

Андрей Туркин |

Полупроводниковые светодиоды:

история, факты, перспективы

В настоящей статье приводится исторический обзор работ по полупроводниковым светодиодам, уже в настоящее время ставшими источниками света, которые производятся в промышленных масштабах для самых разных применений. Светодиоды эффективны, имеют малые размеры и длительный срок службы. В последнее время они стали рассматриваться как самые перспективные источники света для осветительных приборов.

Введение

О светодиодах опубликовано много статей, сделаны тысячи докладов на конференциях, написаны сотни диссертаций, патентов и научных отчетов, изданы десятки брошюр и несколько книг. Все это обусловлено бурным развитием физики и технологии светодиодов — важнейшего направления в современной полупроводниковой электронике и оптоэлектронике, широко применяющегося в промышленности и обещающего новые применения в ближайшем будущем.

Особенно стоит отметить период 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]. Эффективные светодиоды, разработанные на основе этих материалов, перекрыли коротковолновую часть видимого спектра — от ультрафиолетовой до желтой области [1, 2]. Одновременно существенно улучшилась и эффективность светодиодов на основе гетероструктур и других полупроводниковых соединений типа АІІВV — от желто-зеленой до ближней инфракрасной области. Как следствие, светодиоды стали перспективными источниками света не только для сигнализации, отображения и передачи информации, но и для общего освещения. То, что казалось фантастикой и далекой перспективой, стало реальностью.

Светодиоды. Классификация

В корпусе светодиода может находиться один (однокристалльные светодиоды) или несколько кристаллов (многокристалльные светодиоды, или матрицы).

Современные светодиоды (СД) можно условно разделить на несколько основных групп по потребляемой мощности и рабочему диапазону токов: индикаторные, сверхъяркие и мощные.

Индикаторные СД — компактные светодиоды, имеющие относительно небольшую силу света

(до 100 мкд). Рабочий диапазон тока около 20 мА. Они обычно выпускаются в стандартном корпусе с выводами (диаметр основания 3 или 5 мм). В основном такие светодиоды применяются в оптических индикаторах.

Сверхъяркие СД обычно собираются на полупроводниковых кристаллах малого и среднего размера (от 200×200 до 500×500 мкм) и имеют высокие световые характеристики (сила света до 10 кд, средний световой поток в белом цвете порядка 20–30 лм и более). Рабочий диапазон токов от примерно 20 до 150–200 мА. Могут быть выполнены в стандартном корпусе с выводами (диаметр основания 3, 5 или 10 мм) или в корпусе для поверхностного монтажа (SMD-светодиоды). Стоит заметить, что сверхъяркие СД занимают промежуточное положение между индикаторными и мощными, и четкую границу здесь на самом деле провести достаточно трудно.

Сверхъяркие СД имеют широкий спектр применений — световая реклама, дорожные светофоры и указатели, автомобильная светотехника, экраны, мобильные телефоны и т. д.

Мощные СД имеют самые большие размеры кристаллов и наибольшие значения световой отдачи (более 50 лм/Вт для белого цвета). Потребляемая мощность в номинальном режиме (ток 350 мА) составляет около 1 Вт. Допускается применение при токах 500, 700, 1000 мА и выше. Повышение рабочего тока позволяет увеличить световой поток. Выпускаются в корпусе для поверхностного монтажа (SMD-корпусе). Основным применением мощных светодиодов является различное осветительное оборудование.

Отдельно стоит остановиться на светодиодных модулях. СД-модули представляют собой сборку из многих кристаллов, соединенных в последовательно-параллельные цепочки на одной плате. Выпускаются в виде плат с контактами для пайки и отверстиями для крепления. Могут иметь встроенные драйверы питания на плате. Основным их применением является также осветительное оборудование.

В последнее время светодиоды стали классифицировать и по применению. Стоит несколько слов сказать о новом понятии, введенном западными производителями, — светодиодами для освещения (Lighting Class LED). Эти светодиоды должны удовлетворять определенным требованиям к световому потоку и цветовой температуре. В частности, как декларируется ведущими производителями, световой поток таких светодиодов не должен снижаться более чем на 30% от начального значения за 50 000 часов работы, а также изменение цветовой температуры не должно быть визуально заметно.

