

# Высокоэффективные современные светодиоды

Юрий Давиденко (г. Луганск, Украина)

**В последние годы мы стали свидетелями стремительного развития области техники, основанной на физике полупроводников, – оптоэлектроники. Прежде всего, это проявилось в революционном совершенствовании светодиодов – твердотельных полупроводниковых источников света. Ещё недавно светодиоды были всего лишь устройствами индикации, а сегодня это уже высокоэффективные источники света, которые в ближайшее время преобразят мир искусственного освещения и заменят лампы накаливания.**

Интерес к светодиодам растёт быстрее, чем область их применения в современной электронике и светотехнике. Производители и потребители, продавцы и покупатели – все как будто замерли на старте, боясь отстать один от другого. Попробуем разобраться, почему светодиодам пророчат большое будущее.

## История создания светодиодов

В 1907 году английский инженер Х.Д. Раунд, трудившийся во всемирно известной лаборатории Маркони, случайно заметил, что у работающего детектора вокруг точечного контакта возникает свечение. Всерьез же заинтересовался этим физическим явлением и попытался найти ему практическое применение Олег Владимирович Лосев.

Обнаружив в 1922 году во время своих ночных радиовахт свечение кристаллического детектора, этот тогда ещё 18-летний радиолюбитель не ограничился констатацией факта, а незамедлительно перешёл к оригинальным экспериментам. Стремясь получить устойчивую генерацию кристалла, он пропускал через точечный контакт диодного детектора ток от батарейки. Лосев писал: «У кристаллов карборунда (полупрозрачных) можно наблюдать (в месте контакта) зеленоватое свечение при токе через контакт всего 0,4 мА... Светящийся детектор может быть пригоден в качестве светового реле как безынертный источник света» [1].

Весь мир заговорил об «эффекте Лосева», на практическое применение которого изобретатель успел по-

лучить до своей гибели в 1942 г. четырьмя патентами.

В 1951 г. центр по разработке «полупроводниковых лампочек», действующих на основе «эффекта Лосева», был создан в Америке, где его возглавил К. Леховец. В исследовании проблем, связанных со светодиодами, принял самое деятельное участие и «отец транзисторов» физик В. Шокли.

Вскоре выяснилось, что германий (Ge) и кремний (Si), на основе которых делаются полупроводниковые триоды (транзисторы), бесперспективны для светодиодов из-за слишком большой «работы выхода» и, соответственно, слабого испускания фотонов на p-n-переходе. Успех же сопутствовал монокристаллам из сложных соединений полупроводников – соединений галлия (Ga), мышьяка (As), фосфора (P), индия (In), алюминия (Al) и других элементов.

Однако реализованы на практике эти идеи были лишь в 60...70-е годы, после обнаружения эффективной люминесценции полупроводниковых соединений типа АІІІВ – фосфида (GaP) и арсенида (GaAs) галлия и их твёрдых растворов. В итоге на их основе были созданы светодиоды и таким образом заложен фундамент новой отрасли техники – оптоэлектроники.

Первые имеющие промышленное значение светодиоды с красным и жёлто-зелёным свечением были созданы в 60-е годы на основе структур GaAsP/GaP Ником Холоньяком (США). Внешний квантовый выход был не более 0,1%. Длина волны излучения этих приборов находилась в пределах 500...600 нм – области наи-

высшей чувствительности человеческого глаза, – поэтому яркость их жёлто-зелёного излучения была достаточной для целей индикации. Световая отдача светодиодов при этом составляла приблизительно 1...2 лм/Вт.

Дальнейшее совершенствование светодиодов проходило по двум направлениям – увеличение внешнего квантового выхода и расширение спектра излучения. Велик вклад в эту работу российских учёных, в частности, Ж.И. Алферова с сотрудниками, ещё в 70-е годы разработавших так называемые многопроходные двойные гетероструктуры, позволившие значительно увеличить внешний квантовый выход. Использовались гетероструктуры на основе арсенидов галлия-алюминия, при этом был достигнут внешний квантовый выход до 15% для красной части спектра (световая отдача до 10 лм/Вт) и более 30% – для инфракрасной. Показателен факт присуждения Ж.И. Алферову Нобелевской премии в 2000 году, когда стали очевидными важность и огромное значение его работ для развития науки и техники.

Долгое время развитие светодиодов сдерживалось отсутствием приборов, излучающих в синем диапазоне. Попытки реализовать синие и зелёные светодиоды и лазеры были связаны с использованием кристаллов нитрида галлия GaN и селенида цинка ZnSe.

У светодиодов на основе SiC оказался слишком мал КПД и низок квантовый выход излучения (то есть число излучённых квантов на одну рекомбинировавшую пару). У светодиодов на основе твёрдых растворов селенида цинка ZnSe квантовый выход был выше, но они перегревались из-за большого сопротивления и служили недолго. Оставалась надежда на нитриды.

Исследования свойств нитридов элементов группы III (AlN, GaN, InN) и их сплавов, представляющих собой широкозонные полупроводники с прямыми оптическими переходами, позволили заключить, что они явля-

ются наиболее перспективными материалами для изготовления свето- и лазерных диодов, излучающих во всей видимой и ультрафиолетовой (240...620 нм) областях спектра.

