УДК 621.32:621.314.592

СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР ИЗ НИТРИДА ГАЛЛИЯ И ЕГО ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ (ОБЗОР)

А.Э. ЮНОВИЧ, проф., доктор физ.-мат. наук

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Первые полупроводниковые ИС — светодиоды (СД) на основе карбида кремния с зеленовато-голубым излучением были открыты в 20-х годах О.В. Лосевым, работавшим в Ленинградском физико-техническом институте и Нижегородской радиотехнической лаборатории.

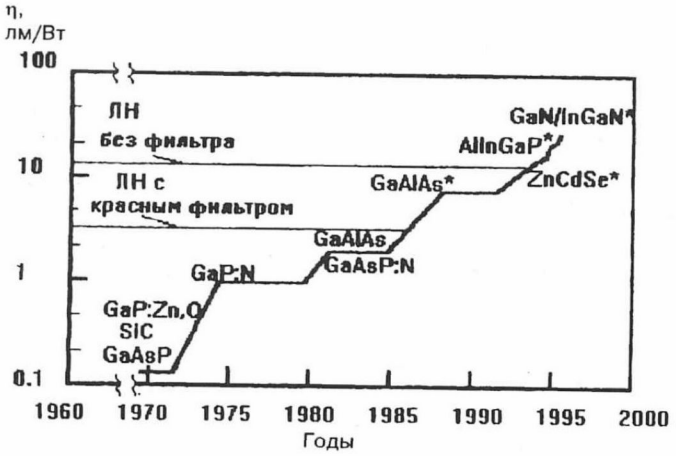
Развитие физики полупроводников в 60—70-е годы привело к созданию СД на основе полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^{IV}$ — фосфида и арсенида галлия и их твердых растворов, излучающих в зеленой, желтой и красной областях спектра. Существенный вклад в исследования и разработки СД внесли российские ученые. Так, за исследования гетероструктур для СД и инжекционных лазеров на основе арсенидов галлия-алюминия Ж.И. Алферов (ныне — академик, директор Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН) получил в начале 70-х годов Золотую медаль им. Б. Франклина Американского физического общества.

Подробное изложение принципов работы СД и итоги их разработок к середине 70-х годов даны в книге А. Берга и П. Дина [1], в русском переводе которой приведена библиография отечественных работ.

Промышленность СССР к концу 80-х годов выпускала более 100 млн. шт. СД, их разработки описаны в [2]. Светодиоды нашли широкое применение в световых индикаторах, приборных панелях автомобилей и самолетов, в рекламных табло и различных системах передачи и визуализации информации.

За последнее десятилетие в разработках СД произошел качественный скачок. На рис. 1, по данным [3, 4, 11], приведены величины световой отдачи СД из различных материалов при комнатной температуре в зависимости от года разработки, в таблице — λ в максимумах спектров, сила света, мощность и квантовый выход излучения. Параметры СД стали превосходить характеристики миниатюрных ЛН НН по сроку службы, надежности, безопасности и внешнему виду, что позволило широко применять СД в разных областях светотехники и электроники. Перспективы развития этих миниатюрных источников видимого излучения трудно переоценить.

Красные СД на основе твердых растворов арсенидов галлия-алюминия достигли внешнего квантового выхода излучения более 10% (в промышленных масштабах). У оранжево-желтых СД на основе твердых растворов фосфидов галлия-индия-алюминия этот параметр повысился до 1—2% и в последние годы они выпускаются серийно.



■ Рис. 1. Зависимость световой отдачи СД из различных материалов от года разработки (образцы на основе многослойных гетероструктур с квантовыми ямами отмечены *)

■ Параметры светодиодов при комнатной температуре

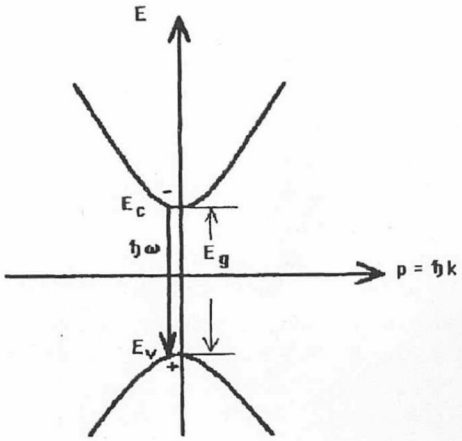
Материал и цвет излучения	Длина волны λ, нм (max)	Мощность, мВт	Сила света, кд	Квантовый выход, %	Ток, мА
AlGaAs, красный	660	5 ÷ 6	5 ÷ 10	10 ÷ 12	20
GaP, зеленый	555 ÷ 570	0,02 ÷ 0,04	0,1 ÷ 0,5	0,1 ÷ 0,5	То же
InGaAlP, зеленый	570 ÷ 573	0,4	1 ÷ 1,5	1,0	"
InGaAlP, желтый	585 ÷ 592	0,5 ÷ 1	0,5 ÷ 3	7,0	"
SiC, голубой	470	0,02	0,02	0,04	"
ZnTeSe, зеленый	512	1,3	4	5,3	10
ZnCdSe, голубой	490	0,33	0,7	0,3	10
GaN/InGaN зеленый	510 ÷ 525	1 ÷ 3	10 ÷ 12	2 ÷ 6,3	20
GaN/InGaN голубой	450 ÷ 460	4 ÷ 6	1,5 ÷ 2,5	6 ÷ 9,1	20

