

Светодиоды Lumileds:

прошлое, настоящее, будущее

В настоящей статье приводится обзор полупроводниковых светодиодов Lumileds. Данная компания в начале 2000-х гг. впервые разработала мощные светодиоды, признанные последнее время наиболее перспективными источниками света для осветительных приборов настоящего и самого ближайшего будущего.

Введение

Мощные светодиоды в последнее время рассматриваются как одни из основных источников света для светотехнических изделий ближайшего будущего. Уже сейчас применение светодиодных осветительных приборов увеличивается с каждым годом, растет число компаний, занимающихся

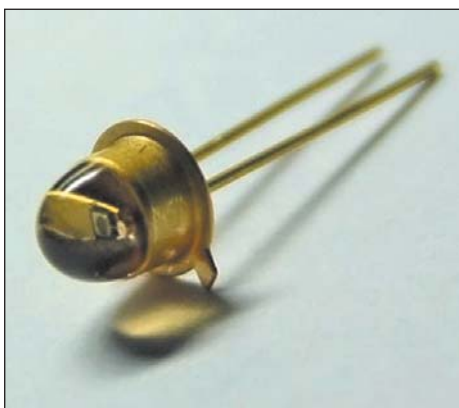


Рис. 1. Светодиод на основе GaAsP красного цвета свечения компании Monsanto Corporation

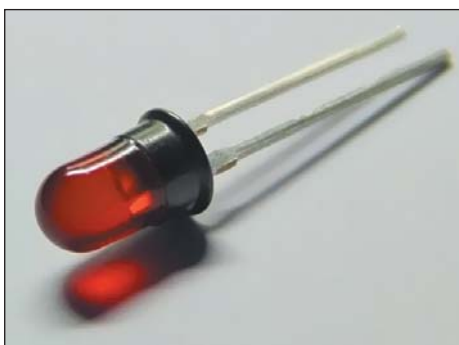


Рис. 2. Светодиод красного цвета свечения компании Hewlett Packard

разработкой и производством светотехнических изделий на основе светодиодов. Безусловно, в основном это происходит благодаря развитию физики и технологии светодиодов, которое наблюдается с середины 90-х гг. XX в., когда в физике и технике полупроводников произошел прорыв благодаря созданию гетероструктур на основе нитрида галлия и его твердых растворов [1–4]. Новые эффективные светодиоды на основе этих материалов, получившие название сверхъяркие, перекрыли коротковолновую часть видимого спектра — от ультрафиолетовой до желтой области [1–5]. Кроме того, на этих светодиодах были получены невиданные до того времени значения квантового выхода и КПД [1–6]. Одновременно существенно улучшилась эффективность светодиодов и на основе гетероструктур и других полупроводниковых соединений типа АПВВ — от желто-зеленой до ближней инфракрасной области. В основном это были структуры на основе фосфида галлия (GaP) и его твердого раствора — фосфида алюминия–индия–галлия (AlInGaP), арсенида галлия и его твердого раствора — арсенида алюминия–галлия (AlGaAs), а также твердого раствора двух названных веществ — арсенида–фосфида галлия (GaAsP). Как следствие, светодиоды стали рассматриваться как источники света не только для индикации, но и сигнализации, отображения и передачи информации, а в будущем — и для общего освещения. То, о чем не предполагали, стало реальностью.

История светодиодов Hewlett Packard

Серийный выпуск светодиодов на основе GaAsP был налажен в 1968 г. Monsanto Corporation [3, 7]. Внешний вид таких светодиодов представлен на рис. 1. Светодиодные кристаллы, выпускавшиеся корпорацией, представляли собой GaAsP *p-n*-структуры, выращенные на GaAs-подложках, излучающие фотоны с длиной волны, соответствующей красному

диапазону видимого спектра. Вообще 1968 г. можно назвать началом эры твердотельных излучателей. В течение нескольких последующих лет продажи таких светодиодов стремительно росли, практически удваиваясь каждые несколько месяцев.

В период с конца 1960-х до середины 1970-х гг. наблюдалось стремительное развитие различных цифровых дисплеев, которые сначала использовались только в калькуляторах, а позднее стали применяться и в наручных часах. В то же самое время Hewlett Packard и Monsanto Corporation все свои усилия сосредоточили на разработке более сложных дисплеев: многоцифровых и буквенно-цифровых.