Основной причиной, препятствовавшей получению высококачественных пленок GaN, было отсутствие подходящих подложек, параметры решётки и коэффициент теплового расширения которых соответствовали бы GaN. Долгое время такие плёнки выращивали на сапфире (рассогласование решеток 13,5%), достоинствами которого являются лишь термическая стойкость и возможность очистки перед началом роста. Другая проблема – получение кристаллов р-типа. Первые работы в этом направлении были начаты ещё в 60-е годы XX века, однако все попытки надёжно внедрить элементы группы II (Mg, Zn, Be) как примеси замещения, которые бы действовали как акцепторы, завершились неудачей.

Ещё в 70-х годах группа Дж. Панкова (J. Pankove, RCA, Princetone, USA) из лаборатории компании IBM создала фиолетовые и голубые диоды на основе эпитаксиальных пленок нитрида галлия (GaN) на сапфировой подложке. Квантовый выход был достаточен для практики (доли процента), но срок их службы был ограничен. В р-области р-п-перехода концентрация дырок была мала, и сопротивление диодов из-за высокой концентрации дефектов оказалось слишком большим, они довольно быстро перегревались и выходили из строя. При этом Панкову так и не удалось осуществить легирование р-типа.

В начале 80-х годов Г.В. Сапарин и М.В. Чукичев в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова обнаружили, что после действия электронного пучка образец GaN, легированный Zn, становится ярким люминофором. Но причину яркого свечения – активацию акцепторов Zn под влиянием пучка электронов – тогда понять не удалось.

Эту причину раскрыл И. Акасаки (I. Akasaki) из Нагойского университета. Из многих его достижений выделим два основных, сделанных в 80-е годы XX века. Он предложил включить между сапфиром и активным слоем буферный слой AlN, что отчасти снимало проблему несоответствия решёток, и уже в 1986 году получил пленки GaN высокого качества. А в

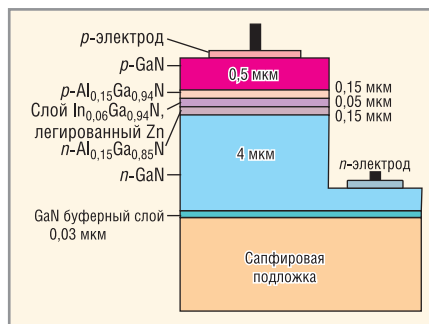


Рис. 1. Структура синего светодиода

1989 году счастливый случай помог ему вместе с его аспирантом Аmano (H. Amano) впервые изготовить образец р-типа. Изучая под электронным микроскопом легированную Mg плёнку GaN, Акасаки и Аmano обнаружили свечение образца после бомбардировки электронами. Завершив электронно-микроскопические исследования, они установили, что образец приобрёл проводимость р-типа, и связали это с воздействием электронного пучка на плёнку, способствовавшим замещению атомов Ga атомами Mg. Авторы заявили патент на эффективное легирование GaN р-типа. К тому времени большинство исследователей прекратили работать с GaN, и сообщение Акасаки почти не привлекло внимания. Но эти работы не оставил без внимания Шуджи Накамура (Shuji Nakamura) из фирмы Nichia Chemical, который и совершил прорыв в изготовлении голубых светодиодов.

Узнав о важном достижении Акасаки по получению материала р-типа, Накамура быстро воспроизвел этот результат, но при этом заметил, что облучение образца электронным потоком приводило к небольшому его нагреву, и предположил, что наблюдавшийся эффект мог быть просто результатом влияния температуры. Подвергнув образец отжигу в атмосфере азота, он обнаружил, что его сопротивление понизилось, и таким образом выяснил, что эффект был не следствием обработки пучком электронов, а результатом прогрева.

Свой первый синий светодиод Накамура изготовил 28 марта 1991 года. Он оставил диод включённым, когда уходил домой, а после бессонной ночи, придя рано утром в лабораторию, увидел, что диод ещё светит. И хотя излучение было не очень ярким, это была победа. Два с половиной года спустя после многочисленных улучшений Накамура изготовил диоды,

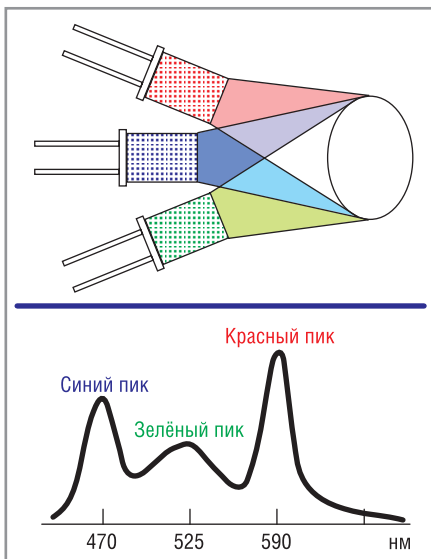
излучавшие с силой света 1000 мккд, а ещё через шесть месяцев компания объявила о выпуске 2000-мккд диода, который излучал настолько ярко, что на него больно было смотреть.

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 InGaN, легированным Zn (рис. 1). 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 счёт увеличения концентрации In в активном слое был изготовлен зелёный светодиод, излучавший с силой света 2 кд. Он состоит из 3-нм активного слоя InGaN, заключённого между слоями р-AlGaIn и n-GaN, выращенными на сапфире. Такой тонкий слой InGaN сводит к минимуму влияние рассогласования решёток: упругое напряжение в слое может быть снято без образования дислокаций и качество кристалла остаётся высоким. В 1995 году при ещё меньшей толщине слоя InGaN и более высоком содержании In удалось повысить силу света до 10 кд на длине волны 520 нм, а квантовую эффективность до 6,3%, причём измеренное время жизни светодиодов составляло 50 000 ч, а по теоретическим оценкам – более 10<sup>6</sup> ч (~150 лет!).