Зеленые СД на основе фосфида галлия имели квантовый выход излучения около 0,1%, но близость их спектра к максимуму чувствительности глаза обеспечила им широкое применение.

Разработки голубых СД на основе твердых растворов типа $A^{II}B^{VI}$ позволили получить внешний квантовый выход до 2—6%, но промышленного выпуска они не достигли из-за малого срока службы (не более сотен часов).

За последние 2 года произошло существенное улучшение параметров голубых и зеленых СД на твердых растворах нитрида галлия-индия: их сила света увеличилась, соответственно, до 1—2 и 10—12 кд, внешний квантовый выход до 6—2%, а срок службы превысил 10 тыс. ч. Успехи в разработках этих СД были обусловлены развитием технологии эпитаксиального роста многослойных гетероструктур различных соединений.

* 119899, Москва, МГУ, физический факультет



■ Рис. 2. Зависимость энергии электронов от квазиимпульса в прямозонных полупроводниках, обусловливающей большую вероятность межзонной излучательной рекомбинации

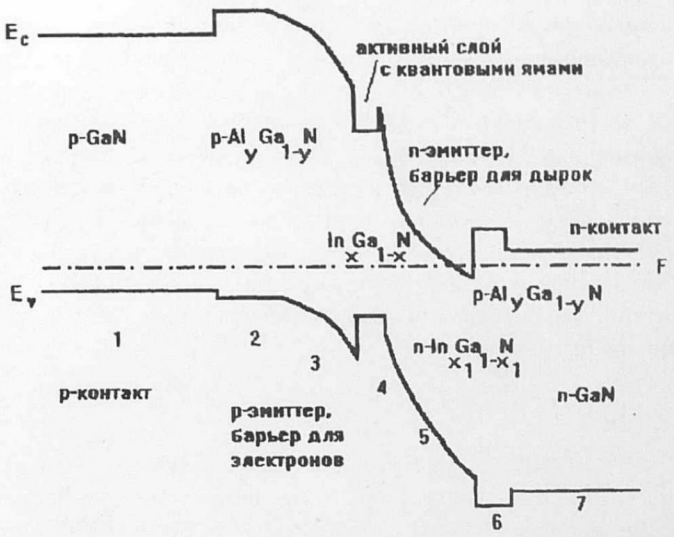
■ **Принципы действия СД.** Для обеспечения максимальной эффективности СД в нужной спектральной области необходимо выполнить целый ряд условий, иногда противоречащих друг другу.

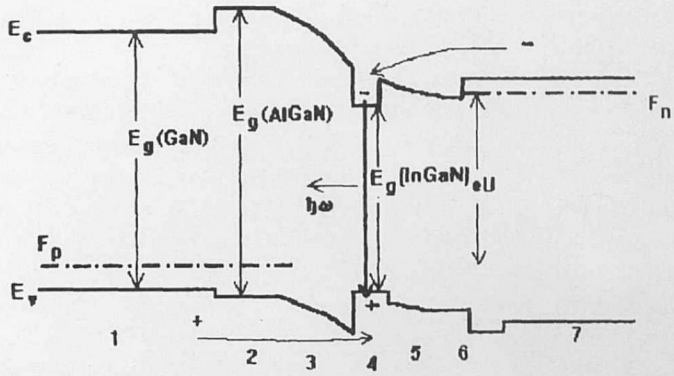
Ширина запрещенной зоны полупроводника E_g в активной области диода должна быть близка к ожидаемому максимуму в спектре энергий квантов излучения. Вероятность излучательной рекомбинации возбуждаемых в этой области электронно-дырчатых пар должна быть велика. Для этого оптические переходы электронов из зоны проводимости в валентную зону полупроводника должны происходить без изменения квази-импульса, т.е. полупроводник должен быть прямозонным (рис. 2) и иметь совершенную кристаллическую структуру (содержать минимальное число дефектов, обусловливающих безызлучательную рекомбинацию).