Открытие и первые разработки. Светодиоды на основе карбида кремния (SiC)

Впервые излучение света полупроводниковыми структурами было экспериментально обнаружено в начале XX в. В 1907 г. Генри Джозеф Раунд проверял возможность применения кристаллов карбида кремния (SiC), или, как его тогда называли, — карборунда, в качестве выпрямляющих твердотельных детекторов. Позднее эти детекторы получили название «кристаллических детекторов». Они использовались как демодуляторы радиочастотных сигналов в первых радиоприемниках. Работа кристаллических детекторов была впервые продемонстрирована в 1906 г. В то время структуры типа «кристалл–точечный металлический контакт» часто исследовались в поисках альтернативы дорогим вакуумным диодам, впервые появившимся в 1904 г. и потреблявшим много электрической энергии. При работе с кристаллами карборунда Раунд заметил свечение [3]. Фактически именно с этого момента и начинается история светодиодов. Правда, в те времена не существовало точных методов определения свойств материалов, что не дало возможности объяснить физику процесса излучения света. Тем не менее Раунд немедленно доложил о своих наблюдениях редакторам журнала «Электрический мир» [3].

В 1928 г. Олег Владимирович Лосев опубликовал результаты своих исследований явления люминесценции, наблюдаемого в выпрямляющих диодах на основе SiC, используемых в качестве демодуляторов в радиосхемах, на переходах металл–полупроводник. Данные эксперименты он проводил в 1923 г. Лосев

пользуемых в электронных схемах в качестве ключей и усилителей. Именно тогда инженеры и исследователи осознали, что полупроводники являются лучшими материалами для изготовления излучающих устройств.

GaP относится к непрямым полупроводникам, в которых вероятность межзонных переходов, происходящих с сохранением импульса, пренебрежимо мала, поэтому излучательная рекомбинация в них проходит, как правило, через примесные центры. Введение в GaP оптически активной изоэлектронной примеси, например азота (N), позволяет значительно повысить вероятность излучательной рекомбинации в полупроводнике за счет того, что эта примесь создает в запрещенной зоне промежуточный энергетический уровень, с которого электрону гораздо легче рекомбинировать с дыркой. Наличие таких «глубоких» примесных центров повышает вероятность оптических переходов [3].

В конце 1960-х годов была разработана технология получения GaP-пластин из расплавов при высоких температурах и давлениях. Из таких пластин при помощи резки формировались подложки, какие используются и в настоящее время. При легировании GaP изоэлектронными примесями, содержащими N, такими как GaN, были изготовлены светодиоды зеленого свечения, КПД которых превысил 0,6% [3]. Хотя внешний квантовый выход светодиодов зеленого свечения меньше, чем у светодиодов красного свечения, восприимчивость человеческого глаза к зеленому цвету в 10 раз выше, чем к красному, поэтому кажущаяся (субъективная) яркость обоих типов светодиодов является сравнимой [3]. Светодиоды на основе GaP получили достаточно широкое распространение и применялись в основном в качестве индикаторов в бытовой технике, системных блоках и мониторах персональных компьютеров. На рис. 2 показан телефон, где для освещения ночной панели используются светодиоды на основе GaP желто-зеленого цвета свечения.



Рис. 2. Использование светодиодов на основе GaP желто-зеленого цвета свечения для освещения кнопочной панели телефона

Над разработкой светодиодов видимого диапазона оптического спектра с КПД, превышающим КПД GaAsP-светодиодов, трудились и другие компании, такие как IBM, RCA и GE [3]. Следует отметить, что в 1960-х гг. монохроматические цвета получались в основном при фильтрации света от ламп накаливания,

поэтому свечение светодиодов, обладающих узкой спектральной линией излучения, казалось наблюдателям действительно очень чистым.

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 системой для изготовления светодиодов повышенной яркости, излучающих свет в данном интервале длин волн. Такая система материалов была разработана в Японии для лазеров, работающих в видимом диапазоне оптического спектра [3]. Поскольку ширина запрещенной зоны InGaP составляет около 1,9 эВ (650 нм), этот материал может использоваться для изготовления светодиодов и лазеров, излучающих свет в красной области видимого спектра [3]. Такие лазеры применяются, например, в лазерных указках и DVD-проигрывателях. На рис. 3 показан пример применения красных светодиодов на основе InGaP в дисплее электронных наручных часов.