В начале 1960-х гг. появились и первые светодиоды на основе GaP красного и зеленого свечения [3, 7]. Тогда полупроводниковые материалы уже стали применяться для создания биполярных и полевых транзисторов, используемых в электронных схемах в качестве ключей и усилителей. В процессе исследований и разработок было установлено, что полупроводники являются наилучшими материалами для изготовления излучающих устройств.

В 1968 г. компания Hewlett Packard занялась разработками и производством светодиодов на основе GaP и его твердых растворов (рис. 2). Как раз в это время, в конце 60-х, была разработана технология получения GaP-пластин из расплавов при высоких температурах и давлениях [3, 7]. Из таких пластин при помощи резки формировались подложки — точно такие же, какие используются в настоящее время. На их основе выращивались структуры четверного соединения AlInGaP.

Система материалов на основе AlInGaP подходит для получения яркого свечения в красном (626 нм), оранжевом (610 нм) и желтом (590 нм) спектральных диапазонах и в настоящее время является основной для изготовления светодиодов повышенной яркости, излучающих свет в данном интервале длин волн.

Поскольку ширина запрещенной зоны InGaP составляет около 1,9 эВ (650 нм), этот материал может использоваться для изготовления лазеров, излучающих свет в красной области видимого спектра. Добавление Al к активной области InGaP позволяет сместить излучение в сторону более коротких длин волн, захватывая оранжевый и желтый спектральные диапазоны [3, 7].

Однако твердый раствор $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P$ при $x \approx 0,53$ становится непрямозонным полупроводником, что приводит к сильному снижению его КПД при значениях длины волны ниже примерно 570–600 нм. Следовательно, этот материал не подходит для изготовления высокоэффективных светодиодов, излучающих свет с длиной волны ниже 570 нм, то есть в желто-зеленой и более коротковолновых зеленой и синей областях спектра [3, 7].

Разработав технологию выращивания структур на основе AlInGaP, компания Hewlett Packard получила линейку светодиодов (рис. 3), перекрывающих длинноволновую область спектра, а именно красный, оранжевый и желтый цветовые диапазоны свечения.

Особое развитие технология производства светодиодов на основе AlInGaP получила в конце 80-х. Оно было связано с созданием в активной области, состоящей из нескольких квантовых ям, распределенных отражателей Брэгга и технологией изготовления прозрачных GaP-подложек [3, 7]. Все названные технологические усовершенствования внедрялись с целью повышения квантового выхода излучения структур и КПД светодиодов, изготавливаемых на их основе. Специалисты компании Hewlett Packard активно участвовали в работах по совершенствованию технологии выращивания AlInGaP-структур и добились значительных успехов: к концу 80-х — началу 90-х гг. Hewlett Packard стала лидером на рынке светодиодов. Светодиоды этой компании красного и желтого свечения устанавливались в то время во многих устройствах, а кристаллы использовали в своих изделиях многие производители светодиодов. В том числе красные и желтые светодиоды Hewlett Packard были использованы разработчиками НПФ «Свеча» в первых светодиодных светофорах, установленных к 850-летию юбилею в Москве в 1997 г. [8, 9].

Для создания светодиодов более коротковолнового излучения, в синей и зеленой области, нужно было найти материал с более высоким значением ширины запрещенной зоны [3, 7]. Таким материалом стал GaN. Исследование пленки из этого материала показало, что без всякого легирования он обладает проводимостью *n*-типа, и для получения *p-n*-перехода требовалось подобрать соответствующую примесь *p*-типа. Сотрудники японской компании Nichia Chemical во главе с Шуджи Накамурой, разработав новую систему выращивания GaN методом металлоорганической газофазной эпитаксии и предложив более технологичный способ активации акцепторов магния путем высокотемпературного отжига, получили первые светодиоды синего, голубого и зеленого цвета свечения [3, 7] на основе гетероструктур GaN и его твердых растворов InGaN и AlGaN. КПД этих светодиодов достигал 10% [3, 6].

Исследователи фирмы Nichia также показали, что кристаллы на основе GaN и его твердых растворов подходят для получения светодиодов белого свечения. Был предложен метод использования люминофоров, преобразующих длину волны синего свечения кристалла в желто-зеленое свечение [3, 7], и, как результат сложения сигналов в указанных диапазонах, получается белый цвет свечения.



