ГОЛУБЫЕ ДИОДЫ

Р. З. БАХТИЗИН
Башкирский государственный университет, Уфа

BLUE DIODES

R. Z. BAKHTIZIN

Operational principles of blue and green light-emitting diodes as well as laser diodes which are based on group III element nitrides, the history of their creation, and the principal challenges that had to be met are discussed.

Обсуждены принципы работы синих и зеленых светодиодов и лазерных диодов на основе нитридов элементов группы III, история их создания и основные трудности, которые при этом необходимо было преодолеть.

www.issep.rssi.ru

© Бахтизин Р.З., 2001

ВВЕДЕНИЕ

Получение света было задачей первостепенной важности для человечества еще на заре цивилизации, так как способствовало ускорению его развития (использование источников света означало эффективное удлинение светового дня, продолжение осмысленной деятельности в помещениях и т.д.). Начиная с использования открытого огня эволюция светотехники заключалась в изобретении все более ярких и эффективных источников света. Как и многие другие важнейшие достижения человечества (связь на больших расстояниях, передача музыки, изображений, ...), это направление получило интенсивное развитие в последние 100–120 лет. Важной вехой на этом пути стало изобретение в 1879 году Т.А. Эдисоном электрической лампы накаливания. Успехи физики газового разряда в 20-е годы XX века привели к разработке неоновых ламп, газоразрядных ламп высокого давления, люминесцентных ламп, галогенных ламп накаливания. Завершение этого этапа светотехники позволило решить задачи освещения интерьеров промышленных и жилых зданий, улиц, оформления центров досуга и рекламы.

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ

Во второй половине XX века появляются принципиально новые источники света, основанные на использовании полупроводниковых технологий, и к началу 1962 года создан первый светоизлучающий диод (светодиод) – базовый элемент оптоэлектроники (рис. 1). Он состоит из активного слоя, включающего электронно-дырочный переход с характерной шириной запрещенной зоны E_g и заключенного между полупроводниками n- и p-типа, и омических контактов[1]. Величина E_g определяет минимальную энергию, необходимую для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости. Когда ток протекает в прямом направлении,

[1] Сама возможность создания светодиодов впервые была показана еще в 1927 году О.В. Лосевым, тогда сотрудником Нижегородской радиолаборатории, при исследовании свечения полупроводникового кристалла карборунда SiC, вызванного пропусканием тока (свечение Лосева).

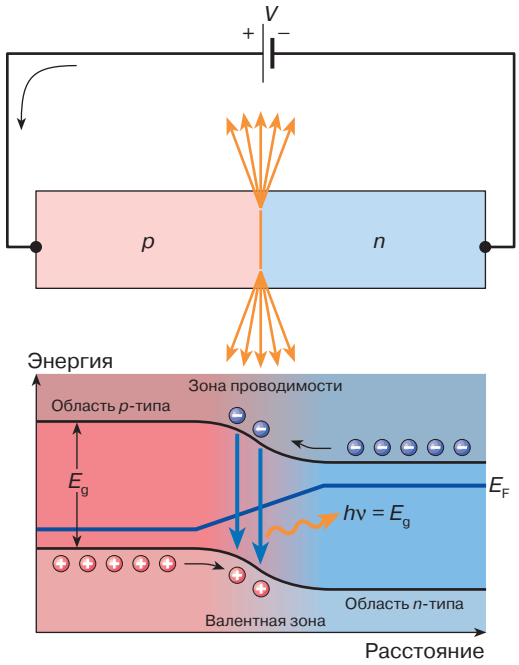


Рис. 1. Схема и энергетическая диаграмма полупроводникового светоизлучающего диода. E_F – уровень Ферми

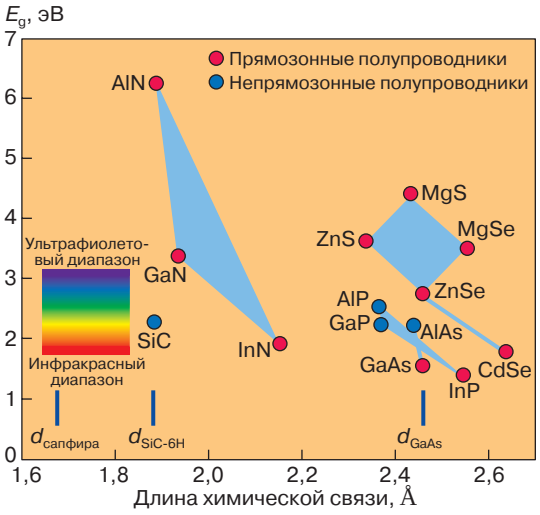


Рис. 2. Зависимость ширины запрещенной зоны E_g различных полупроводниковых соединений от длины химической связи (межатомного расстояния), которая оказывает основное влияние на величину E_g. Заметим, что соединения группы II–VI имеют постоянные решетки, которые близки к постоянной решетки GaAs. Для наглядности приведены спектр видимого излучения и постоянные решетки некоторых распространенных подложек