Для возбуждения полупроводника в нем должен быть создан *p-n*-переход, т.е. проводимость области вблизи одного контакта должна быть дырочной, а вблизи другого — электронной. Приконтактные слои полупроводника должны быть легированы, соответственно, акцепторными или донорными примесями. При включении напряжения на диод в прямом направлении (+ на *p*-, — на *n*-область) дырки и электроны инжектируются с разных сторон в активную область (рис. 3).

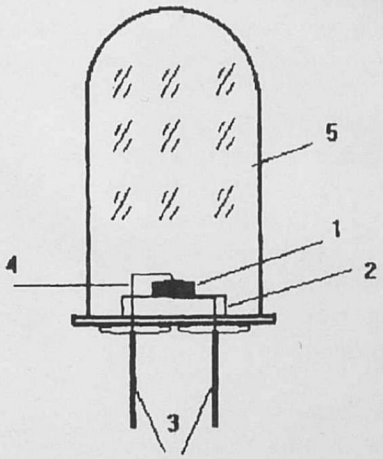
Излучаемые в активной области световые кванты должны выходить во внешнюю среду в заданном телесном угле с минимальным поглощением света внутри полупроводниковой структуры и на контактах. Малое поглощение излучаемых квантов может быть обеспечено тем, что активный слой, в котором идет рекомбинация, имеет ширину запрещенной зоны меньшую, чем близлежащие и контактные слои диода. Площадь кристалла с гетероструктурой в СД имеет размеры (0,25×0,25) ÷ (0,5×0,5) мм^2.

Фокусировка излучения в необходимом телесном угле (конус 5 ÷ 45°) обеспечивается выпуклым пластмассовым колпачком (линзой) с заданным диаметром и показателем преломления (см. рис. 4). Для разных применений он может иметь как выпуклую, так и плоскую форму, быть прозрачным или матовым. Кристаллодержатель обеспе-





■ Рис. 3. Энергетическая диаграмма многослойной гетероструктуры на основе GaN и его твердых растворов: *а* — в равновесии; *б* — с приложенным внешним прямым напряжением *U*; *1* — верхний контактный слой; *2*, *3* — согласующий по постоянной решетке широкозонный барьерный слой с областью пространственного заряда, легированной акцепторами; *4* — нелегированный тонкий (2—3 нм) узкозонный активный слой с квантовыми ямами для электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне; *5*, *6* — согласующий по постоянной решетки и деформациям широкозонный барьерный слой с областью пространственного заряда, легированной донорами; *7* — толстый базовый слой GaN *n*-типа



■ Рис. 4. Типичная конструкция СД: *1* — полупроводниковый кристалл; *2* — кристаллодержатель; *3* — выводы; *4* — контактные проволоки; *5* — пластмассовый колпачок (линза)

чивает теплоотвод от активной области СД, чтобы уменьшить ее нагрев и, соответственно, увеличить срок службы.

Таким образом, происходит преобразование электрической энергии в световую. Оно характеризуется отношением числа излучаемых в единицу времени квантов света к числу пересекающих p-n-переход электронно-дырочных пар — внешним квантовым выходом излучения η_e, равным произведению внутреннего квантового выхода излучения η_i на коэффициент инжекции пар в активную область γ и на коэффициент оптического вывода излучения во внешнюю среду η_o:

$$\eta_e = \gamma \eta_i \eta_o .$$

Коэффициент полезного действия СД зависит также от потерь на джоулево тепло в контактах, сопротивление которых должно быть сделано малым. Световой поток, световая отдача и сила света определяются соответствием спектра излучения СД спектральной чувствительности рецепторов человеческого глаза.

Разработки СД за последние три десятилетия постепенно выполняли эти разные условия. В 70-х годах была принципиально решена задача создания эффективных красных СД на основе гетероструктур твердых растворов арсенида галлия-алюминия и зеленых СД из фосфида галлия, маломощных голубых СД из карбида кремния [1, 2]. Промышленные разработки в последующие 20 лет довели эти решения до массового производства с большим экономическим эффектом.

В конце 80-х—начале 90-х годов была решена задача создания эффективных желто-оранжевых СД на основе гетероструктур из твердых растворов фосфидов галлия-индия-алюминия [3].

Решение некоторых из проблем долго не могло увенчаться успехом. В частности, несмотря на большие усилия исследователей и разработчиков, до последнего времени не была решена задача создания эффективных СД для коротковолновой части видимого спектра — зеленовато-голубой, голубой, синей и фиолетовой.

