

Современные светодиоды

В последние годы мы стали свидетелями стремительного развития и революционного совершенствования светодиодов (сокращенно СИД — светоизлучающие диоды, в английском варианте LED — light emitting diodes) — твердотельных полупроводниковых источников света.

Еще недавно светодиоды были всего лишь устройствами индикации, а сегодня это уже высокоэффективные источники света, которые в ближайшие 10–15 лет преобразят мир искусственного освещения и полностью заменят лампы накаливания.

Юрий Давиденко

david@leasat.net

Чтобы понять, почему светодиодам пророчат большое будущее, рассмотрим подробнее их устройство, историю создания и развития.

В 1907 году английский инженер Раунд, трудившийся во всемирно известной лаборатории Маркони, случайно заметил, что у работающего детектора вокруг точечного контакта возникает свечение. Все-рз же заинтересовался этим физическим явлением и попытался найти ему практическое применение «непостижимо талантливый русский» Олег Владимирович Лосев.

Обнаружив в 1922 году во время своих ночных радиовахт свечение кристаллического детектора, этот, тогда еще 18-летний, радиолюбитель не ограничился констатацией «странного» факта, а незамедлительно перешел к оригинальным экспериментам. Стремясь получить устойчивую генерацию кристалла, он пропускал через точечный контакт диодного детектора ток от батарейки. То есть имел дело не с чем иным, как с прототипом полупроводникового прибора, названного впоследствии светодиодом. Весь мир заговорил об «эффekte Лосева», на практическое применение которого изобретатель успел получить (до своей гибели на войне в 1942 г.) четыре (!) патента.

С 1951 года центр по разработке «полупроводниковых лампочек», действующих на основе «эффекта Лосева», переместился в Америку, где его возглавил К. Леховец (США). 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 композитных полупроводников: соединений галлия (Ga), арсеникума (мышьяка — As), фосфора (P), индия (In), алюминия (Al), других элементов периодической системы Менделеева.

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

Первые имеющие промышленное значение светодиоды были созданы в 60-е годы на основе структур GaAsP/GaP Ником Холоньяком (США) с красным и желто-зеленым свечением. Внешний квантовый выход был не более 0,1%. Длина волны излучения этих приборов находилась в пределах 500–600 нм — области наивысшей чувствительности человеческого глаза, — поэтому яркость их желто-зеленого излучения была достаточной для целей индикации. Световая отдача светодиодов при этом составляла приблизительно 1–2 лм/Вт.

Термины, используемые для характеристики светодиодов

Квантовый выход — это число излученных квантов света на одну рекомбинировавшую электронно-дырочную пару. Различают внутренний и внешний квантовый выход. Внутренний — в самом p-n-переходе, внешний — для прибора в целом (ведь свет может теряться «по дороге» — поглощаться, рассеиваться). Внутренний квантовый выход для «хороших» кристаллов с мощным теплоотводом достигает почти 100%, рекорд внешнего квантового выхода для красных светодиодов составляет 55%, а для синих — 35%.

Внешний квантовый выход — одна из основных характеристик эффективности светодиода.

Светоотдача — количество излучаемых люменов на единицу потребляемой мощности люмен/ватт (лм/Вт). Этот параметр показывает, сколько энергии, поступающей на светодиод превращается в свет, а сколько в тепло. Чем выше этот параметр, тем лучше.

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

Как устроен и работает светодиод?

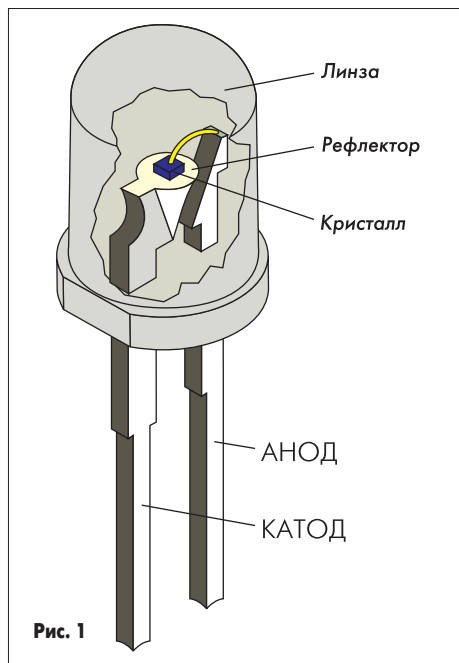
Прежде всего, светодиод — полупроводниковый прибор с электронно-дырочным p-n-переходом или контактом «металл — полупроводник», генерирующий (при прохождении через него электрического тока) оптическое (видимое) излучение. Напомним, что p-n-переход — это «кирпичик» полупроводниковой электронной техники, представляющий соединенные вместе два куска полупроводника с разными типами проводимости (один с избытком электронов — «n-тип», второй с избытком дырок — «p-тип»). Если к p-n-переходу приложить «прямое смещение», то есть подсоединить источник электрического тока плюсом к p-части, то через него потечет ток.

