применялась в алфавитно-цифровых дисплеях.

Первые коммерческие светодиоды обычно использовались в качестве замены светящихся индикаторов, сначала в дорогом оборудовании, таком как лабораторное и испытательное оборудование электроники, позже в таких приборах, как телевизоры, радио, телефоны, калькуляторы. Эти красные светодиоды были достаточно слабыми по яркости и использовались только как индикаторы, поскольку их светоотдача было недостаточно, чтобы осветить некую область. Позже появились светодиоды других цветов и также стали использоваться в различных приборах и оборудовании. Затем, благодаря продвинутой технологии, светоотдача светодиодов была увеличена, а эффективность и надежность поддерживались на приемлемом уровне. Появление светодиодов белого спектра большой мощности позволило использовать их в освещении. Большинство светодиодов



было собрано в общих габаритах 5×3 мм, но в связи с увеличивающейся выходной мощностью появилась необходимость отводить лишнее тепло для сохранения надежности, таким образом, более сложные устройства были приспособлены к эффективному отводу тепла. Современные устройства с большой мощностью имеют лишь небольшое сходство с ранними светодиодами.

Этапы развития светодиодных технологий

29 ноября 1993 года компания Nichia Chemical Industries объявила, что завершила разработку голубых светодиодов на основе GaN и планирует приступить к их массовому производству. Первый коммерческий синий светодиод был сделан Накамурой в начале 1994 года на основе гетероструктуры InGaN/AlGaIn с активным слоем InGaIn, легированным Zn. Выходная мощность составляла 3 мВт при прямом токе 20 мА с квантовым выходом 5,4% на длине волны излучения 450 нм. Вскоре после этого за счет увеличения концентрации In в активном слое был изготовлен зеленый светодиод с силой света 2 кд. Он состоит из 3-м активного слоя InGaIn, заключенного между слоями p-AlGaIn и n-GaN, выращенными на сапфире. Такой тонкий слой InGaIn сводит к минимуму влияние рассогласования решеток: упругое напряжение в слое может быть снято без образования дислокаций, и качество кристалла остается высоким. В 1995 году при еще меньшей толщине слоя InGaIn и более высоком содержании In удалось повысить силу света до 10 кд на длине волны 520 нм, а квантовую эффективность — до 6,3%, причем измеренное время жизни светодиодов составляло 50 000 ч, а по теоретическим оценкам — более 106 000 ч (~150 лет!). Накамура запатентовал ключевые этапы технологии, и к концу 1997 года фирма Nichia выпускала уже 10–20 млн голубых и зеленых светодиодов в месяц. Дела компании стремительно улучшились, доходы выросли с 20 млрд иен в 1993 г. до 180 млрд иен в 2003 г.

Сегодня внешний квантовый выход излучения светодиодов на основе GaN и его твердых растворов (InGaIn, AlGaIn) достиг значений 29/15/12% соответственно для фиолетовых/голубых/зеленых светодиодов; их светоотдача достигла значений 30–50 лм/Вт. Внутренний квантовый выход для «хороших» кристаллов с мощным теплоотводом достигает почти 100%, рекорд внешнего квантового выхода для красных светодиодов составляет 55%, а для синих — 35%. Внешний квантовый выход излучения желтых и красных светодиодов на основе твердых растворов AlInGaP достиг значений 25–55%, а светоотдача, соответственно, достигла 100 лм/Вт, то есть сравнялась со светоотдачей лучших современных люминесцентных ламп.

Молекулярные полимерные светодиоды

Органический светодиод (от англ. Organic Light-Emitting Diode, OLED) — полупроводни-

ковый прибор, изготовленный из органических соединений, которые эффективно излучают свет при пропускании через них электрического тока. Основное применение технология OLED находит при создании устройств отображения информации (дисплеев). Предполагается, что производство таких дисплеев будет гораздо дешевле, нежели производство жидкокристаллических моделей.

Для создания органических светодиодов (OLED) используются тонкопленочные многослойные структуры, состоящие из слоев нескольких полимеров. При подаче на анод положительного относительно катода напряжения поток электронов протекает через прибор от катода к аноду. Таким образом, катод отдает электроны в эмиссионный слой, а анод забирает электроны из проводящего слоя, другими словами, анод отдает дырки в проводящий слой. Эмиссионный слой получает отрицательный заряд, а проводящий слой — положительный. Под действием электростатических сил электроны и дырки движутся навстречу друг к другу и при встрече рекомбинируют. Это происходит ближе к эмиссионному слою, потому что в органических полупроводниках дырки обладают большей подвижностью, чем электроны. При рекомбинации происходит понижение энергии электрона, которое сопровождается выделением (эмиссией) электромагнитного излучения в области видимого света. Поэтому слой и называется эмиссионным. Прибор не работает при подаче на анод отрицательного относительно катода напряжения. В этом случае дырки движутся к аноду, а электроны — в противоположном направлении к катоду, и рекомбинации не происходит.

В качестве материала анода обычно используется оксид индия, легированный оловом. Он прозрачен для видимого света и имеет высокую работу выхода, которая способствует инжекции дырок в полимерный слой. Для изготовления катода часто используют металлы, такие как алюминий и кальций, так как они обладают низкой работой выхода, способствующей инжекции электронов в полимерный слой.

Профессор Ян Ян (Yang Yang) из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе и его студент-дипломник Джинсон Хуан (Jinsong Huang) сообщили о демонстрации фосфоресцирующего светодиода, излучающего в красном диапазоне спектра.