Рис. 3. Линейка светодиодов на основе AlInGaP компании Hewlett Packard



Рис. 4. Первый мощный светодиод Luxeon I компании Lumileds

Полученные результаты дали импульс развитию работ во всем мире. Вслед за компанией Nichia технологию выращивания светодиодных кристаллов на подложках из сапфира (Al_2O_3) освоили специалисты и других компаний, одними из первых были сотрудники Hewlett Packard. Развитие шло довольно быстрыми темпами. Первые зеленые светодиоды компании Hewlett Packard появились на рынке уже в 1997 г.

История светодиодов Lumileds

В 1999 г. корпорациями Philips и Hewlett Packard была создана фирма Lumileds. Как видно, новая компания создавалась одновременно двумя концернами-лидерами в своих областях — светотехнике и полупроводниковой оптоэлектронике соответственно. Целью создания этой компании была разработка источника света на основе светодиодов, который должен был стать принципиально новым для применения в светотехнике.

В 2003 г. Lumileds изготовила первый мощный светодиод Luxeon I со световым потоком более 25 лм и световой отдачей более 20 лм/Вт (рис. 4) [3, 7]. Светодиоды Luxeon I сразу превзошли по световой отдаче лампы накаливания почти в два раза, что позволило начать говорить о светодиодах как о новых и эффективных источниках света. Это было принципиально новое изделие по многим параметрам — по размеру кристалла, значению рабочего тока, корпусу и т. д. Именно этим своим изделием компания Lumileds открыла

новый класс светодиодов, получивших название мощных — тех светодиодов, которые можно использовать как источники света для осветительных приборов.

Конструкция корпуса мощного светодиода представлена на рис. 5. Одной из основных его частей является теплоотводящее основание — радиатор, на котором помещается отражатель. В показанном на рисунке типе корпуса данные элементы находятся в пластмассовом кожухе. Полупроводниковый кристалл монтируется в отражатель на теплоотводящем основании, монтаж кристалла также производился при помощи клея. Компания Lumileds впервые использовала технологию перевернутого монтажа, при котором кристалл монтируется основанием вверх, а контактами вниз. Монтаж кристалла производился на кремниевую подложку, помещенную на дно отражателя. Контактные площадки кремниевой подложки разваривались при помощи золотой проволоки (золотой провод) на отрицательный (провод катода) и положительный выводы — катод и анод соответственно.

Объем отражателя со смонтированным в нем кристаллом заполняют оптическим гелем (силиконовый герметик). С одной стороны, данный гель увеличивает коэффициент вывода излучения из кристалла за счет большего соответствия показателей преломления, а с другой — позволяет кристаллу и проволочным контактам не повреждаться при тепловом расширении под действием выделения тепла вследствие протекания электрического тока.

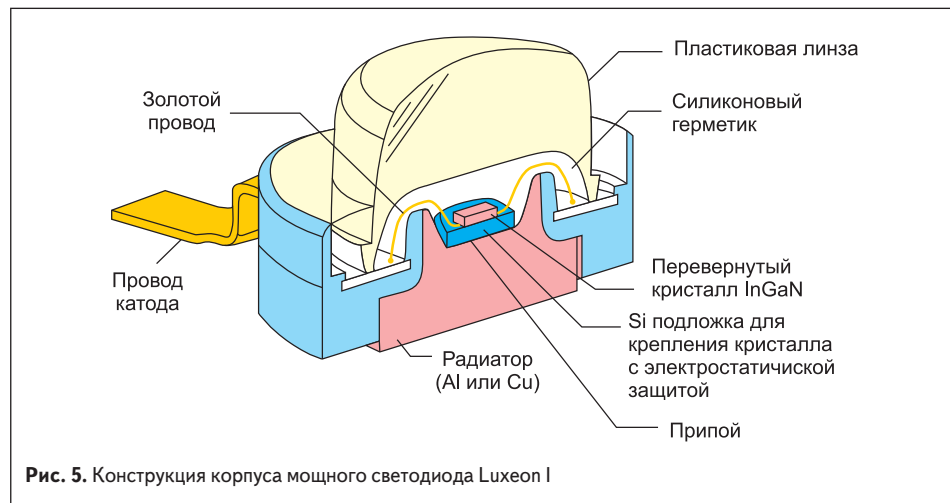


Рис. 5. Конструкция корпуса мощного светодиода Luxeon I

Теплоотводящее основание и заполненный гелем отрагатель позволяют кристаллу в таком корпусе работать при более высокой температуре, чем в корпусе стандартного светодиода (выводном или для поверхностного монтажа), и, как следствие, подавать через кристалл такого светодиода большую плотность тока. Сверху заполненный гелем отрагатель закрывается линзой, которая у светодиода Luxeon I была выполнена из пластика. Линза жестко не фиксируется (поэтому получила название «плавающая линза»), держится за счет адгезии геля при полимеризации, что также дает возможность ей немного смещаться при тепловом расширении за счет нагрева светодиода.