Накамура запатентовал ключевые этапы технологии, и к концу 1997 года фирма Nichia выпускала уже 10...20 млн. голубых и зелёных светодиодов в месяц. Дела компании стремительно понеслись вверх, доходы выросли с 20 млрд. иен в 1993 г. до 116 млрд. иен в 2002 и порядка до 180 млрд. иен в 2003.

На сегодняшний день внешний квантовый выход излучения светодиодов на основе GaN и его твёрдых растворов (InGaN, AlGaIn) достиг значений 29/15/12% соответственно для фиолетовых/голубых/зелёных 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 све-

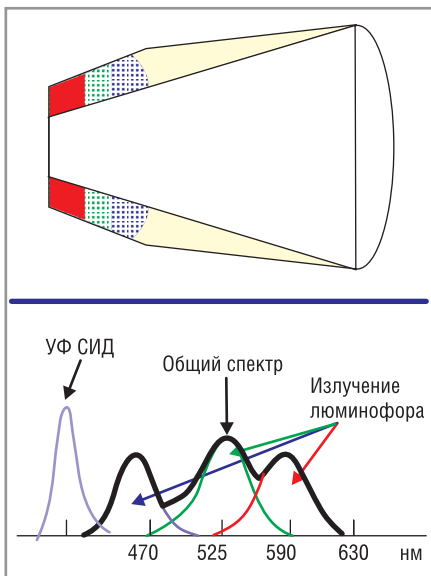


**Рис. 2.** Получение белого света путём смешивания излучения красного, зелёного и синего светодиодов

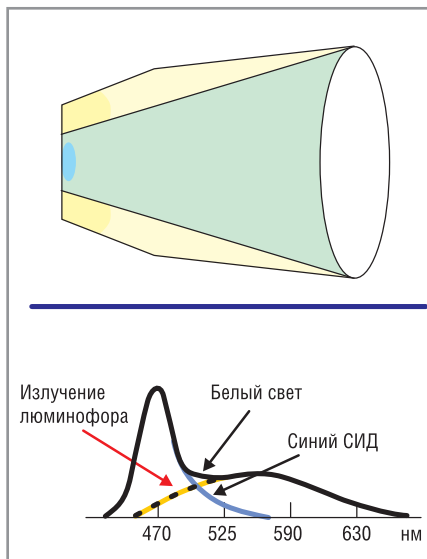
одиодов составляет 55%, а для синих 35%. Внешний квантовый выход излучения жёлтых и красных светодиодов на основе твёрдых растворов AlInGaP достиг значений 25...55%, а светоотдача соответственно достигла 100 лм/Вт, т.е. сравнялась со светоотдачей лучших современных люминесцентных ламп.

**Технологии создания белых светодиодов**

Изобретение синих светодиодов замкнуло «RGB-круг» и сделало возможным получение светодиодов белого свечения. Существует четыре способа создания белых СД, каждый со своими достоинствами и недостатками.



**Рис. 5.** Получение белого света с помощью ультрафиолетового светодиода и RGB-люминофора

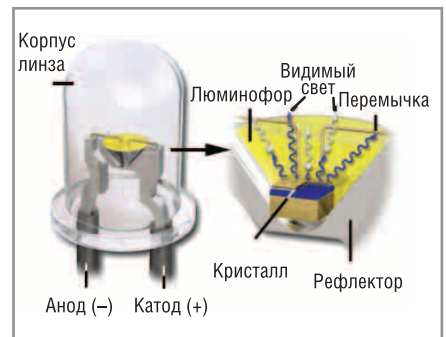


**Рис. 3.** Получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесённого на него слоя жёлтого люминофора

Один из них – смешение излучения СД трёх или более цветов. На рис. 2 показано получение белого света путем смешивания в определённой пропорции излучения красного, зелёного и синего светодиодов. В принципе такой способ должен быть наиболее эффективным. Для каждого из СД – красного, зелёного или голубого – можно выбрать значения тока, соответствующие максимуму его внешнего квантового выхода излучения. Но при этих токах и напряжениях интенсивности каждого цвета не будут соответствовать значениям, необходимым для синтеза белого цвета. Этого можно достигнуть, изменяя число диодов каждого цвета и составляя источник из многих диодов. Для практических применений этот способ неудобен, поскольку нужно иметь несколько источников различного напряжения, много контактных вводов и устройства, смешивающие и фокусирующие свет от нескольких СД.

Второй и третий способы – смешение голубого излучения СД с излучением либо жёлто-зелёного люминофора, либо зелёного и красного люминофоров, возбуждаемых этим голубым излучением. На рис. 3 показано получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесённого на него слоя жёлтого люминофора.

Эти способы наиболее просты и в настоящее время наиболее экономичны. Состав кристалла с гетероструктурами на основе InGaN/GaN подбирается так, чтобы его спектр из-



**Рис. 4.** Строение 5-мм светодиода, излучающего белый свет

лучения соответствовал спектру возбуждения люминофоров. Кристалл покрывается слоем геля с порошком люминофора таким образом, чтобы часть голубого излучения возбуждала люминофор, а часть – проходила без поглощения. Форма держателя, толщина слоя геля и форма пластикового купола рассчитываются и подбираются так, чтобы излучение имело белый цвет в нужном телесном угле. Сейчас исследуется около десятка различных люминофоров для белых СД. На рис. 4 показано строение 5-мм светодиода, излучающего белый свет.