Рис. 3. Наручные электронные часы с индикаторными светодиодами на основе GaAsP красного цвета свечения

Добавление Al к активной области InGaP позволяет сместить излучение в сторону более коротких длин волн, захватывая оранжевый и желтый спектральные диапазоны. Однако $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P$ при $x \approx 0,53$ становится непрямым полупроводником, что приводит к сильному снижению его КПД на длинах волн, меньших или равных 600 нм. Следовательно, этот материал не подходит для изготовления высокоэффективных светодиодов, излучающих свет с длинами волн ниже 570 нм [3].

Первые AlInGaP-лазеры появились в начале 80-х гг., а развитие AlInGaP-светодиодов началось в конце десятилетия. В отличие от AlInGaP-лазеров, в структуру светодиодов обычно входят слои растекания тока, которые вводятся для того, чтобы светилась только плоскость *p-n*-перехода, но не область, расположенная ниже верхней части омического контакта [3]. Дальнейшие усовершенствования AlInGaP-светодиодов были связаны с созданием в активной области, состоящей из нескольких квантовых ям, распределенных отражателей Брэгга и технологии изготовления прозрачных

GaP-подложек [3, 15]. Светодиоды на основе структур AlInGaP получили достаточно широкое распространение и применялись не только для индикации, но и в отображении информации. На рис. 4 показаны различные применения таких светодиодов: в информационных панелях и табло, бегущих строках, светофорах и т. д.



Рис. 4. Примеры применений светодиодов на основе AlInGaP-структур желтого и красного цвета свечения

Светодиоды на основе структур AlInBV: GaN и его твердые растворы

Для создания светодиодов более коротковолнового излучения, в синей и зеленой области, нужно было найти материал с более высоким значением ширины запрещенной зоны. Таким материалом стал GaN.

Исследования, начатые в 30–40-х гг. XX в. в Принстонском университете США, были продолжены в лаборатории компании RCA [3]. Для получения данного материала использовали реакцию аммиака с жидким галлием, протекающую при повышенной температуре. В качестве подложки для выращивания структур GaN выбрали сапфир (Al_2O_3). Исследование пленок 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 [3, 16]. Сначала решили, что для этих целей хорошо подойдет цинк, применяемый при работе с GaAs и GaP. Однако оказалось, что при высоких концентрациях Zn GaN-пленки становятся диэлектриками, а не проводниками *p*-типа. Причина этого была в том, что не удавалось активировать акцепторы Zn для создания *p*-типа проводимости [3, 16].

В январе 1970 г. в работу по созданию светодиодов на основе пленок из GaN в лаборатории RCA включился Жак Панков. Он занялся исследованием процессов оптического поглощения и фотолуминесценции в тонких GaN-пленках. Летом 1971 г. было опубликовано сообщение о первом явлении электролюминесценции, наблюдаемом на образце из пленки GaN. Эти МДП-структуры стали первыми светодиодами на основе GaN. Исследуемый образец, состоявший из сильно легированного цинком GaN-слоя с двумя поверхностными электродами, излучал свет голубого цвета с длиной волны 475 нм. После этого Панков с коллегами создали структуру из нелегированного GaN-слоя (слоя *n*-типа), слоя сильно легированного Zn

(диэлектрического слоя) и поверхностного контакта из In. Такой диод со структурой металл–диэлектрик–полупроводник (с МДП-структурой) был первым светодиодом на основе GaN, излучающим свет зеленого и голубого цвета [3, 16].

В дальнейшем технологи заменили цинк магнием. В результате этого удалось получить структуру, излучающую свет в голубом и фиолетовом диапазоне — с длиной волны 430 нм. Следует, правда, отметить, что полученные исследователями в 70-х гг. пленки GaN, легированные магнием, не обладали проводимостью *p*-типа, а также являлись диэлектриками, поэтому люминесценция в них протекала либо за счет инжекции неосновных носителей, либо за счет ударной ионизации диэлектрических слоев структуры в сильном электрическом поле [3, 16, 17]. К сожалению, такие светодиоды обладали очень низким квантовым выходом и эффективностью, поэтому работы по GaN были приостановлены почти на десять лет.

После того как группа Панкова закончила исследования по изучению GaN-пленок, работы по созданию GaN-светодиодов были остановлены, поскольку такие светодиоды обладали очень низкой эффективностью.

В 80-х гг. работ по GaN в Европе и США практически не было. Но их продолжали вести исследователи в Советском Союзе и Японии.