Нас интересует то, что происходит после того, как через прямо смещенный p-n-переход пошел ток, а именно момент рекомбинации (соединение) носителей электрического заряда — электронов и дырок, когда имеющие отрицательный заряд электроны «находят пристанище» в положительно заряженных ионах кристаллической решетки полупроводника. Оказывается, что такая рекомбинация может быть излучательной, при этом в момент встречи электрона и дырки выделяется энергия в виде излучения кванта света — фотона.

Но не всякий p-n-переход излучает свет. Почему? Во-первых, ширина запрещенной зоны в активной области светодиода должна быть близка к энергии квантов света видимого диапазона. Во-вторых, вероятность излучения при рекомбинации электронно-дырочных пар должна быть высокой, для чего полупроводниковый кристалл должен содержать мало дефектов, из-за которых рекомбинация происходит без излучения. Эти условия в той или иной степени противоречат друг другу.

Реально, чтобы соблюсти оба условия, одного p-n-перехода в кристалле оказывается недостаточно и приходится изготавливать многослойные полупроводниковые структуры, так называемые гетероструктуры, за изучение которых российский физик Жорес Алферов (академик, директор Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе, лауреат Ленинской премии) получил золотую медаль Американского физического общества за исследование гетероструктур на основе $Ga_{1-x}Al_xAs$ еще в 70-х годах. В 2000 году, когда стало ясно, как велико значение этих работ для развития науки и техники, насколько важны их практические применения для человечества, ему была присуждена Нобелевская премия.

Самая распространенная конструкция светодиода — традиционный 5-миллиметро-



вый корпус (рис. 1). Конечно, это не единственный вариант «упаковки» кристалла.

Светодиод имеет два вывода — анод и катод. На катоде расположен алюминиевый параболический рефлектор (отражатель). Внешне он выглядит, как чашеобразное углубление, на дно которого помещен светоизлучающий кристалл. Активный элемент — полупроводниковый монокристалл — в большинстве современных светодиодов используется в виде кубика (чипа) размерами $0,3 \times 0,3 \times 0,25$ мм, содержащего p-n или гетеропереход и омические контакты. Кристалл соединен с анодом при помощи перемычки из золотой проволоки. Оптически прозрачный полимерный корпус, являющийся одновременно фокусирующей линзой вместе с рефлектором, определяет угол излучения (диаграмму направленности) светодиода.

Что касается яркости светодиода, то для нее далеко не безразлична и оптическая прозрачность n-области (сверхтонкие пленки полупроводников вполне прозрачны). Ну а цвет (частота) излучения, имея четкую функциональную связь с энергией испускаемых фотонов, зависит от материалов полупроводниковых p-n-переходов. В частности, чистый монокристалл GaAs дает инфракрасный луч, небольшая добавка Al и/или P меняет цвет излучения на красный. Зеленый свет испускает GaP. Использование же p-n-перехода на основе композиции AlInGaP позволяет получать желтое или оранжевое излучение.

Работая, одиночный светодиод потребляет очень небольшую энергию: при напряжении 2–4 В и токе 10–30 мА электрическая мощность варьируется от 20 до 120 мВт. При КПД в 5–25% в виде света излучается 1–30 мВт (сила света 1–30 кд). Для сравнения — миниатюрная лампа накаливания работает при напряжении около 12 В и токе 50–100 мА.