Четвертый способ – смешение излучения трёх люминофоров (красного, зелёного и голубого), возбуждаемых ультрафиолетовым светодиодом. На рис. 5 показано получение белого света с помощью ультрафиолетового светодиода и RGB-люминофора.

Этот способ использует технологии и материалы, которые разрабатывались в течение многих лет для люминесцентных ламп. Он требует только два контактных ввода на один излучатель. Но этот способ связан с принципиальными потерями энергии при преобразовании света от диода в люминофорах. Кроме того, эффективность источника излучения уменьшается, т.к. разные люминофоры имеют разные спектры возбуждения люминесценции, не точно соответствующие УФ-спектру излучения кристалла СД.

Светоотдача белых СД ниже, чем светоотдача СД с узким спектром, поскольку в них происходит двойное преобразование энергии, часть её теряется в люминофоре. В настоящее время светоотдача лучших белых СД 25...30 лм/Вт.

Физические принципы действия СД и возможности технических разработок дают основание для оптими-

стических прогнозов. Теоретический предел светоотдачи белых СД составляет около 300 лм/Вт.

## ПРОИЗВОДИТЕЛИ СВЕТОДИОДОВ

Когда технология светодиодов обеспечит их конкурентоспособность по сравнению с обычными лампами, придётся сворачивать ламповое производство. В предвидении этого в разработки и организацию производства СД вкладывают средства такие гиганты светотехнической промышленности (выпускающие лампы накаливания и люминесцентные лампы), как General Electric, Philips, Osram. Как заметил Макаранд Чипалкатти, менеджер по маркетингу из подразделения Opto Semiconductors компании Osram Sylvania, специализирующегося на устройствах LED, производители светотехники сами уничтожат свой бизнес. Но если сегодня не «наступить на горло собственной песне», то завтра придут другие и сделают это куда более жёстко.

Кто же производит сегодня светодиоды?

Как уже упоминалось выше, рынок светодиодов расценивается как исключительно важный всеми производителями электронных компонентов, включая «китов» светотехнической индустрии.

В течение последних 5 лет светодиодный рынок устойчиво развивается, достигая 60% прироста товарной массы. По оценкам аналитиков ожидается, что к 2005 году ежегодный объём рынка составит более \$3 млрд.

Чтобы изготавливать качественные светодиоды в нужном количестве, понадобилось слияние двух отраслей – электронной и светотехнической. Все западные гиганты, производящие светодиоды для светотехники по полному циклу, начиная с производства чипов и заканчивая различными светодиодными модулями и сборками, а также светильниками на их основе, идут по этому пути. Количество заключённых стратегических альянсов, а также возникновение новых компаний, особенно тайваньских, специализирующихся на выпуске светодиодов, явно рекордное в последние годы, косвенно свидетельствует о серьёзном движении капиталов.

General Electric заключила союз с производителем полупроводниковых приборов Emcore, создав компа-

нию GEL Core. Philips Lighting совместно с Agilent, дочерней компанией Hewlett-Packard, создали предприятие LumiLeds. Osram объединяет усилия с полупроводниковыми предприятиями своей материнской компании Siemens.

Впрочем, существуют компании, специализирующиеся только на производстве чипов. Это предприятия радиоэлектронной промышленности, и они не занимаются светотехникой. К их числу относится Nichia Chemical.

Итак, перечислим основных производителей.

*Nichia Chemical*, Япония ([www.nichia.com](http://www.nichia.com)). Компания, впервые разработавшая СД синего и белого свечения на основе структур InGaN, сохраняет лидирующие позиции в производстве сверхъярких синих, зелёных и белых светодиодов.

*Lumileds Lighting*, США ([www.lumileds.com](http://www.lumileds.com)). Совместное предприятие Agilent Technologies и Philips Lighting. Производство сверхъярких светодиодов с повышенным током накачки, светодиодных сборок и модулей (Barracuda, Luxeon) очень высокой яркости. Lumileds Lighting является лидером в производстве сверхъярких мощных светодиодов всех цветов, включая белый. На данный момент Lumileds Lighting производит широкий ассортимент мощных светодиодов различной модификации под названием Luxeon и световых модулей на их базе.

*Agilent Technologies*, США ([www.agilent.com](http://www.agilent.com)). Отделение электронных компонентов компании Hewlett Packard, с 1999 г. – самостоятельная компания. Признанный лидер в разработке сверхъярких СД.

*Osram Optosemiconductors* (штаб-квартира компании находится в Германии, производственные мощности – в США и Малайзии) ([www.osram-os.com](http://www.osram-os.com)). Бывшее совместное предприятие Osram и Infineon Technologies, которое сейчас полностью принадлежит Osram. Производство сверхъярких светодиодов, в том числе для поверхностного монтажа. Очень широкая линейка светодиодных модулей (линейные, гибкие, круглые и др.).

Чипы и отдельные светодиоды производят компании: Cree ([www.cree.com](http://www.cree.com)), GEL Core ([www.gelcore.com](http://www.gelcore.com)), Vishay Semiconductors ([www.vishay.com](http://www.vishay.com)). На российском рынке (и рынке СНГ) хорошо известны также такие тай-

ваньские производители: Kingbright Electronics ([www.kingbright.com](http://www.kingbright.com), [www.kingbright-led.com](http://www.kingbright-led.com)), Ligitek Electronics ([www.ligitek.com](http://www.ligitek.com)), Para Light Electronics Co. ([www.para.com.tw](http://www.para.com.tw)).