Создание голубых СД возможно на основе полупроводников с большой шириной запрещенной зоны — карбида кремния, соединений группы $A^{II}B^{VI}$, нитридов группы $A^{III}B^{V}$. Эти материалы исследовались для разработок СД на их основе. Светодиоды из SiC выпускались различными фирмами, но имели малую эффективность, так как SiC — непрямозонный полупроводник.

Светодиоды из гетероструктур прямозонных соединений типа твердых растворов селенида цинка имеют достаточно большой квантовый выход, но их структуры были дефектны, последовательное сопротивление велико и вследствие перегревов они пока недолговечны.

■ **Нитрид галлия** (GaN) — полупроводник группы $A^{III}B^{V}$ — кристаллизуется (в отличие от кубических кристаллов GaAs, InP, InAs, AlAs) в гексагональной решетке типа вюрцита (постоянные решетки a = 0,318 нм, b = 0,518 нм) и имеет ширину запрещенной зоны E_g = = 3,5 эВ при 300 К. Температура плавления GaN около 2000°С, что обусловливает технологические трудности выращивания совершенных монокристаллов. Это — прямозонный полупроводник; максимум валентной зоны и минимум зоны проводимости расположены в пространстве квази-импульсов в центре зоны Бриллюэна (точка Г). Специально нелегированные кристаллы GaN имеют большую концентрацию доноров, обусловливающих проводимость n-типа и концентрацию электронов n = = $10^{18} \div 10^{19}$ см$^{-3}$.

Аналогичные соединения (нитриды алюминия и индия — AlN и InN) также гексагональные кристаллы, прямозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны, соответственно, E_g = 6,5 эВ и E_g = 1,8 эВ. Постоянные решетки этих бинарных кристаллов сильно различаются (соответственно, a = 0,311, b = 0,498 и a = 0,354, b = 0,570 нм). Бинарные соединения образуют тройные твердые растворы $Ga_{1-x}In_xN$, $Ga_{1-x}Al_xN$, ширина запрещенной зоны которых изменяется приблизительно линейно с составом. В ряду $Ga_{1-x}In_xN$ можно подобрать параметр x, энергия E_g для которого соответствует заданной λ в голубой или зеленой области спектра.

В 70-х годах были опубликованы работы об осуществлении фиолетовых и голубых СД на основе GaN [5], созданных на основе эпитаксиальных пленок GaN на подложке из сапфира. Квантовый выход этих СД был достаточен для практических применений (доли %), но срок их службы был ограничен. В p-области концентрация дырок была мала вследствие компенсации, мала инжекция дырок и в активную область. Сопротивление СД было велико, при работе они перегревались и выходили из строя.

В работах групп Г.В. Сапарина и М.В. Чукичева из МГУ было обнаружено, что под действием электронного пучка GaN локально становится ярким люминофором. Эта локальная обработка позволила предложить устройства оптической памяти с пространственным разрешением, ограниченным диаметром обработки под сфокусированным пучком [6].

Работы И. Акасаки из Университета Нагоя [7] показали, что при обработке широким электронным пучком со сканированием возможно создать ярко люминесцирующий слой GaN. При исследованиях электрических свойств было обнаружено, что слой при обработке становится p-типа, однако этот факт несколько лет оставался без должного внимания.

■ **Многослойные гетероструктуры для голубых и зеленых светодиодов.** В начале 90-х годов Ш. Накамура из фирмы Nichia Chemical использовал результаты И. Акасаки для эпитаксиальных пленок нитридов III группы, выращенных методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии). Подобранным легированием и термообработкой он смог получить эффективно инжектирующие слои p-типа в светодиодных GaN-структурах [7—8].

Технология МОС-гидридной эпитаксии была модернизирована с учетом свойств нитридных соединений, с учетом роли атомов водорода, взаимодействующих с дефектами в GaN, с учетом особенностей легирования акцепторными примесями магния или цинка. Была отработана технология выращивания многослойных гетероструктур

$GaN/Ga_{1-y}Al_yN$, $GaN/Ga_{1-x}In_xN$, $Ga_{1-x}In_xN/Ga_{1-y}Al_yN$ при сравнительно низких температурах и малой скорости роста, с толщиной слоев до 10 ÷ 2,5 нм и шероховатостью гетерограницы порядка одного атомного слоя [7—8].