электроны проходят через переход со стороны *n*-полупроводника, а дырки – со стороны *p*-полупроводника, в результате чего в области *p*–*n*-перехода происходит излучательная рекомбинация с образованием фотонов с энергией $h\nu \approx E_g$. Этот процесс реализуется лишь в так называемых прямозонных полупроводниках, отличающихся особой зонной структурой (дно зоны проводимости и потолок валентной зоны расположены при одном значении волнового вектора), в которых интенсивность прямых оптических переходов значительно превосходит интенсивность непрямых.

Величины E_g для полупроводников, излучающих в видимой и прилегающих к ней областях спектра, приведены на рис. 2. Как видно, чтобы создать светодиоды или лазерные диоды, работающие в видимой области спектра, необходимо использовать материалы с шириной запрещенной зоны >2 эВ.

Долгое время массовое производство светодиодов ограничивалось приборами, излучающими в красной и инфракрасной областях спектра. Светодиоды изготавливали на основе арсенида галлия GaAs и его твердого раствора AlGaAs. Первые зеленые светодиоды делали из фосфида галлия GaP, а синие – из карбида кремния SiC. Однако эти материалы характеризуются непрямой зонной структурой, вследствие чего получается излучение слабой интенсивности.

Укажем некоторые применения светодиодов, а также лазерных диодов, излучающих в различных областях спектра [1–4].

1) увеличение емкости накопителей на компакт-дисках (CD) и цифровых видеодисках (DVD). Так как плотность записи ~$1/\lambda^2$, то лишь за счет замены красного лазерного диода на фиолетовый с уменьшением длины волны излучения λ в 2 раза объем памяти возрастает в ~4 раза (с 4,7 до 15 Гбайт);

2) создание полноцветных дисплейных экранов. Комбинируя InGaN-, AlGaN- и GaAlAs-светодиоды, можно получить любой участок видимого спектра с качеством, превосходящим известный телевизионный стандарт NTSC (рис. 3, *а*);

3) в устройствах отображения информации, уличных светофорах, системах аварийного оповещения и т.д. (рис. 3, *б*);

4) в цветных лазерных принтерах высокого разрешения;

5) в системах связи на основе волоконно-оптических линий;

6) в производстве экономичных осветительных устройств с заменой обычных люминесцентных ламп и ламп накаливания.

Но для получения высокой интенсивности излучения нужны прямозонные материалы. Анализ возможных