В начале 80-х гг. приоритетными были работы исследователей из МГУ им. М. В. Ломоносова — Г. В. Сапарина и М. В. Чукичева — по активации люминесценции в GaN, проводившиеся на физическом факультете [16, 18–20], и работы исследовательской группы В. Г. Сидорова в Ленинградском политехническом институте (ныне Санкт-Петербургский технический университет) [21]. Очень близки к получению материала с устойчивой проводимостью *p*-типа были в 1982 г. Сапарин и Чукичев, которые показали, что можно активировать акцепторы при облучении структур GaN электронным пучком.

В конце 80-х гг. работы были продолжены в Японии. В 1989 г. Исаму Акасаки и Хироши Аmano с коллегами из Университета Нагойи продемонстрировали первый светодиод на основе GaN со слоем *p*-типа проводимости. Чуть позднее, в 1992 г., они опубликовали статью о создании первого светодиода на основе GaN с гомогенным *p-n*-переходом [3, 16, 22, 23]. Данный светодиод излучал свет в ультрафиолетовом и синем спектральном диапазонах. Стойкие акцепторы магния активировались при облучении структур GaN электронным пучком; возможность этого в GaN-структурах с акцепторами цинка показали в своих работах исследователи из МГУ им. М. В. Ломоносова в начале десятилетия. Дополнительное легирование *p*-слоя GaN позволяет улучшать эффективность активации глубоких акцепторов [1, 16, 22, 23].

Буквально через год 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



Рис. 5. Светодиоды на основе InGaN/GaN-гетероструктур голубого цвета свечения

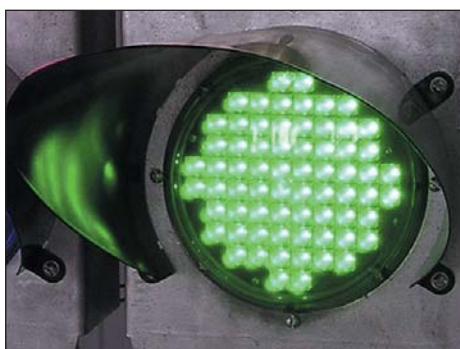


Рис. 6. Применение зеленых светодиодов на основе InGaN/GaN-гетероструктур в светофорах

магния путем высокотемпературного отжига, получили первые светодиоды синего, голубого (рис. 5) и зеленого (рис. 6) цвета свечения [3, 16, 24, 25]. Светодиоды эти были изготовлены на основе гетероструктур GaN и его твердых растворов InGaN и AlGaIn голубого и зеленого цвета свечения, КПД этих светодиодов достигал 10% [16, 26].

Исследователи фирмы Nichia показали также, 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, 16]. Как результат сложения сигналов в указанных диапазонах получается белый цвет свечения.

Полученные результаты дали импульс развитию работ во всем мире. Первые светодиодные структуры на основе GaN исследовались разными группами ученых в различных институтах, университетах и исследовательских центрах США, в странах Азии и Европы, в том числе и в России [1, 27, 28]. Первые структуры, несмотря на указанный достаточно высокий квантовый выход, содержали большое количество примесей и дефектов [1, 2, 16, 27, 28], что снижало их эффективность. В спектрах синих светодиодов при низких значениях прямого тока наблюдалась туннельная полоса под действием сильных электрических полей в активной области, обусловленных флуктуацией потенциала и кулоновскими полями примесей [16, 27]. Аналогичные туннельные

составляющие наблюдались и на вольт-амперных характеристиках [16, 27]. При обратном напряжении, равном примерно $3E_g$, в структурах синих светодиодов наблюдался ионизационный пробой и ударная ионизация, при которых также отмечалось свечение [16, 28]. В спектрах наблюдалась широкая полоса в диапазоне энергии квантов 2,2–2,3 эВ, что соответствовало «желтой полосе» дефектов в GaN, связанной с донорно-акцепторными парами и/или двойными донорами [16, 28].

Вслед за компанией Nichia технологию выращивания светодиодных кристаллов на подложках из сапфира (Al_2O_3) стали применять и другие компании. Развитие шло довольно быстрыми темпами. Постепенно концентрации дефектов и дислокаций в структурах уменьшались, тем самым улучшалось их качество. На сегодня многие компании выпускают светодиодные кристаллы на основе гетероструктур GaN и его твердых растворов, выращенных на подложках Al_2O_3 , синего цвета свечения, с КПД порядка 40–45%.