Оптическая система корпуса светодиода Luxeon I обеспечивает достаточно широкие углы кривой светораспределения, обычно порядка 120°.

В дальнейшем мощные светодиоды стали выпускать и другие производители. Они провели доработку корпуса путем применения разных материалов с высоким коэффициентом теплопроводности, а также используя линзы из различных материалов — пластика, кварцевого стекла или силикона.

Современные модели светодиодов Luxeon Rebel компании Philips Lumileds

В 2006 г. Lumileds поменяла собственника и название — концерн Philips выкупил все ее акции, а сама компания стала называться Philips Lumileds. Под этим новым названием была выпущена новая серия светодиодов — Luxeon Rebel. Применение новых материалов с более высоким коэффициентом теплопроводности для корпуса позволило, например, существенно сократить его размеры, а применение новых материалов для линз — увеличить коэффициент вывода света из корпуса светодиода. Также кристаллы для серии Luxeon Rebel изготавливают с применением технологии отсоединения структуры от подложки Al_2O_3 (lift-off технология) [2, 4], что уменьшает количество дефектов и дислокаций и тем самым повышает их квантовый выход.

В серию светодиодов Luxeon Rebel входят несколько семейств, которые можно четко разделить по типам применений. Но все светодиоды имеют три основных качества:

- высокий световой поток;
- высокая световая отдача;
- высокая надежность.

Светодиоды семейства Luxeon Rebel General Purpose White (GPW) (рис. 6) выпускаются всех оттенков белого цвета и рекомендуются производителем для разработки источников света белого цвета свечения. Данные светодиоды могут использоваться в любых применениях, где требуется получить хороший белый цвет.



Рис. 7. Светодиод Luxeon Rebel Illumination

Светодиоды семейства Luxeon Rebel Illumination (рис. 7) рекомендуются для применения в осветительных приборах и системах освещения на основе светодиодов. Светодиоды данного семейства соответствуют оптимальным для освещения областям белого цвета и имеют оптимизированный индекс цветопередачи для разных его областей.



Рис. 8. Светодиод Luxeon Rebel Direct Color

Серия мощных светодиодов Luxeon Rebel Direct Color (рис. 8) имеет все цвета свечения, соответствующие видимому диапазону

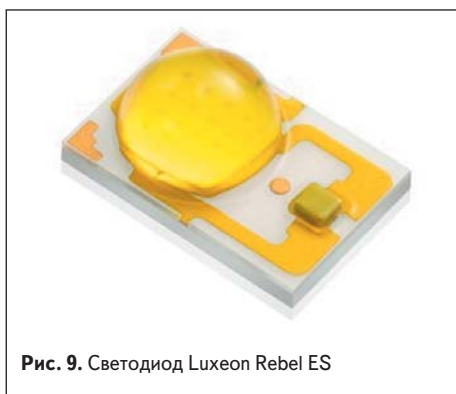


Рис. 9. Светодиод Luxeon Rebel ES

спектра, — от красного до синего. Эти светодиоды рекомендуются для применения в архитектурно-художественном и декоративном освещении.

Серия мощных светодиодов Luxeon Rebel ES (рис. 9) предназначена, в основном, для разработки светильников и ламп. Характерной особенностью данных светодиодов является сниженное значение прямого напряжения (при токе 350 мА потребляемая мощность составляет ровно 1 Вт, поэтому значение светового потока соответствует значению световой отдачи). Данные светодиоды имеют рекомендуемый рабочий ток 700 мА, что позволяет получить большой световой поток со светодиода в изделии, при этом эффективность останется достаточно высокой. Как следствие, становится возможным получить более яркий источник света.

Следует отметить еще два новых семейства светодиодов компании Philips Lumileds.

Luxeon H (рис. 10) предназначены для разработки светодиодных ламп. Данные светодиоды имеют хороший тепловой дизайн корпуса и обладают стабильной цветовой температурой. Кроме того, возможно питание данных светодиодов непосредственно от источника переменного тока, что для разработки светодиодных ламп является особенно важным.