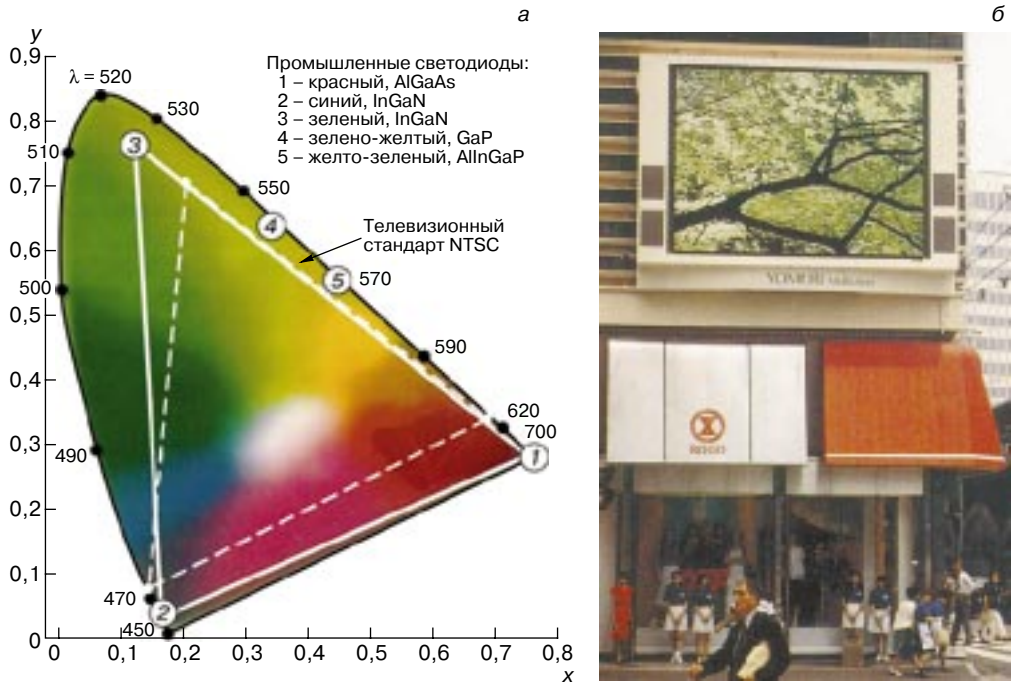


Рис. 3. *а* – диаграмма хроматичности CIE (Comission Internationale de l'Éclairage – Международная комиссия по освещенности) 1931 года, показывающая соотношение между тремя основными компонентами (красной, зеленой и синей) света, необходимыми для получения заданного цвета. Все многообразие реальных цветов находится в пределах выделенной площади. Вдоль осей *x* и *y* отложены доли двух компонент, определяющие вклад третьей. Для удобства по периметру диаграммы проставлены длины волн монохроматического излучения. Цифры в белых кружочках указывают расположение на диаграмме некоторых серийных светодиодов. Штриховым треугольником выделен телевизионный стандарт США и Японии (NTSC); *б* – плоский светодиодный телевизионный экран на одной из улиц Токио

кандидатов показал, что имеются два класса перспективных полупроводников: соединения элементов групп III–V – нитриды и групп II–VI – халькогениды (см. рис. 2).

Попытки реализовать синие и зеленые светодиоды и лазеры начались более 20 лет назад и были связаны с использованием кристаллов нитрида галлия GaN и селенида цинка ZnSe, но возникли трудности в синтезе и легировании этих материалов (обычно их получают в виде эпитаксиальных пленок). Для выращивания пленок используют два технологических подхода: метод молекулярно-лучевой эпитаксии (MBE – Molecular Beam Epitaxy) в условиях сверхвысокого вакуума и метод осаждения пленок из металлоорганических соединений (MOCVD – Metalorganic Chemical Vapor Deposition) [5]. Принципиально важно при этом обеспечить совпадение периодов кристаллических решеток последовательных слоев с различным химическим составом, чтобы границы между соседними слоями не содержали дефектов и были резкими.

ЭВОЛЮЦИЯ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ ZnSe

Начиная с 1980 года многие группы безуспешно пытались вырастить пленки *p*-типа ZnSe методом MOCVD, пока в 1990 году Р. Парк (R. Park (компания 3M, США)) не показал, что высокая концентрация дырок в образцах получается при легировании азотом и это можно было осуществить используя высокочастотные плазменные источники. После проведения успешного *p*-типа легирования ZnSe уже в конце 1991 года появилось сообщение об изготовлении первого лазерного диода, излучавшего зеленый свет. Такие диоды выращивали на GaAs-подложках (на рис. 2 хорошо видно, что постоянные решеток ZnSe и GaAs отличаются незначительно).

Однако первые образцы работали лишь при 77 K в импульсном режиме и характеризовались коротким (несколько минут) временем жизни, которое к 1996 году удалось увеличить до 100 ч (400 ч в 1997 году). Было установлено, что причина наблюдаемой деградации заключалась в безызлучательной рекомбинации на дислокациях, попавших в активный слой. Увеличение

времени жизни было достигнуто за счет уменьшения числа дефектов упаковки и дислокаций на межфазной границе GaAs/ZnSe от 10^6 до 10^3 см$^{-2}$, но даже в этом случае отдельные дефекты продолжали диффундировать по объему, приводя к разрыву относительно слабых связей в соединениях II–VI и выходу приборов из строя. Систематические исследования, выполненные в компании "Sony", показали, что ответственными за деградацию являются также и точечные дефекты, а оценки времени жизни привели к значению $3 \cdot 10^4$ ч, что значительно превышало наблюдаемые 400 ч и указывало на существование неучтенных факторов, одним из которых могло быть влияние омического контакта со стороны *p*-области прибора. Такие контакты создают сильно легируя полупроводник, но дополнительное *p*-легирование активированным плазмой азотом может приводить к росту сопротивления образца из-за возрастания концентрации дефектов и к его перегреву при эксплуатации. Недостаточные времена жизни сдерживают широкое применение приборов из этих материалов, хотя определенные перспективы связываются с блокадой диффузии дефектов в активный слой гетеролазеров слоями сверхрешеток с переменной деформацией, а также с использованием соединения BeZnSe.