Полный список фирм – производителей оптоэлектронных компонентов – можно посмотреть на сайте [http://www.itis.spb.ru/win/link\\_opt.htm](http://www.itis.spb.ru/win/link_opt.htm), а найти всех тайвано-китайских производителей можно на сайте [www.manufacturers.com.tw/search\\_keyword.php?st=1&sk=LED+lamp](http://www.manufacturers.com.tw/search_keyword.php?st=1&sk=LED+lamp).

Светодиоды, в том числе белого света, выпускаются и в России фирмами «Корвет-лайтс» ([www.corvette-lights.ru](http://www.corvette-lights.ru)), «Протон» ([www.proton.orel.ru](http://www.proton.orel.ru)), «Транс-Лед» ([www.transled.ru](http://www.transled.ru)), НПЦ ОЭП ОПТЭЛ ([www.optelcenter.com](http://www.optelcenter.com)), «Оптоника» ([www.optonica.ru](http://www.optonica.ru)), «Светлана Оптоэлектроника» ([www.svetlana-o.spb.ru](http://www.svetlana-o.spb.ru)).

По конструкции и технологическому исполнению наши светодиоды не уступают зарубежным, перечисленные компании имеют соответствующие патенты. В Москве и Санкт-Петербурге есть возможность выращивать собственные чипы – например, эпитаксиальная установка имеется в Санкт-Петербургском физтехе, – но для промышленного производства необходимо крупное финансирование, и пока наши компании используют зарубежные чипы.

Несколько слов об отличии основных показателей качества белых светодиодов – дешёвых и более дорогих, как правило, высококачественных, поставляемых на светодиодный рынок российскими и зарубежными компаниями – Nichia, Lumileds и др.

Обычно более дешёвым светодиодам присущи следующие особенности. В течение первых 4000 часов работы даже в нормальных климатических условиях происходит падение яркости на 35% из-за пожелтения светодиодной колбы из эпоксидного материала, потемнения металлического покрытия лунки отражателя, в которую помещён светодиодный чип, а также деградации излучательной способности как синего светодиодного чипа, так и нанесённого слоя люминофора. В качественных приборах эти проблемы сведены к минимуму и деградация яркости светодиода за 50 000 часов не превышает 20%.

Недобросовестные изготовители из Юго-Восточной Азии часто пользуются отсутствием у потребителя

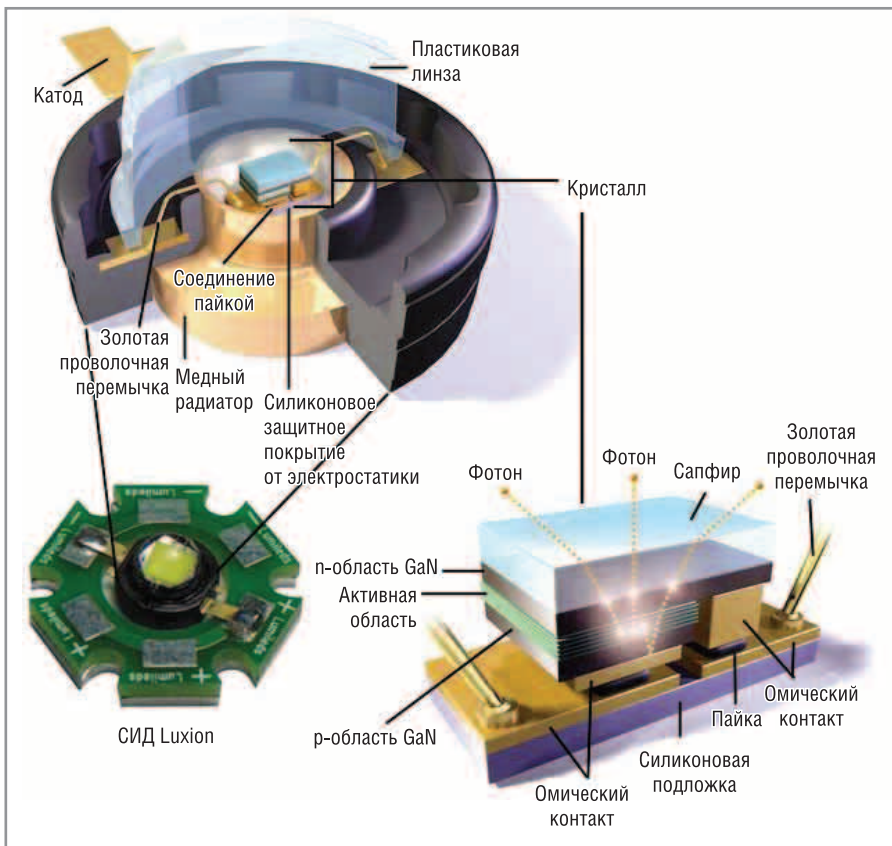


Рис. 6. Строение светодиода Luxeon III

средств измерений (кроме их собственных глаз), предлагая «слабую» группу вместо «сильной» по демпинговой цене. Так рождаются легенды о низких ценах. На самом деле цена соответствует качеству и действительным параметрам.