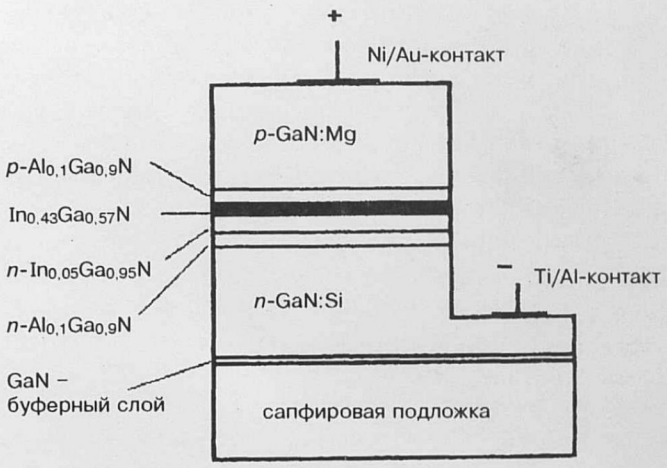
Первый этап разработок был основан на создании СД из двойных гетероструктур $Ga_{1-x}In_xN/Ga_{1-y}Al_yN$ с активным слоем $Ga_{1-x}In_xN$, легированным цинком. Спектральные максимумы голубых и зеленых СД были около 460 и 520 нм, а сила света достигала соответственно 1 и 2 кд, а внешний квантовый выход — 3 и 2% [8]. Фирма Nichia Chemical начала промышленный выпуск таких СД, а группа Ш. Накамура продолжала исследования.

■ **Голубые и зеленые светодиоды на основе гетероструктур с квантовыми ямами.** Следующий этап разработок был основан на создании СД из многослойных гетероструктур $GaN/Ga_{1-x}In_xN$ с нелегированным активным слоем $Ga_{1-x}In_xN$, толщина которого была уменьшена до 0,2—0,3 нм. Физические принципы, ранее осуществленные для разработок светодиодных гетероструктур типа $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$, $GaAs/In_xAl_yGa_{1-x-y}P$, $ZnSe/Zn_{1-x}Cd_xSe$ [3, 9], были использованы и развиты в применении к новым структурам.

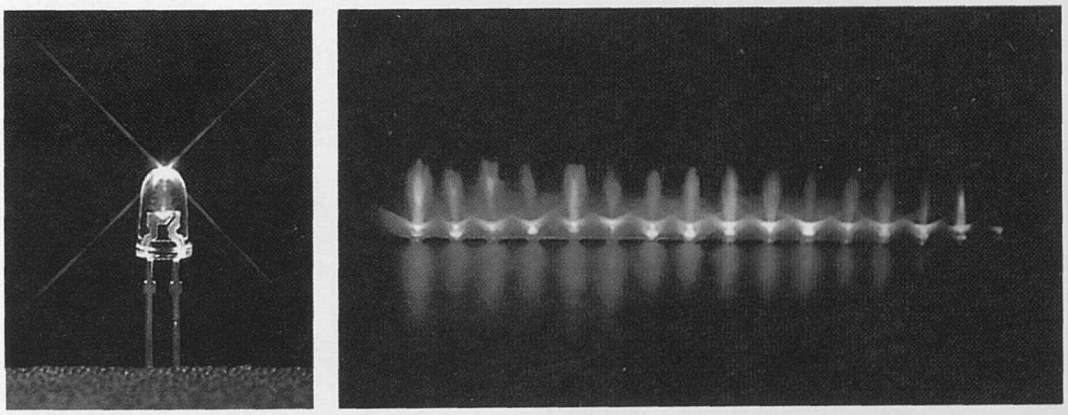
В сверхтонких слоях существенны два эффекта. Во-первых, в них сказываются эффекты размерного квантования; энергетический спектр электронов и дырок зависит от размеров (толщины активного слоя). Это имеет место, если толщина оказывается сравнимой с длиной волны Де-Бройля в квантовой яме, образованной в узкозонном полупроводнике, находящимся между слоями широкозонного полупроводника.

Во-вторых, различие параметров решетки на гетерограницах в таких тонких слоях не приводит к образованию дефектов и дислокаций несоответствия. Возникает упругая деформация растяжения или сжатия, в зависимости от того, постоянная решетки слоя меньше или больше постоянной решетки граничащих широкозонных слоев. Использование таких слоев улучшает совершенство активных слоев, дает возможность управлять спектрами излучения, учитывая сдвиг эффективной ширины запрещенной зоны вследствие размерного квантования и деформаций.