НИТРИД ГАЛЛИЯ И ЕГО СПЛАВЫ

Исследования свойств нитридов элементов группы III (AlN, GaN, InN) и их сплавов, представляющих собой широкозонные полупроводники с прямыми оптическими переходами, позволили заключить, что они являются наиболее перспективными материалами для изготовления свето- и лазерных диодов, излучающих во всей видимой и ультрафиолетовой (240–620 нм) областях спектра (табл. 1). Однако реализация этих преимуществ более 30 лет сдерживалась значительными трудностями в получении соответствующих материалов. Из-за малости ковалентного радиуса N параметр решетки кристаллов нитридов значительно меньше, чем у других полупроводниковых соединений III–V групп, а большие значения энергии связи (2,2 эВ для GaN) являются причиной высокой температуры плавления и затрудняют выращивание кристаллов из расплава, поэтому их, как правило, получают в виде монокристаллических пленок. До недавнего времени все пленки нитридов, которые удавалось вырастить, отличались высокой концентрацией примесей *n*-типа, обусловленной большой плотностью дефектов, что препятствовало созданию примесей *p*-типа и тем самым образованию *p*–*n*-переходов.

Таблица 1. Сравнение характеристик некоторых светодиодов

Светодиод	Материал	Длина волны излучения, нм	Интенсивность люминесценции, мккд	Выходная мощность, мкВт	Квантовый выход, %
Красный	GaAlAs	660	1790	4855	12,83
Зеленый	GaP	555	63	30	0,07
Зеленый	**InGaN**	500	2000	1000	2,01
Синий	SiC	470	9	11	0,02
Синий	**InGaN**	450	2500	3000	5,45

Основной причиной, препятствовавшей получению высококачественных пленок GaN, было отсутствие подходящих подложек, параметры решетки и коэффициент теплового расширения которых соответствовали бы GaN. Долгое время такие пленки выращивали на сапфире (рассогласование решеток 13,5%), достоинствами которого являются лишь термическая стойкость и возможность очистки перед началом роста. Другая проблема – получение кристаллов *p*-типа. Первые работы в этом направлении были начаты еще в 60-е годы XX века, однако все попытки надежно внедрить элементы группы II (Mg, Zn, Be) как примеси замещения, которые бы действовали как акцепторы, завершились неудачей. Трудности были так велики, что встал вопрос, следует ли вообще тратить время на работу с этим материалом.

Подобные мысли, по-видимому, не приходили в голову японскому профессору И. Акасаки (I. Akasaki), посвятившему жизнь изучению GaN. 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 решеток, и уже в 1986 году получил пленки GaN высокого качества. А в 1989 году счастливый случай помог ему вместе с его аспирантом Амано (H. Amano) впервые изготовить образец *p*-типа. Изучая под электронным микроскопом легированную Mg пленку GaN, Акасаки и Амано обнаружили свечение образца после бомбардировки электронами[2]. Завершив электронно-микроскопические исследования, они установили, что проводимость стала *p*-типа, и связали это с воздействием электронного пучка на пленку, способствовавшим замещению атомов Ga атомами Mg. Но к тому времени большинство исследователей прекратили работать с GaN, и сообщение Акасаки почти не привлекло внимания, а к концу 1991 года, когда Хаас (M. Haase (компания 3M, США))

[2] Справедливости ради здесь следует упомянуть о работах Г.В. Сапарина и М.В. Чукичева (МГУ), выполненных в 1981–1982 годах, в которых обнаружена люминесценция пленок GaN под действием электронного пучка, но тогда они не смогли объяснить причину появления яркого свечения.

объявил о создании первого ZnSe зеленого лазера, практически все уже работали с халькогенидами. При этом интерес к исследованию соединений II–VI групп был столь велик, что в некоторых университетах (Universität Würzburg, Deutschland) были организованы специальные центры для координации работ в этом направлении и выпуска соответствующих материалов и приборов.

ПРОРЫВ Ш. НАКАМУРЫ

29 ноября 1993 года, когда компания "Nichia Chemical Industries Ltd." объявила, что завершила разработку голубых светодиодов на основе GaN и планирует приступить к их массовому производству, общая реакция компаний, производящих оптоэлектронные приборы и компоненты была: кто? Лишь немногие даже в Японии когда-либо слышали о "Nichia", эта компания никогда не значилась среди зарегистрированных в оптоэлектронной промышленности. И мало кто обратил внимание на пару статей, опубликованных незадолго до этого Ш. Накамурой[3], молодым исследователем из "Nichia", кто собственно и создал голубые диоды. Но после появления столь сенсационного заявления все хотели узнать, кто такой Накамура и что представляет собой эта компания.