### Конструкции мощных светодиодов

Рассмотрим более подробно мощные высокоэффективные светодиоды белого света известных производителей. Конструкции мощных светодиодов основаны на следующих принципах:

- использованы высокоэффективные излучающие гетероструктуры в системах AlGaInP/GaAs, AlGaInP/GaP и InGaN (активная область гетероструктуры содержит либо одиночную, либо множественные квантовые ямы);
- излучающие кристаллы имеют площадь не менее 1 мм<sup>2</sup> (вместо 0,05 мм<sup>2</sup> в стандартных СИД диаметром 5 мм); увеличение площади кристалла направлено на увеличение рабочего тока, т.е. на увеличение светового потока и снижение теплового сопротивления кристалла;
- для увеличения светового потока в ряде конструкций применяются

несколько кристаллов, соединённых как последовательно, так и параллельно-последовательно;

- в качестве кристаллодержателя для улучшения теплоотвода используются мощные медные основания (радиаторы);
- для сбора и преобразования бокового излучения кристаллов применены соответствующие рефлекторы;
- для эффективного вывода излучения и формирования заданной диаграммы направленности излучения конструкции светодиодов содержат полимерную линзу, согласованную по размерам с отражателем бокового излучения, а также в некоторых конструкциях вторичную оптику.

На рис. 6 показано строение светодиода Luxeon III мощностью 3 Вт. Конструкция светодиода Luxeon обеспечивает эффективный отвод тепла от кристалла. Световая отдача белого светодиода Luxeon III при номинальном прямом токе 0,7 А составляет 25 лм/Вт, световой поток при этом равен 65 лм.

Светоотдача Luxeon III уже превосходит светоотдачу классических и галогенных ламп накаливания, и в ближайшее время Lumileds Lighting пла-



Рис. 7. Внешний вид белого светодиода Luxeon Star



Рис. 8. Излучатель Luxeon Side Emitting на основании Star

нирует вплотную подойти к выпуску люминесцентных ламп со светоотдачей 80...100 лм/Вт.

Светодиоды Luxeon делятся по электрической мощности на следующие серии:

- Luxeon – однокристалльные с прямым рабочим током 350 мА, мощность 1 Вт;
- Luxeon III – однокристалльные с прямым рабочим током 0,7...1 А, мощность 3 Вт;
- Luxeon V – четырёхкристалльные с прямым рабочим током 700 мА, мощность 5 Вт.

Варианты исполнения:

- Emitter – базовый элемент, единственный светодиод;
- Star – Emitter на теплоотводящем основании;
- Star/C – Emitter на квадратном теплоотводящем основании с разъемом;
- Star/O – Emitter с интегрированной вторичной оптикой;
- Star/IDC – Emitter на ромбовидном теплоотводящем основании.

На рис. 7 показан внешний вид белого светодиода Luxeon Star. Хорошо видно, что кристалл и рефлектор покрыты слоем жёлтого люминофора. На рис. 8 показан Luxeon Side Emitting на основании Star. Благода-



Рис. 9. Излучатели (слева направо): Luxeon Star/O с интегрированной вторичной оптикой, Luxeon Star и Luxeon Emitter

ря специальной конической линзе он имеет круговую диаграмму излучения. На рис. 9 показаны (слева направо) Luxeon Star/O с интегрированной вторичной оптикой, Luxeon Star и Luxeon Emitter.

Модуль Line представляет собой двенадцать светодиодов Star/O, закреплённых на основании в виде линейки (рис. 10). Модули Ring 6 и Ring 12 состоят соответственно из шести и двенадцати светодиодов Star/O, закреплённых на кольцевом основании (рис. 11). Модули Flood 12, Flood 18 – источники света, состоящие из 12 или 18 светодиодов, закреплённых на квадратном основании (рис. 12). Источники света DCC состоят из 11...40 светодиодов, закреплённых в ряд на основании в виде линейки. В одном устройстве находятся



Рис. 10. Модуль Line



Рис. 11. Модули Ring 6 и Ring 12

раздельно управляемые группы светодиодов красного, зелёного и синего цветов, что позволяет динамически изменять цвет в рамках цветового пространства RGB. Источники света этого типа предназначены для динамической подсветки, а также в качестве источников света для подсветки жидкокристаллических дисплеев. В таблице 1 приведены технические характеристики светодиодов белого света Luxeon.

Помимо Lumileds Lighting высокоэффективные мощные светодиоды выпускают и другие известные фирмы производители: Osram Optose-



Рис. 12. Модули Flood 12 и Flood 18



Рис. 13. Внешний вид светодиода Golden Dragon

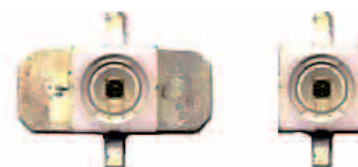


Рис. 14. Внешний вид светодиода Сила 3

miconductors выпускает серию Golden Dragon (рис. 13), Nichia выпускает серию Jupiter, АО «Протон» выпускает серию светодиодов СИЛА (рис. 14). В таблице 2 приведены технические характеристики мощных светодиодов белого света Osram, Nichia, «Протон». В таблице 3

Таблица 1. Технические характеристики светодиодов белого света Luxeon

Тип изделия	Исполнение	Световой поток, лм	Прямой ток номинальный, мА	Прямое напряжение номинальное, В	Угол излучения, градус	Цветовая температура излучения ССТ (номинальная), К
Luxeon						
LXHL-BW01 LXHL-PW01 LXHL-DW01		22...25	350	3,42	110	5500
Luxeon™ Warm White LXHL-BW03 LXHL-MWGC LXHL-NWGC8		20	350	3,42	110	3300
LXHL-BW02 LXHL-MWEC LXHL-MW1D LXHL-MWEA LXHL-NWE8		25	350	3,42	110	5500
Luxeon III						
LXHL-PW09	Emitter	65	0,7	3,7	140	5500
		80	1	3,9		
LXHL-LW3C	Star	80	1	3,9	140	5500
		65	0,7	3,7		
Luxeon V Portable						
LXHL-FW6C	Star Side Emitting	110	0,7	6,84	85	5500
LXHL-DW03	Emitter Side Emitting	110	0,7	6,84	85	5500
LXHL-PW03	Emitter Lambertian	120	0,7	6,84	120	5500
LXHL-LW6C	Star Lambertian	120	0,7	6,84	120	5500