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). Компания Cree, основанная в 1987 г. как производитель полупроводниковых материалов на основе SiC, начала активные исследования по разработке светоизлучающих структур GaN и его твердых растворов на SiC-подложках в начале 90-х гг. прошлого века. С 2005 г. две компании — Nichia и Cree — обеспечивают более 80% мирового производства кристаллов синего и зеленого излучений. При этом Cree традиционно использует технологию эпитаксиального выращивания GaN на SiC-подложках, а Nichia Corporation — на подложках из Al_2O_3 .

Технология выращивания GaN на SiC имеет ряд принципиальных преимуществ перед технологией GaN на сапфире. Во-первых, SiC обладает на порядок большей теплопроводностью (3,8 Вт/см·К у SiC против 0,3 Вт/см·К у Al_2O_3). Это упрощает решение проблемы отвода тепла от активной области кристалла (*p-n*-перехода), являющейся ключевой для кристаллов с токами более 100 мА. Во-вторых, кристаллическая решетка 6H-SiC обладает лучшим, по сравнению с сапфиром, средством с GaN, что принципиально снижает концентрацию дефектов и дислокаций в структуре GaN и повышает квантовый выход кристаллов [16, 29]. В-третьих, SiC, являясь полупроводником, позволяет разрабатывать на своей основе кристаллы с вертикальным механизмом протекания тока, что приводит к уменьшению сопротивления структур и снижению величины рабочего напряжения и, как следствие, снижению потребляемой мощности.

Для нового семейства кристаллов, разрабатываемого компанией Cree с 2004 г., удалось добиться отличных показателей эффективности. Квантовый выход кристаллов малого размера (приблизительно 0,3×0,3 мм) составил 55–75%, а у больших кристаллов (1×1 мм) типичный квантовый выход равен 40–55%. Кроме того, за счет вертикального протекания тока и улуч-

шения контактной системы удалось получить прямое падение напряжения на кристалле при номинальном токе на 20% ниже, чем у других производителей [16, 29].

Новое семейство кристаллов имеет ряд принципиальных технологических отличий, как, например, стравливание части SiC-подложки, толщиной до 0,035 мм, через маску с образованием линзовой системы, которая обеспечивает соби́рание светового потока с поверхности структуры и формирует стандартную кривую силы света, что упрощает нанесение люминофора на кристалл при производстве СД белого цвета свечения [16, 29]. Применение новой контактной системы позволило увеличить площадь поверхности излучения до 90%, а параллельное соединение перемычек контактов катода дополнительно вдвое снизило потери проводимости при повышенных значениях плотности [16, 29].

Мощные светодиоды

В 2003 г. компанией Lumileds, образованной за несколько лет до этого корпорациями Philips и Hewlett Packard, был сделан первый мощный светодиод Luxeon I со световым потоком более 25 лм и световой отдачей более 20 лм/Вт. 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.

Одной из основных особенностей корпуса мощного светодиода является теплоотводящее основание, на которое осуществляется монтаж кристалла. Чаще всего кристалл монтируется в отражатель, находящийся на данном основании. Объем отражателя со смонтированным в нем полупроводниковым кристаллом заполняют оптическим гелем. Это, с одной стороны, 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.

Теплоотводящее основание и заполненный гелем отражатель позволяют кристаллу в таком корпусе работать при более высокой температуре, а следовательно, и при повышенных значениях тока. Сверху заполненный гелем отражатель закрывается линзой, которая у разных производителей может быть изготовлена из различных материалов — пластика, кварцевого стекла или полимерных материалов (силикона и т. д.). 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 светодиодов в корпусе SMD обеспечивает достаточно широкие углы кривой светораспределения, обычно более 90°.

В середине 2004 г. подразделение Cree Lighting компании Cree Inc. выпустило свою первую серию мощных светодиодов XL7090, свето-

вой поток которых составлял порядка 55 лм, а световая отдача была около 50 лм/Вт. Эти светодиоды сразу встали в один ряд с аналогами конкурентов — светодиодами компаний Nichia и Lumileds. В 2006 г. Cree Lighting разработала и запустила в производство серию мощных белых светодиодов — XR-E7090. Световой поток их достигал значений 100 лм, а световая отдача была до 90 лм/Вт.

К середине 2007 года стали доступны мощные светодиоды с оттенками свечения в холодном (5000–10 000 К), естественном (3700–5000 К) и теплом (2600–3700 К) белом диапазоне (рис. 7).