Когда Накамура поступил на работу в "Nichia", его первым заданием было получение металлического Ga высокой чистоты. Справившись с ним, он переключился на выращивание монокристаллов GaAs и InP. Но когда компания попыталась выйти с продукцией на рынок, она не смогла конкурировать с таким гигантом, как "Sumitomo Electric". Следующим заданием было получение эпитаксиальных пленок для изготовления светодиодов. Но и в этом случае "Nichia" не выдержала конкуренции с корпорацией "Toshiba". В итоге 10 лет ушло на получение металлов высокой чистоты, полупроводниковых соединений и пленок, но ни одно из этих направлений не привело к коммерческому успеху. Но теперь Накамура получил возможность решать самому, чем заниматься дальше, и выбрал создание синезеленых светодиодов. Зная, что главной проблемой является получение подходящих материалов, а хорошим методом их выращивания – MOCVD, он поехал для его освоения в университет штата Флорида (США). После посещения множества светодиодных конференций, Накамура вспоминал: "Большинство университетов и компаний, в частности в Японии, работали с ZnSe. Но я уже имел горький опыт, что если занимаешься тем же, что делает кто-либо еще, то, когда доходит до выпуска продукции, оказывается, что ты не можешь ее продать. И я решил выбрать другой материал". Накамура хорошо осознавал проблему рассогласования решеток, но для него важнее всего было то, что эта область не привлекала внимания больших компаний.

Открытие Акасаки оказалось фантастически удачным. После возвращения из Флориды в 1989 году Накамура построил свою установку MOCVD и начал работать над проблемой буферного слоя. Он решил не копировать подход Акасаки (осознавая возможные проблемы с патентованием) и вместо AlN использовал GaN. Он получил зеркальную поверхность, а измерив электрические характеристики, обнаружил, что GaN даже лучше: подвижность носителей тока оказалась выше.

Узнав о важном достижении Акасаки по получению материала *p*-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. Позже оказалось, что получению проводимости *p*-типа препятствовало влияние атомарного водорода из MOCVD-процесса, который легко диффундировал в объем кристалла и образовывал нейтральные комплексы с Mg, подавляя акцепторный эффект.

Другой ключевой проблемой было получение высококачественных пленок InGaN для использования в качестве активного слоя. Накамура усовершенствовал метод MOCVD, введя два раздельных потока газов: главный, переносящий с высокой скоростью параллельно подложке смесь компонентов реакции – триметилгаллия $(CH_3)_3Ga$ и аммиака NH_3, источников Ga и N – в потоке газа, носителя молекулярного водорода, и вспомогательный, направленный перпендикулярно подложке, переносящий неактивный газ N_2, который изменяет направление главного потока и приводит активный газ в контакт с подложкой. Роль вспомогательного потока очень важна: без него не может быть получена непрерывная пленка и на подложке образуются отдельные островки. Теперь он мог регулировать

[3] Шуджи Накамура родился в 1954 году на острове Шикоку (самом маленьком и наименее населенном из четырех главных островов Японии), где и расположена "Nichia", и в 1979 году окончил университет в Токушиме. К тому времени он уже имел семью и был занят поисками работы. Пожалуй, у него была единственная возможность – устроиться в "Nichia", небольшую семейную химическую компанию, производящую люминофоры для цветных кинескопов, дилера корпорации "Sony". Накамура не был вдохновлен перспективой работы в "Nichia", но ему повезло: его босс, Н. Огава, основатель фирмы, сделавший своим девизом лозунг "всегда быть в поиске", оказался весьма примечательным предпринимателем, сумевшим угадать в нем талант исследователя, оказавшим необходимую поддержку и не побоявшимся пойти на значительные финансовые расходы.

количество In в нанесенном материале в процессе роста, изменяя скорость потока и температуру подложки. Наличие In в активном слое является причиной образования глубоких локализованных состояний, в которых движение электрона ограничено в трех измерениях (как в квантовых точках), что приводит к некоторым эффектам. Во-первых, дополнительное квантование ведет к уменьшению плотности электронных состояний, так что для получения оптического усиления требуется меньшая концентрация инжектированных носителей тока, а во-вторых, квантование делает это усиление анизотропным относительно одного из направлений поляризации.

Располагая своими более совершенным процессом обработки и уже апробированным методом выращивания хороших пленок на сапфире, Накамура не сомневался, что выиграет гонку у своего соперника: “Я был уверен, так как в Японии, когда конкурируют университетский профессор и компания, компания обычно выигрывает, потому что университеты за короткое время не могут достать много денег”. Свой первый синий светодиод Накамура изготовил 28 марта 1991 года, но какое у него могло быть время жизни? Он оставил его включенным, когда уходил домой, а после бессонной ночи, придя рано утром в лабораторию, увидел, что диод еще светит. И хотя излучение было не очень ярким, это была победа[4]. Два с половиной года спустя после многочисленных улучшений к моменту появления знаменитого объявления Накамура изготовил диоды, излучавшие с силой света 1000 мккд, а еще через шесть месяцев компания объявила о выпуске 2000-мккд диода, который излучал настолько ярко, что на него больно было смотреть.