На рис. 5 показана разработанная фирмой Nichia Chemical многослойная структура для зеленых СД с одиночными квантовыми ямами [4, 8], а на рис. 6 — фотографии созданных фирмой СД разных цветов. На сапфировой подложке, после буферного слоя GaN (≈ 30 нм) выращивается сравнительно толстый (4 мкм) слой n-GaN:Si. Затем идут слои n-$Al_{0,1}Ga_{0,9}N$:Si (≈ 100 нм) и слой n-$In_{0,05}Ga_{0,95}N$:Si, необходимые для инжекции электронов и для согласования решетки подложки с активным слоем. Активным слоем служит тонкий (≈ 2 нм) нелегированный слой $In_xGa_{1-x}N$ (x = 0,43), ширина запрещенной зоны которого для зеленых СД соответствует излучению на λ = 510 ÷ 525 нм. Длина волны в максимуме спектра изменяется от голубой до желтой области, если состав активного слоя x меняется в пределах 0,2 ÷ 0,7; она зависит и от толщины слоя. Затем идет барьерный слой p-$Al_{0,1}Ga_{0,9}N$:Mg (≈ 100 нм), инжектирующий дырки и согласующий решетку с верхним слоем p-GaN:Mg (0,5 мкм), на который нанесен металлический контакт Ni-Au. Металлический контакт Ti-Al к нижнему слою n-GaN создается после стравливания части структуры. Технологические проблемы выбора состава, легирования и толщины слоев требуют подробных исследований свойств материалов группы нитридов и еще могут быть позже оптимизированы.



■ Рис. 5. Многослойные гетероструктуры на основе GaN и его твердых растворов для зеленых и голубых СД [4]



а) б)

■ Рис. 6. Новые СД на базе GaN с активным слоем InGaN и молекулярной фракцией In от 0,2 до 0,7 (фирма Nichia Chemical Industries): *а* — первый образец зеленого СД (λ_{max} = 525 нм, I = 6 кд, i = 20 мА; ориентировочная цена — 1000 йен ≈ 9,4 долл. США); *б* — полный ассортимент цветных СД (крайний слева — голубой с λ_{max} = = 400 нм, крайний справа — оранжевый с λ_{max} = 600 нм) (фотографии воспроизведены из журнала "Compound Semiconductor", США, 1995, v. 1, № 3)

На рис. 7 показаны характерные спектры светодиодов, на рис. 8 — характерные зависимости выходной мощности от тока. Яркость и квантовый выход излучения СД при постоянном токе 20 мА и комнатной температуре приведены в таблице. Фирма Nichia Chemical запатентовала ключевые этапы технологии и начала поставлять СД на рынок, опередив гигантские транснациональные электронные концерны.

В декабре 1995 г. группа Ш. Накамура сообщила, что выращивание структур на основе GaN с множественными квантовыми ямами $Ga_{1-x}In_xN/Ga_{1-y}Al_yN$ позволило создать инжекционный лазер на $\lambda = 417$ нм, работающий в импульсном режиме при комнатной температуре [10]. Это — первое сообщение о самом коротковолновом полупроводниковом инжекционном лазере (рис. 9).

■ **Перспективы применения голубых и зеленых светодиодов повышенной яркости.** Весной 1995 г. вышел первый номер нового журнала Compound Semiconductor ("Полупроводниковые соединения"). На его обложке сфотографирована плоская панель из нескольких десятков голубых СП, в фотомонтаже переходящая в плоскость зеленого доллара. Подзаголовок гласит: "Преобразуя голубое в зеленое: коммерческие приложения голубых светодиодов". Это отражает бум, который начался в крупных промышленных фирмах, разрабатывающих оптоэлектронные и светотехнические устройства с применением СД.

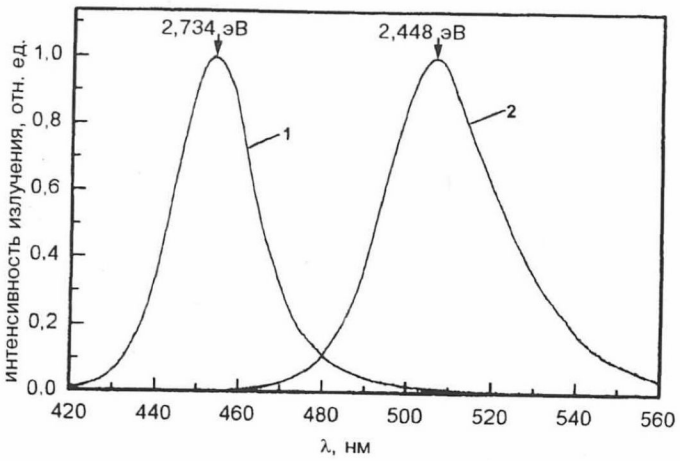
Фирма Hewlett—Packard, уже сейчас выпускающая СД с Объемом продаж до нескольких млрд. долл. в год, сообщила о разработках голубых и зеленых СД на основе нитридов $A^{III}B^{V}$ с подложками из карбида кремния (полупроводника с высокой электро- и теплопроводностью), к которому можно подвести тыловой контакт (в отличие от сапфировых подложек) [11].