Таблица 2. Технические характеристики мощных светодиодов белого света Osram, Nichia, «Протон»

Тип изделия	Световой поток, лм	Прямой ток номинальный, мА	Прямое напряжение номинальное, В	Угол излучения, градус	Производитель
Golden DRAGON™ LWW5SG	25	350	3,8	120	Osram Optosemiconductors
NICHIA JUPITER™ NCCW022	23	350	3,8	70	Nichia
NCCW023	23	350	3,8	35	
Сила 3 1П48	23	350	3,5	120	«Протон»
Сила 2 1П47	40	500	10,5	120	

Таблица 3. Технические характеристики стандартных 5-мм светодиодов белого света различных производителей

Тип изделия	Прямое напряжение номинальное, В	Сила света, при $I_{np} = 20$ мА, мКд	Угол излучения, градус	Производитель
L-513NWC-30D	3,5	3500...5900	30	Para Light Electronics
L-513LWC	3,5	5000	15	
L-5T3VW5C-D1	3,5	8500	18	
L-5T3VW5C-D2	3,5	7500	25	Nichia
NSPL500S	3,6	1800	50	
NSPL510S NSPW510BS	3,6	1800	50	
NEPW500BS	3,6	6400	20	
NSPW515BS	3,6	480	70	
W7114PWC/H	3,7	4000	20	Kingbright Electronics
L-7083PWW-H	3,7	1000	60	
LWK3333-3	3,5	1500	30	Ligitek Electronics
LWK3333-30	3,5	1500	30	
LWK3333	3,5	3000	16	
LWK3833	3,5	4000	12	
TLCW5100	3,9	4000 при $I_{np} = 30$ мА	18	Vishay Semiconductors
LC503PWH1-15G	3,6	5000	15	Cotco
КИПД80Б КИПД80Т-1Б	3,7	3000	23	«Протон»
КИПД 21 СЗ-Б	3,5	4000	20	«ТрансЛед»
10 мм У164-Бл	3,7	При $I_{np} = 30$ мА, 35 кд, 22 лм/Вт	8	ОПТЭЛ

приведены технические характеристики стандартных 5-мм светодиодов белого света различных производителей.



Рис. 15. Светодиодный светофор

### Сегодняшний день и перспективы полупроводниковых источников света

Преимущества светодиодов, кроме высокой световой отдачи, малого энергопотребления и возможности получения любого цвета излучения, заключаются в целом ряде других замечательных свойств.

Отсутствие нити накала благодаря нетепловой природе излучения светодиодов обуславливает длительный срок службы. Производители светодиодов декларируют срок службы до 100 000 часов. Напомню, что у ламп накаливания средний срок службы составляет 1000 часов, у люминесцентных в большинстве случаев срок службы ограничивается 10...15 000 ч. Отсутствие стеклянной колбы у светодиодов определяет очень высокую механическую прочность и надежность.

Малое тепловыделение и низкое питающее напряжение гарантируют



Рис. 16. Фонтан «Похищение Европы» на набережной Москва-реки напротив Киевского вокзала, подсвеченный 960 светодиодными излучателями

высокий уровень безопасности, а безынерционность делает светодиоды незаменимыми, когда нужно высокое быстродействие. Сверхминиатюрность и встроенное светораспределение определяют другие, не менее важные достоинства. Световые приборы на основе светодиодов оказываются компактными и удобными в установке.

Не следует забывать об экологичности светодиодов (отсутствии у них ртутьсодержащих компонентов по сравнению с люминесцентными лампами), а также отсутствии электромагнитных излучений и помех, что крайне важно в современных условиях ужесточения экологических норм.

Единственный недостаток светодиодов на сегодняшний день – их цена. Пока что один люмен, излученный светодиодом, стоит в 100 раз выше, чем галогенная лампа.

Во всех устройствах, требующих передачи информации знаками определенного цвета: автодорожных и железнодорожных светофорах (рис. 15), панелях управления в автомобилях и самолетах, задних огнях автотранспорта, дорожных световых табло, фонарях аэродромных полос, цветковые характеристики светодиодов имеют существенные преимущества перед обычными лампами. Они не требуют цветных светофильтров; они лучше различимы глазом, поскольку близки к монохроматическим источникам света. Как источники «цветного» света светодиоды давно обогнали лампы накаливания со светофильтрами. Так, световая отдача лампы накаливания с красным светофильтром составляет всего 3 лм/Вт, в то время как красные светодиоды сегодня дают 50 лм/Вт и более.