Первый коммерческий синий светодиод был сделан Накамурой в начале 1994 года на основе гетероструктуры InGaN/AlGaN с InGaN активным слоем, легированным Zn (рис. 4, *а*). Выходная мощность составляла 3 мВт при прямом токе 20 мА с квантовым выходом (отношением числа инжектированных электронов к числу образовавшихся фотонов) 5,4% на длине волны излучения 450 нм. Вскоре после этого за счет увеличения концентрации In в активном слое был изготовлен зеленый светодиод, излучавший с силой света 2 кд (рис. 4, *б*). Он состоит из 3-нм активного слоя $In_{0,2}Ga_{0,8}N$, заключенного между слоями *p*-AlGaN и *n*-GaN, выращенными на сапфире. Такой тонкий слой InGaN сводит к минимуму влияние рассогласования решеток: упругое напряжение в слое может быть снято без образования дислокаций и качество кристалла остается высоким. Здесь слой InGaN образует одиночную квантовую яму [6], в которой локализованы электроны и дырки, поступающие из окружающего материала. Из-за пространственного ограничения движения носителей тока происходит эффективная излучательная рекомбинация. Скорость рекомбинации зависит от содержания In в активном слое и энергии квантованных состояний, которые, в свою очередь, зависят от толщины квантовой ямы и энергетического барьера между слоем InGaN и окружающим материалом, а изменение толщины дает возможность дополнительно управлять длиной волны излучения. В 1995 году при еще 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%, причем время жизни светодиодов составляло $5 \cdot 10^4$ ч (измеренное), а по теоретическим оценкам – более 10^6 ч (~150 лет!).

[4] Строго говоря, первые образцы МДП голубых светодиодов на основе пленок GaN были изготовлены в 1971 году профессором Дж. Панковым (J. Pankove, RCA, Princetone, USA), однако из-за высокой концентрации дефектов сопротивление приборов было очень велико и они быстро выходили из строя. При этом Панкову так и не удалось осуществить легирование *p*-типа.

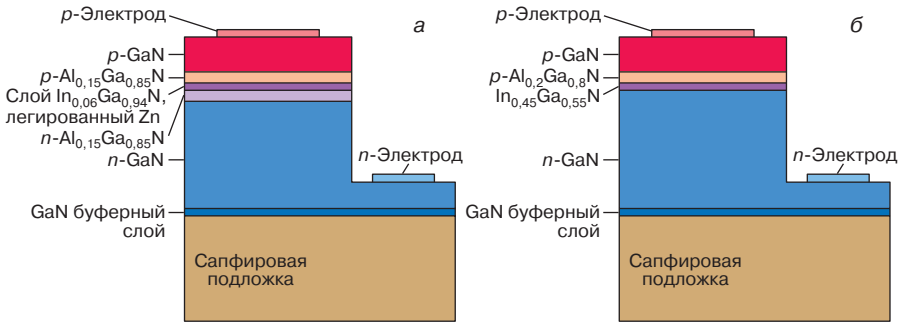


Рис. 4. Слоистые структуры, используемые для изготовления светодиодов: *а* – светодиод с двойной гетероструктурой, *б* – структура зеленого светодиода с одиночной квантовой ямой

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Рассмотрим работу лазерного диода. Для работы любого лазера необходимо иметь активную среду и механизм ее накачки, создающий инверсную населенность энергетических уровней (когда на более высоко расположенном уровне находится больше электронов, чем на лежащем ниже; в нашем случае это возможно, если инжектировать в активный слой большое количество электронов и дырок). Кроме этого, необходимо создать положительную обратную связь (для этого используют оптический резонатор, роль которого выполняют две зеркальные грани кристалла), а также обеспечить превышение порога лазерной генерации (усиление света должно превосходить его потери). Чтобы электромагнитное излучение, генерируемое лазером, было сконцентрировано в центральной области прибора, показатель преломления внутренних слоев должен быть больше, чем внешних (как в волноводе).

Первые полупроводниковые лазеры были реализованы в конце 1962 году на основе GaAs и представляли собой просто приборы с p–n-переходами. Значительный прогресс в создании лазеров был достигнут благодаря предложению Ж.И. Алфёрова и независимо Г. Крёмера использовать гетероструктуры – композиции полупроводников с различными по ширине запрещенными зонами [5, 6]. В этом случае для электронов, движущихся в узкозонном полупроводнике, граница между составляющими (гетеропереход) играет роль потенциального барьера. Два гетероперехода с расположенным между ними тонким слоем полупроводника с узкой запрещенной зоной образуют квантовую яму, где движение электрона ограничено с двух сторон. Это приводит к квантованию энергии поперечного движения электрона, но в двух других направлениях оно остается свободным и образуется двумерный электронный газ. Для создания таких квантоворазмерных структур используются методы MOCVD и MBE, а наиболее известной является гетероструктура $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$, где x – доля атомов Al, заместивших атомы Ga в твердом растворе Al в GaAs. Одно из главных применений квантовых структур связано с созданием на их основе новых типов полупроводниковых лазеров, и здесь уместно подчеркнуть, что именно коллектив ученых Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН под руководством Ж.И. Алфёрова создал первые образцы светодиодов и гетеролазеров на основе GaAs/AlGaAs. Лазеры на квантовых ямах можно перестраивать по длине волне: с уменьшением размеров ямы частота, генерируемая лазером, возрастает.