Японские фирмы Panasonic и Toyoda Gosei (входящая в крупнейший автомобильный концерн Toyota), вслед за фирмой Nichia Chemical, организуют массовое производство СД на основе нитридных структур. Важно, что Toyota крайне заинтересована в этом, как потребитель СД для сигнальных фонарей автомобилей.

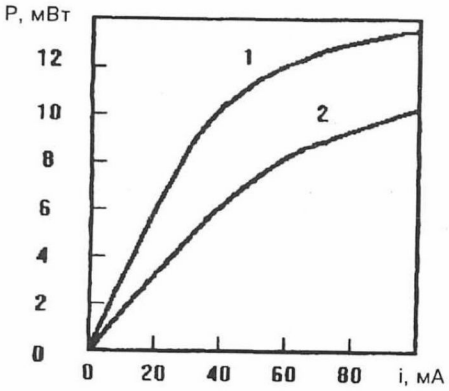
Традиционные применения СД в индикаторных устройствах различных приборов существенно расширяются, так как описанные разработки позволяют создать полную цветовую гамму индикаторов. Еще на примере маломощных СД была решена задача создания излучателей любого, в том числе белого, цвета комбинаций СД из трех материалов на одном кристаллодержателе [13].

Светодиоды на базе нитридов существенно расширяют цветовую гамму светового излучения. Возможно создание полноцветных светодиодных плоских табло, бегущих строк и рекламных панелей большой площади. Расширяются возможности бытовых применений СД (светильники—"ночники", игрушки, украшения).

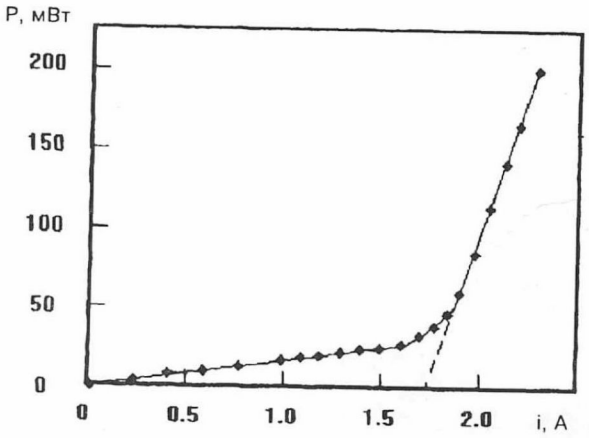
Новые СД благодаря высокому КПД решают проблему теплоотвода для экранов с большим числом элементов растра. Если СД для достаточного потока излучения будет потреблять ток не 10, а 0,1 мА, то экран с числом элементов 100×100 будет выделять тепло не 300, а всего 3 Вт.



■ Рис. 7. Спектры излучения СД на основе многослойных гетероструктур с квантовыми ямами GaN/InGaN при комнатной температуре и токе 10 мА: *1* — голубой СД; *2* — зеленый СД



■ Рис. 8. Зависимость мощности излучения от тока через СД, спектры которых показаны на рис. 6: *1* — голубой СД; *2* — зеленый СД. Напряжение изменяется в пределах $U = 3{,}2$—$3{,}6$ В



■ Рис. 9. Зависимость мощности излучения от тока на $\lambda = 417$ нм при $T = 300$ К в импульсном режиме (2 мкс с периодом 2 мс) для инжекционного лазерного СД на основе гетероструктур с множественными квантовыми ямами из GaN/InGaN (пороговые значения плотности тока и напряжения соответственно 4 кА/см² и 34 В [10])

По-видимому, в ближайшие годы будут созданы плоские телевизионные экраны на СД.

Новое применение, которое стало возможным благодаря разработанным ранее красным и желтым, а теперь голубым и зеленым СД повышенной яркости, — уличные светофоры, проходящие опытную эксплуатацию как в одном из городов Японии [12], так и на Пушкинской площади в Москве. Эффективность СД выше ЛН. Оценки показывают, что экономия электроэнергии в течение года окупает затраты на создание таких светофоров. Ведутся разработки светофоров на СД для железных дорог и метрополитена.

Локальное освещение белым светом в различных технических устройствах возможно осуществить комбинацией СД трех различных цветов. Сегодня кажется фантастически нереальной замена ЛН широкого применения на СД, но в будущем это не исключено.