На сегодня наилучшими из достигнутых являются значения световой отдачи более 130 лм/Вт в диапазоне цветовых температур 4000–8300 К. Это значение получено компанией Cree на светодиодах серии XR-G, запущенных в массовое производство осенью 2009 г. Постепенно к этому уровню подходят и другие производители мощных светодиодов. В феврале 2010 г. Cree заявила о получении на лабораторных образцах значения световой отдачи более 200 лм/Вт при цветовой температуре 4570 К. Это достижение является пока рекордным для светодиодов.



Рис. 7. Светодиоды Cree холодного, естественного и теплого белого цвета

Заключение

Предлагаемый читателю краткий экскурс в историю показывает, что светодиоды все более активно входят в нашу жизнь. Говорить о них как о будущих потенциальных источниках света начали в середине 90-х гг. XX в. с появлением белых светодиодов и продолжили в начале этого века с появлением первых мощных светодиодов.

Еще раз остановимся на некоторых фактах. В середине 90-х гг. прошлого века СД перекрывают весь видимый диапазон, сразу начинается их применение в светофорах, бегущих строках, экранах, рекламе. В начале 2000-х появляются первые мощные светодиоды со световой отдачей 25 лм/Вт, превышающей почти вдвое световую отдачу ламп накаливания. Как следствие, начинается применение светодиодов в качестве источников света в архитектурно-художественном освещении, где ими заменяют лампы накаливания. В 2006–2007 годах мощные светодиоды перекрывают весь белый диапазон и становятся доступны не только холодного, но естествен-

ного и теплого оттенков. Одновременно с этим начинаются первые проекты по внедрению светодиодов в качестве источников света в осветительных устройствах.

Сейчас световая отдача лабораторных образцов светодиодов некоторых производителей достигла значения 200 лм/Вт. Стоит ли ждать в скором времени массового применения светодиодов в качестве источников света в осветительных устройствах? Ближайшее будущее должно дать ответ на этот вопрос. Однако уже сейчас существуют программы по внедрению светодиодов в качестве источников света в освещение во всем мире (LED City в США, локальные программы переоборудования освещения в городах Европы). Есть такие программы и в России. Среди них стоит выделить «Новый свет». Это важнейшая часть президентской программы модернизации экономики, направленной на энергосбережение и энергоэффективность. Частью данной программы должно стать массовое производство светодиодов и внедрение светодиодных светильников. Также надо отметить отраслевые инициативы, например программу ОАО РЖД по внедрению светодиодного освещения объектов в рамках общей отраслевой программы энергосбережения.

Существуют и факторы, стимулирующие внедрение светодиодов на законодательном уровне. Здесь можно назвать «Технический регламент о безопасности низковольтного оборудования» от 27 декабря 2009 г. № 347-ФЗ. Этот закон принят Госдумой РФ и одобрен Советом Федерации России в декабре 2009 г. Также приняты изменения и дополнения № 1 в СанПиН 2.2.1/2.1.1.2585-2010, где светодиоды одобрены к применению в качестве источников света с некоторыми ограничениями. Данные изменения зарегистрированы в Минюсте РФ, утверждены главным санитарным врачом РФ и вступили в силу 15 марта 2010 г. В апреле 2011 г. приняты и утверждены изменения в СНиП-23-05-95 в виде нового свода правил — СП 52.13330.2011, где светодиоды также разрешены к использованию. Этот документ введен в действие с 20 мая 2011 г. Также принят ФЗ № 261 от 23 ноября 2009 г., который запрещает государственным заказчикам приобретать ЛН мощностью более 100 Вт с 1 января 2011 г.

Все указанные факторы должны способствовать ускорению внедрения светодиодов в светотехнические устройства уже в ближайшее время. ●

Литература

1. Юнович А. Э. Светодиоды на основе гетероструктур из нитрида галлия и его твердых растворов // Светотехника. 1996. №5, 6.
2. 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.
3. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. М.: ФизМатЛит. 2008.