Рис. 10. Светодиод Luxeon H

Новая серия светодиодов Luxeon A (рис. 11) рекомендуется для применения в светотехнических приборах, где требуется не только

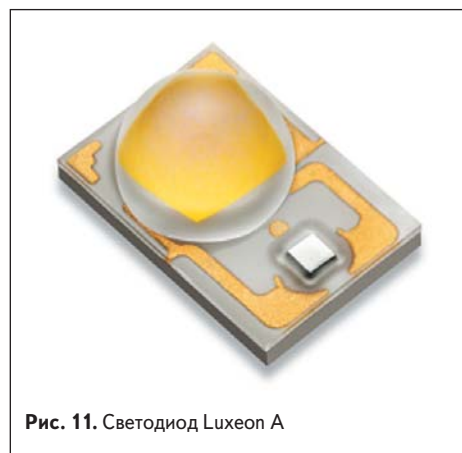


Рис. 11. Светодиод Luxeon A



Рис. 6. Светодиод Luxeon Rebel General Purpose White (GPW)

стабильность цветовой температуры, но также и однородность световой температуры по поверхности источника света или изделия. Данные светодиоды выпускаются с очень маленьким разбросом цветовой температуры (порядка ± 45 К, что соответствует трехшаговому эллипсу Мак-Адама [7]), в результате чего отсутствует необходимость разбиновки светодиодов по цветовой температуре. Приобретая такие светодиоды, разработчик устройства заранее может знать цветовую температуру своего изделия с высокой степенью точности. Также стоит отметить, что производитель дает характеристики данных светодиодов при температуре p - n -перехода $+85$ °С.

Заключение

Рассмотренный исторический обзор светодиодов Philips Lumileds (и Hewlett Packard) показывает, как данная компания, являвшаяся одним из лидеров светодиодного рынка, развивала свою технологию производства светодиодов. Специалисты компании в разное время были в числе основных разработчиков сначала технологии GaP и его соединений, а затем и GaN и его твердых растворов. Они вслед за японскими компаниями отработали технологию выращивания гетероструктур GaN и его твердых растворов на подложках Al_2O_3 .

Сейчас, кроме технологии выращивания гетероструктур GaN и его твердых растворов на подложках Al_2O_3 , существует альтернативная технология выращивания данных структур на подложках из карбида кремния (SiC), которая разработана и запатентована основным конкурентом Philips Lumileds — компанией Cree. Данная технология имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с технологией на Al_2O_3 , обусловленных лучшим соответствием постоянных решетки подложки и структуры и связанным с этим меньшим количеством дислокаций и более высоким квантовым выходом кристаллов [2–4]. Но специалисты компании Philips Lumileds в последнее время в новых сериях светодиодов стали использовать технологию lift-off, что позволило им повысить качество своих кристаллов и не отстать от конкурента, а по некоторым параметрам его превзойти.

Особо следует еще раз подчеркнуть, что именно разработчики Philips Lumileds, создав первый мощный светодиод Luxeon I, подарили миру реальность использования светодиодов в качестве источников света для осветительных приборов.

Литература

1. Юнович А. Э. Светодиоды на основе гетероструктур из нитрида галлия и его

твердых растворов // Светотехника. 1996. Вып. 5/6.

2. Туркин А. Н. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // Компоненты и технологии. 2011. № 5.
3. Туркин А. Н. Полупроводниковые светодиоды: история, факты, перспективы // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 5.
4. Туркин А. Н. Обзор развития технологии полупроводниковых гетероструктур на основе нитрида галлия (GaN) // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 6.
5. Золина К. Г., Кудряшов В. Е., Туркин А. Н., Юнович А. Э. Спектры люминесценции голубых и зеленых светодиодов на основе многослойных гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами // ФТП. 1997. Т. 31. № 9.
6. Туркин А. Н., Юнович А. Э. Измерения мощности излучения голубых и зеленых InGaIn/AlGaIn/GaN светодиодов с помощью фотопреобразователей из аморфного кремния // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 23.
7. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. М.: ФизМатЛит. 2008.
8. Юнович А. Э. Ключ к синему лучу, или о светодиодах и лазерах, голубых и зеленых // Химия и жизнь. 1999. № 5–6.
9. Тринчук Б. Ф. Светосигнальная аппаратура на светодиодах // Светотехника. 1997. № 5.