Разработка новых инжекционных лазеров с λ вдвое меньшей, чем у существующих (на основе арсенида галлия), позволит в 4 раза увеличить плотность оптической записи информации на компакт-дисках, находящих массовое применение в технике звукозаписи и в персональных компьютерах.

В декабре 1995 г. в Бостоне в рамках годичной сессии Американского общества материаловедения прошел 1-й Международный симпозиум по нитриду галлия и материалам на его основе. На нем было представлено около 200 докладов от ведущих полупроводниковых лабораторий мира [14]. Это характеризует научно-технический бум, возникший в связи с разработками голубых и зеленых СД на основе нитрида галлия. В докладах детально обсуждалась технология выращивания, легирования и создания гетероструктур на базе этих материалов. Результаты исследований их оптических и электрических свойств, представленные на симпозиуме, дают фундаментальную научную базу для новых разработок СД и лазеров.

В начале обзора была отмечена роль отечественных ученых в исследованиях и разработках СД. Успехи последних лет в разработках СД на основе многослойных гетероструктур с квантовыми ямами на базе нитрида галлия были достигнуты в лабораториях Японии и США.

Российская электронная промышленность, выпускающая сейчас красные СД (AlGaAs) и зеленые СД (GaP), нуждается в развитии собственного научно-технического задела и установления взаимовыгодных связей с зарубежными разработчиками для быстрого освоения выпуска СД нового поколения. Светотехническая промышленность должна в ближайшее время провести разработки и освоить применение СД нового поколения в самых различных областях.

Автор выражает глубокую благодарность доктору Ш. Накамура за любезно присланные им в МГУ образцы голубых и зеленых СД. Автор благодарен также Соросовской Программе Образования в области естественных наук и подпрограмме "Соросовские профессора" за финансовую поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берг А., Дин П. Светодиоды. Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича, М.; Мир, 1979, с. 686.

2. Коган Л.М. Полупроводниковые свветоизлучающие диоды. М.; Энергоатомиздат, 1983, с. 245.

3. Morkoc H., Strite S., Gao G.B., Lin M.I., Sverdlov B., Burns M.J. Appl. Phys., 1994, v. 76, № 3, p. 1363—1398.

4. a) Nakamura A., Senoch M., Iwasa N., Nagahama S. Jap. J. Appl. Phys., I July 1995, v. 34, part 2, № 7 A, pp. L 797—L 799.

b) Nakamura S., Senoch M., Iwasa N., Nagahama S., Yamada T., Mukai T. Jap. J. Appl. Phys., 1995, v. 34, part 2, № 10B, pp. L.1332—L.1335.

5. Pankove J.I., Miller F.A., Berkeyheiser J.F., J. of Luminescence, 1972, v. 5, pp. 84—86.

6. Четверикова И.Ф., Чукичев М.В., Храмцов А.П. Оптические свойства нитрида галия, части 1, 2. Обзоры по электрон. техн., сер. 6 — Материалы, вып. 8 (911), 1982; вып. (945), 1983.

7. Amano H., Kito M., Hiramatsu K., Akasaki I. Jpn. J. Appl. Phys., 1989, v. 28, p. L2112—2114.

8. Nakamura S., Mukai T., Senoch M. J. Appl. Phys., 1994, v. 76, pp. 8189—8192.

9. Gunshor R.L., Nurmikko A.V. Proc. of the IEEE, oct. 1994, vol. 82(10), p. 1503.

10. "Nichia Demonstrates the First Nitride Laser". Compound Semiconductors, Jan.-Febr. 1996, vol. 2, № 1, pp. 7—8.

11. Craford M.G. Compound Semiconductors, July-Aug. vol. 1, № 1, p. 48; Circuits and Devices, Dez., 1992.

12. Nakamura S. Circuits and Devices, May 1995, pp. 19—23.

13. Коган Л.М., Вишневская Б.И., Ковырева Н.И., Родкин В.С. Электронная промышленность, 1992, № 2, с. 46—47.

14. Gallium Nitride and Related Materials. The First International Symposium, Abstracts of the 1995 Fall Meeting of Materials Research Society, Boston, Nov.—Dec. 1995, Symposium FFF, pp. 9—41.

От редколлегии

Учитывая исключительную перспективность разработки новых светодиодов и их массового применения в науке и технике, а также быстро увеличивающийся разрыв в уровне проводимых научных и технологических работ в этом направлении в России по сравнению с прогрессом, достигнутым в США и Японии, редколлегия журнала обращается в Министерство науки и технической политики с просьбой рассмотреть состояние дел с разработками и промышленным выпуском светодиодов и наметить финансируемую программу развития этой важной проблемы.

■