4. Лосев О. В. У истоков полупроводниковой техники: избранные труды. Л.: Наука. 1972.
5. Павличенко В. И., Рыжиков И. В., Кмита Т. Г., Карагеоргий-Алкаев П. М., Лейдерман А. Ю. Электролюминесценция диодов из карбида кремния // ФТП. 1996. Т.8. № 4.
6. Violin E. E., Kalnin A. A., Pasyukov V. V., Tairov Y. M., Yaskov D. A. Silicon Carbide – 1968 // 2-nd International Conference on Silicon Carbide. Special Issue of Material Research Bulletin. 1969.
7. Edmond J. A., Kong H. S., Carter Jr. C. H. Blue LEDs, UV photodiodes and high-temperature rectifiers in 6H-SiC // Physica B. 1993.
8. Полищук А. Г., Туркин А. Н. Концепция применения светильников со светодиодами в целях реализации программы энергосберегающего освещения // Компоненты и технологии. 2007. № 11.
9. Pankove J. I., Berkeyheiser J. E. A light source modulated at microwave frequencies // Proc. IRE. 1962.
10. Pankove J. I., Massoulié M. J. Injection luminescence from GaAs // Bull. Am. Phys. Soc. 1962.
11. Hall R. N., Fenner G. E., Kingsley J. D., Soltys T. J., Carlson R. O. Coherent light emission from GaAs junctions // Phys. Rev. Lett. 1962.
12. Nathan M. I., Dumke W. P., Burns G., Dill Jr. F. H., Lasher G. J. Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions // Appl. Phys. Lett. 1962.
13. Quist T. M., Rediker R. H., Keyes R. J., Krag W. E., Lax V., McWhorter A. L., Zeigler H. J. Semiconductor maser of GaAs // Appl. Phys. Lett. 1962.
14. Holonyak Jr. N., Bevacqua S. F. Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions // Appl. Phys. Lett. 1962.
15. Kish F. A., Fletcher R. M. High Brightness Light-Emitting Diodes // Semiconductors and Semimetals. Academic Press, San Diego. 1997.
16. Туркин А. Н. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // Компоненты и технологии. 2011. № 5.
17. Pankove J. I., Lampert M. A. Model for electroluminescence in GaN // Phys. Rev. Lett. 1974.
18. Четверикова И. Ф., Чукичев М. В., Храмов А. П. Оптические свойства нитрида галлия // Обзоры по электронной технике. 1982. Сер. 6. Вып. 1, 8.
19. Сапарин Г. В., Обыден С. К., Четверикова И. Ф., Чукичев М. В. Об аномальной кинетике катодолюминесценции в GaN // Бюлл. МГУ. Сер. 3. Физика и астрономия. 1983. Т. 24. № 3.
20. Перловский Г. В., Обыден С. К., Сапарин Г. В., Попов С. И. Температурная релаксация катодолюминесценции, стимулированной электронным пучком в GaN:Zn // Бюлл. МГУ. Сер. 3. Физика и астрономия. 1984. Т. 25. № 3.
21. А. с. № 699967 (СССР) Н01L 33.00. Источник света / М. Д. Шагалов, В. Г. Сидоров, А. Г. Дрижук, В. М. Андреев, В. Л. Оплеснин. №2628156/18-25. Приор. 14.06.1978.
22. Akasaki I., Amano H., Itoh K., Koide N., Manabe K. GaN based UV/blue light-emitting devices // GaAs and Related Compounds conference. 1992.
23. Amano H., Kito M., Hiramatsu K., Akasaki I. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low energy electron beam irradiation // Jpn. J. Appl. Phys. 1989.
24. Nakamura S., Senoh M., Mukai T. Highly p-type Mg-doped GaN film grown with GaN buffer layers // Jpn. J. Appl. Phys. 1993.
25. Nakamura S., Senoh M., Iwasa N., Nagahama S. High-brightness InGaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures // Jpn. J. Appl. Phys. 1995.
26. Туркин А. Н., Юнович А. Э. Измерения мощности излучения голубых и зеленых InGaN/AlGaIn/GaN-светодиодов с помощью фотопреобразователей из аморфного кремния // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 23.
27. Ковалев А. Н., Кудряшов В. Е., Маняхин Ф. И., Туркин А. Н., Золина К. Г., Юнович А. Э. Туннельные эффекты в светодиодах на основе гетероструктур InGaIn/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами // ФТП. 1997. Т. 31. № 11.
28. Ковалев А. Н., Маняхин Ф. И., Кудряшов В. Е., Туркин А. Н., Юнович А. Э. Электролюминесценция гетероструктур InGaIn/AlGaIn/GaN при ионизационном пробое // ФТП. 1998. Т. 32. № 1.
29. Полищук А. Г., Туркин А. Н. Новое поколение светодиодов компании Cree для освещения // Автоматизация в промышленности. 2008. № 7.