Первые импульсные лазеры на двойных гетероструктурах, где тонкий активный слой заключен между двумя гетеропереходами, один из которых (p–n) служит для инжекции электронов, а второй (p–p) отражает инжектированные электроны в активный слой, были созданы в 1967 году, но изготовить GaAs/(GaAl)As-лазеры, которые бы работали при комнатной температуре в непрерывном режиме, удалось лишь к 1980 году.

ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ НА ОСНОВЕ GaN

При разработке лазерных диодов на основе нитридов элементов группы III основные проблемы заключались в создании приборов с инжекционной (а не оптической/электронной) накачкой, которые могли бы работать в непрерывном режиме, и в обеспечении сохранности образца с высокой плотностью дефектов структуры (значит, с большим сопротивлением) при прохождении через него тока очень высокой плотности (более чем на два порядка превышающей плотность тока в светодиоде). Кроме того, в лазерных диодах должны быть реализованы односторонняя инжекция, волноводный эффект и положительная обратная связь. Соответственно многослойные структуры, образующие конструкцию лазерного диода, оказываются более сложными и содержат множественные квантовые ямы. На рис. 5, *а* показана структура InGaN лазерного диода, где активный слой сформирован четырьмя парами слоев $In_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N$, состоящих из квантовых ям шириной 30 Å из нелегированных слоев $In_{0,2}Ga_{0,8}N$ (ответственных за усиление света), разделенных 60-Å барьерами из нелегированных слоев $In_{0,5}Ga_{0,95}N$. Слои n- и p-типа GaN толщиной 0,1 мкм образуют оптические волноводы, а слои $Al_{0,12}Ga_{0,88}N$ толщиной 0,5 мкм обеспечивают оптическое удержание света в активном слое и ограничивают движение носителей тока в поперечном направлении. В такой конструкции ширина слоев составляла 10 мкм, ширина p-электрода 6 мкм, длина резонатора 600 мкм. В конце 1995 года Накамура продемонстрировал синее когерентное излучение с помощью гетероструктуры InGaN/AlGaN в импульсном режиме (рис. 5, *б*).

Другой сложной проблемой оказалась необходимость поддержания высокой пороговой плотности тока (≥ 3000 А/см^2), что на порядок выше, чем в красных лазерных диодах. Из-за относительно высокого электрического сопротивления материала диода возникает проблема отвода избытка тепла. Но уже в конце 1996 года Накамура сообщил о работе лазеров с длинами волн 380–420 нм в непрерывном режиме при комнатной температуре с выходной мощностью 1,5 мВт и токе 100–280 мА в течение 35 ч, в октябре 1997 года – 10^3 ч, а в июне 1998 года (благодаря уменьшению плотности дислокаций за счет использования GaN-подложки) – до 10^4 ч.

Совсем недавно в условиях жесткой конкуренции с фирмами “Xerox”, 3M, “Hewlett–Packard”, “Sanken

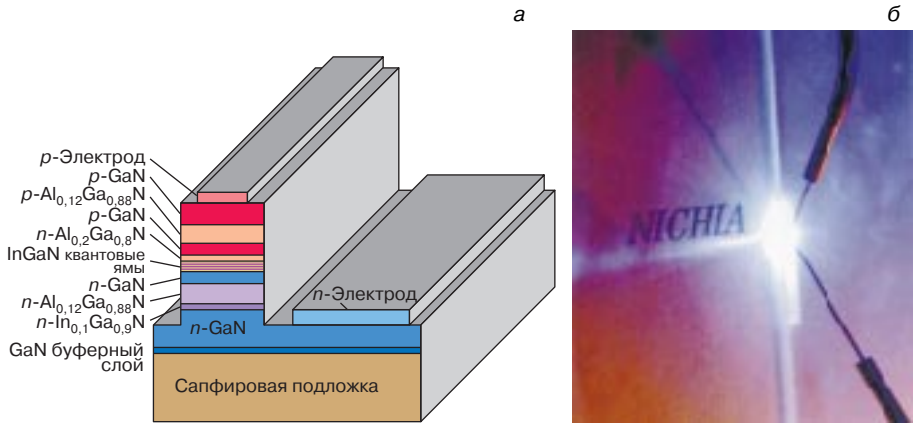


Рис. 5. *а* – структура инжекционного лазера, состоящая из множественных InGaN квантовых ям; *б* – излучение голубого лазерного диода в импульсном режиме при комнатной температуре