Особенно эффектно применение светодиодов для цветной подсветки архитектурных деталей и сооружений. На рис. 16 показан фонтан на

Таблица 4. Этапы развития полупроводниковых источников света по проекту американской программы освещения будущего

Характеристика источников света	Светодиодный источник 2002 г.	Светодиодный источник 2007 г.	Светодиодный источник 2012 г.	Светодиодный источник 2020 г.	Лампа накаливания	Люминесцентная лампа
Световая отдача, лм/Вт	25	75	150	200	16	85
Срок службы, тыс. ч	20	>20	>100	>100	1	10
Световой поток, лм/лампу	25	200	1000	1500	1200	3400
Входная мощность, Вт/ лампу	1	2,7	6,7	7,5	75	40
Стоимость 1 лм, \$	200	20	<5	<2	0,4	1,5
Стоимость 1 лампы, \$	5	4	<5	<3	0,5	5
Индекс цветопередачи, Ra	75	80	>80	>80	95	75
Выход на рынок и конкурентоспособность	Слабое освещение	Замена ламп накаливания	Замена люминесцентных ламп	Все применения		

площади Европы возле Киевского вокзала в Москве, подсвеченный 960 светодиодами светильниками, изменяющими свой цвет в ансамбле с музыкальным сопровождением изменения струй в фонтане.

Создание и разработка твердотельных светодиодных источников света является одной из самых горячих тем благодаря многочисленному и важному практическому применению, поэтому в эту область вкладываются огромные средства. Финансовый объём производства светодиодов достиг в 2002 г. \$500 млн. и, по прогнозам, превысит \$4 миллиарда в 2007 г.

В 1998 г. одиннадцать крупнейших японских компаний разработали программу «Свет в XXI веке» с финансированием на 4 года, но планированием задач до 2010 г. Эта программа поставила цель замены традиционных ламп накаливания и люминесцентных ламп светильниками нового типа на основе светодиодов белого свечения. Двухлетний отчет по этой программе был частично переведён на английский язык и опубликован в Интернете (<http://lighting.sandia.gov>) сотрудниками Национальной Лаборатории Sandia (США).

После этого была разработана американская программа создания твердотельного освещения Next Generation Lighting Initiative (<http://lighting.sandia.gov>) с перспективами развития до 2020 г. Программа предусматривает финансирование исследований, разработок и производства светодиодных источников света в размере \$50 млн. ежегодно вплоть до 2011 г. Авторы программы сравнивают её значение для Соединенных Штатов с программой ядерных исследований в 40-е годы (проект «Манхэттен»).

В таблице 4 показаны планируемые американской программой вехи развития источников света. Пред-

полагается, что в 2007 г. эффективность, срок службы и экономичность светодиодов будут достаточны для постепенной замены ламп накаливания, а в 2012 г. – для замены люминесцентных ламп. Экономия электроэнергии, расходуемой на освещение за предстоящие 20 лет, будет эквивалентна финансовой экономии в размерах от 60 до 120 млрд. долларов в зависимости от развития конкуренции с люминесцентными лампами.

Около 20% всей электроэнергии в мире расходуется на освещение: проблема энергосбережения – одна из важнейших проблем, связанная и с экономикой, и с охраной окружающей среды. Если будут осуществлены все прогнозы, связанные с исследованиями и разработками белых светодиодов, то расходы на электроэнергию для освещения уменьшатся приблизительно в два раза.

Судя по всему, в ближайшее время мы будем свидетелями неожиданных открытий и появления новых удивительных оптоэлектронных приборов и устройств.

## ГЛОССАРИЙ

**Квантовый выход** – число излучённых квантов света на одну рекомбинирующую электронно-дырочную пару. Различают внутренний и внешний квантовый выход. Внутренний – в самом p-n-переходе, внешний – для прибора в целом.

**Световой поток** – величина, характеризующая количество излучаемого света. Световой поток представляет собой мощность излучения, оцененную с позиции его воздействия на зрительный аппарат человека. Единица светового потока – люмен (лм).

**Светоотдача** – световой поток на единицу потребляемой мощности (лм/Вт). Этот параметр показы-

вает, сколько энергии, поступающей на светодиод, превращается в свет.

**Сила света** светодиода представляет собой величину светового потока, излучаемого вдоль выбранного направления в пространстве. Как правило, сила света излучателя зависит от направления излучения. Единица силы света – кандела (кд).

**Яркость** характеризует количество света, излучаемого в данном направлении, в отношении к площади излучающей поверхности. Яркость измеряется в канделах на квадратный метр (кд/м<sup>2</sup>).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лосев О.В. У истоков полупроводниковой техники: Изб. тр. Л., 1972.
2. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. М., 1983.
3. Коган Л.М. Светодиодные осветительные приборы. Светотехника. 2002. № 5. С. 16...20.
4. Алфёров Ж.И. Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32. № 1. С. 3...18.
5. Алфёров Ж.И. Физика и Жизнь. СПб., 2000.
6. Nakamura S., Fasol G. The Blue Laser Diode; GaN based Light Emitters and Lasers. Heidelberg, 1997.
7. Юнович А.Э. Свет из гетеропереходов. Природа. 2001. № 6. С. 38...46.
8. Юнович А.Э. Ключ к синему лучу, или о светодиодах и лазерах, голубых и зелёных. Химия и жизнь. 1999. № 5...6. С. 46...48.
9. Light Emitting Diodes for General Illumination. Tutorial Materials. Ed. J.I. Tsao. OIDA, 2002; <http://lighting.sandia.gov>.
10. [lighting.sandia.gov](http://lighting.sandia.gov).
11. [www.luxeon.com](http://www.luxeon.com).
12. [www.lumileds.com](http://www.lumileds.com).
13. [www.corvette-lights.ru](http://www.corvette-lights.ru).
14. [www.proton.orel.ru](http://www.proton.orel.ru).
15. [www.osram-os.com](http://www.osram-os.com).
16. [www.nichia.com](http://www.nichia.com).