В производстве светодиода, о конструкции которого пока не сообщается, использован раствор полимера, поэтому для таких изделий была предложена аббревиатура PLED (Polymer Light-Emitting Diode). Красный PLED отличается рекордной удельной яркостью: световой поток в расчете на 1 Вт для красного светодиода вырос с 12 до 18 лм/Вт. Увеличена также яркость зеленых — до 30 лм/Вт и белых флюоресцентных светодиодов — до 20 лм/Вт.

Столь резкое увеличение показателей светодиодов приведет к значительному снижению энергопотребления ЖК-телевизоров и яркости создаваемых ими изображений. Дисплеи станут легче и тоньше. Кроме того, и затраты на производство светодиодов можно сократить

почти в два раза. Всего этого удалось добиться за счет формирования очень простой однослойной структуры на поверхности стекла. Слой образуется из полимерного порошка, растворенного в жидкости, в которой присутствует также краситель, разработанный компанией Canon. Состав этого красителя до сих пор сохраняется в тайне. Предполагается, что новая технология выйдет на массовый рынок в течение трех лет. Компания Canon первой получила лицензию на использование предложенной технологии производства PLED, сообщает PhysOrg.

В университете Дрездена (Германия) разработан светодиод из органических материалов, способный излучать уже сейчас до 90 люмен на 1 Вт. Этот показатель может быть повышен до 124 люмен на 1 Вт, сообщает Optics. У стандартных флюоресцентных источников света этот показатель составляет 60–70 лм/Вт, у существующих органических светодиодов — всего 44 лм/Вт.

Светодиодное освещение

Энергетический кризис последних лет показал, что справиться с дефицитом электроэнергии и ресурсов в основном можно путем энерго- и ресурсосбережения. Вся вырабатываемая в мире электроэнергия расходуется следующим образом:

- электроприводы — 50–52%;
- освещение — 17–20%;
- источники тепла и холода — 15–17%;
- телекоммуникации — 13–15%.

Благодаря применению новых полупроводниковых источников света существенная экономия может быть достигнута и для систем уличного освещения и освещения помещений.

Эффективность применения светодиодов растет, поскольку их стоимость непрерывно снижается, а новые технологические усовершенствования приводят к постоянному увеличению яркости светодиодов. В то время как сверхъяркие светодиоды, очевидно, продолжают свое проникновение на все рынки, новые прикладные области применения разовьются уже в ближайшие годы, хотя сегодня этот сегмент составляет приблизительно 5% от всего рынка сверхъярких диодов.

Каждый год светоотдача и эффективность светодиодов увеличивается на 30–50%. По состоянию на 2010 год светодиодные светильники уже чаще ламп применяются в архитектурном, декоративном, ландшафтном, подводном освещении, праздничной иллюминации, шоу-бизнесе, а также в специальных приложениях — медицине и растениеводстве, например.

В обозримом будущем, скорее всего, светодиоды вытеснят лампы в дежурном освещении мест общественного пользования — подъездах жилых домов, световых указателях и т. д. А также на транспорте — в самолетах, поездах, автомобилях. По мере развития технологии и удешевления производства дело уже доходит до ночного освещения автомобильных дорог и улиц. Все это даст существенную экономию энерго-ресурсов в национальных масштабах.

Рыночные доли светодиодов высокой яркости распределились так: мобильные приборы — 52% (как и в прошлом году), второе место поделили световые вывески и дисплеи — 14% и транспортные средства — 14%. В категорию «прочее» попали применения, связанные с продолжающимся улучшением ярких светодиодов белого свечения в показателе цена/свойства. Новые эффективные светодиодные светильники открывают рынок по замене традиционных источников света в самых разнообразных применениях. Окончательный успех суперярких светодиодов наступит с переходом от технологий, влияющих на рынок, к влиянию фактических применений на рынок. Объем мирового рынка светодиодов в 2008 году составил \$5,1 млрд. Согласно прогнозам, в 2012 году его объем составит \$12 млрд при среднегодовом темпе роста, равном 23%.

В настоящий момент на российском рынке светодиоды в основном используются в светосигнальных приборах (светофоры и пр.), при освещении архитектурных сооружений,

а также в автомобилестроении (фары и фонари). Наиболее динамично замена светотехники с использованием традиционных источников света на светодиодные будет происходить в сегментах освещения объектов ЖКХ, уличного освещения, освещения коммерческих зданий и промышленных объектов.

Развитием полупроводниковой светотехники в России и за рубежом занимаются коллективы университетов и крупных фирм. Светодиоды на полупроводниковых соединениях Si, AsGa... обладают высокими технико-экономическими показателями, имеют широкую гамму цветов, конфигурации и мощности. Возникшее в последнее время новое направление полупроводниковых полимерных соединений, обладающих электролюминесцентными свойствами, открывает новые горизонты в полупроводниковой светотехнике. Основной целью исследований и разработок должно стать создание доступного источника света на основе полупроводниковых соединений. Эдисон не изобрел лампу накаливания. Он сделал ее доступной.

Для решения этой задачи необходимо сконцентрировать усилия разработчиков и ученых на данном направлении, и самое главное — обеспечить государственную поддержку этих разработок. Если вопросы ставятся в государственном масштабе, то и ответы желаемого уровня ученые и производители могут дать только совместно с государством. В конечном итоге, массовый и дешевый светодиод (или кристалл) станет залогом успеха науки, производства, государства и потребителей. ●

Литература

1. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. Под ред. А. Э. Юновича. 2-е изд. М.: Физматлит, 2008.
2. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Физматлит, 2007.
3. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. 1998. Т. 32. № 1.