Electric" и многими университетскими группами Накамура завершил проект создания 400-нм лазерного диода на 5 мВт при токе 40 мА. Выиграв нелегкий поединок, "Nichia" вновь показала, что эта честолюбивая компания способна удивлять мир.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования в области создания источников когерентного излучения видимого и ультрафиолетового диапазонов являются одной из самых горячих тем (hot topic) благодаря их многочисленным и важным практическим применениям, поэтому в разработки свето- и лазерных диодов вкладываются огромные средства. В результате за последние шесть лет совершен прорыв в исследованиях и промышленном освоении полупроводниковых структур и приборов на основе нитрида галлия. И если в 1996 году объем продаж нитридных материалов, структур и приборов составлял 220 млн долларов с годовым приростом 50%, то в 2000 году – 990 млн, а на 2003 году запланирован объем 3 млрд долларов. Появление такого рынка стимулировало проведение обширных фундаментальных и прикладных исследований и привело к лавинообразному росту числа публикаций в этой стремительно развивающейся области. И мы еще не раз будем свидетелями неожиданных открытий и появления новых удивительных приборов и устройств.

Автор выражает глубокую благодарность профессору Т. Сакураю (университет Тохоку, Япония) и доктору Ш. Накамуре ("Nichia Co., Ltd", Япония) за многочисленные обсуждения предмета данной статьи, позволившие воспроизвести историю создания лазеров сине-зеленого спектра из первых рук.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

В наши дни "Nichia" увеличила выпуск продукции до 10 млн и более приборов в месяц, штат сотрудников вырос от 200 человек в 1979 году до 1000 в 1997 году, а объем продаж – соответственно от 20 млн до 300 млн долларов. Благодаря возросшему авторитету компании значительно выросло производство и традиционной продукции – люминофоров, и она стала крупнейшим их производителем в Японии.

Накамура, достигший своим трудом успеха и международного признания, стал человеком "японской мечты". Если в 1990 году это был никому не известный бедный 36-летний инженер без ученой степени, без публикаций (хотя и потратил десять лет на исследования), не добившийся результатов в промышленных разработках, то теперь он высокооплачиваемый руководитель исследовательского отделения компании с большим штатом, великолепным оборудованием, обладатель многих правительственных наград, владелец более сотни патентов, автор книг, многих статей и обзоров в самых авторитетных журналах. Он сохранил верность своей компании несмотря на многочисленные и весьма лестные предложения со стороны многих японских и иностранных фирм, а захолустный городок Амано, где расположена штаб-квартира "Nichia", в результате его деятельности стал престижным местом проживания. Накамура организовал и провел в Амано две представительные международные конференции по нитридам элементов группы III и их применениям, реально превратив его в международный центр оптоэлектроники.

Примечание рецензента

За то время, что профессор Р.З. Бахтизин писал статью, рецензент – замечания, а автор их учитывал, доктор Шуджи Накамура все-таки принял лестное предложение американцев и перешел работать в университет Калифорнии в Санта-Барбаре, покинув фирму “Nichia”, в которой работал 20 лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nakamura S., Fasol G.* The Blue Laser Diodes (GaN Based Light Emitters and Lasers). B.; Heidelberg: Springer, 1997. 175 p.

2. *Ponce F.A., Bour D.P.* Nitride-Based Semiconductors for Blue and Green Light-Emitting Devices // Nature. 1997. Vol. 386. P. 351–359.

3. *Nakamura S.* Light Emission Moves into the Blue // Phys. World. 1998. Vol. 11, № 2. P. 31–35.

4. *Юнович А.Э.* Ключ к синему лучу, или О светодиодах и лазерах, голубых и зеленых // Химия и жизнь. 1999. № 5/6. С. 46–48; Светодиоды на основе гетероструктур из нитрида галлия и его твердых растворов // Светотехника. 1996. Вып. 5/6. С. 2–7.

5. *Белявский В.И.* Физические основы полупроводниковой нанотехнологии // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 10. С. 92–98.

6. *Демиховский В.Я.* Квантовые ямы, нити, точки: Что это такое? // Там же. 1997. № 5. С. 80–86.

Рецензент статьи А.Э. Юнович

* * *

Рауф Загидович Бахтизин, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой физической электроники Башкирского государственного университета, член редколлегии журнала "Journal of Micromechanics and Microengineering". Область научных интересов – эмиссионная электроника, физика поверхности твердых тел. Автор более 230 научных статей и двух монографий.