В отличие от ламп накаливания светодиоды излучают свет в относительно узкой полосе спектра, ширина которой составляет 20–50 нм. Они занимают промежуточное положение между лазерами, свет которых монохроматичен (излучение со строго определенной дли-

ной волны), и лампами различных типов, излучающих белый свет (смесь излучений различных спектров). Иногда такое «узкополосное» излучение называют «квазимонохроматическим». 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 30 лм/Вт и более. Например, новейшие приборы Luxeon производства американской компании Lumileds (совместное предприятие Agilent Technologies и Philips Lighting) обеспечивают 50 лм/Вт для красной и даже 65 лм/Вт для оранжево-красной части спектра. Впрочем, и это не рекорд — для желто-оранжевых светодиодов планка 100 лм/Вт уже взята.

Долгое время развитие светодиодов сдерживалось отсутствием приборов, излучающих в синем диапазоне. Трудности по изготовлению голубых светодиодов пришлось преодолевать «всем миром». Голубые светодиоды можно получить на основе полупроводников с большой шириной запрещенной зоны — карбида кремния, соединений элементов II и IV группы или нитридов элементов III группы (помните таблицу Менделеева?).

У светодиодов на основе SiC оказался слишком мал КПД и низок квантовый выход излучения — то есть число излученных квантов на одну рекомбинировавшую пару. У светодиодов на основе твердых растворов селенида цинка ZnSe квантовый выход был выше, но они перегревались из-за большого сопротивления и служили недолго. Оставалась надежда на нитриды. Нитрид галлия GaN плавится при 2000 °С, при этом равновесное давление паров азота составляет 40 атмосфер; ясно, что растить такие кристаллы непросто. Аналогичные соединения — нитриды алюминия и индия — тоже полупроводники. Их соединения образуют тройные твердые растворы с шириной запрещенной зоны, зависящей от состава, который можно подобрать так, чтобы генерировать свет нужной длины волны, в том числе и синий. 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 (МБЕ — Molecular Beam Epitaxy) в условиях сверхвысокого вакуума и метод осаждения пленок из металлоорганических соединений (MOCVD — Metalorganic Chemical Vapor Deposition). 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. Проблему не удавалось решить до конца 80-х годов.

Первым, еще в 70-х годах, голубой светодиод на основе пленок нитрида галлия на сапфировой подложке удалось получить профессору Жаку Панкову (Якову Исаевичу Панчечникову) из фирмы IBM (США). Квантовый выход был достаточен для практики

(доли %), но срок их службы был ограничен. В р-области р-n-перехода концентрация дырок была мала, и сопротивление диодов оказалось слишком большим, они довольно быстро перегревались и выходили из строя. Работы Панкова в то время руководство фирмы IBM не поддержало.

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, локально становится ярким люминофором. Были предложены устройства оптической памяти с пространственным разрешением 1–10 мкм. Но причину яркого свечения — активацию акцепторов Zn под влиянием пучка электронов — тогда понять не удалось.

Эту причину раскрыли И. Акасаки и Х. Амаи из Нагойского университета. Дело оказалось в том, что примесные атомы Zn при росте кристалла реагировали с неизбежно присутствующими атомами водорода, образовывали нейтральный комплекс Zn-H⁺ и переставали работать акцепторами. Обработка электронным пучком разрушала связи Zn-H⁺ и возвращала атомам Zn акцепторную роль. Поняв это, японские ученые сделали принципиальный шаг в создании р-n-переходов из GaN. Для аналогичного акцептора, Mg, было показано, что обработкой сканирующим электронным пучком можно р-слой GaN с примесью Mg сделать ярко люминесцирующим, имеющим большую концентрацию дырок, которая необходима для эффективной инжекции дырок в р-n-переход. Авторы заявили патент на эффективное легирование GaN р-типа.

Однако разработчики светодиодов не обратили должного внимания на их публикации.

А прорыв в изготовлении голубых светодиодов совершил С. Накамура из фирмы Nichia Chemical. 29 ноября 1993 года, когда компания Nichia Chemical Industries 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 С. Накамурой, молодым исследователем из Nichia, но после появления столь сенсационного заявления все хотели узнать, кто такой Накамура и что представляет собой эта компания.

Сюдзи Накамура родился в 1954 году на острове Сикоку, самом маленьком и наименее населенном из четырех главных островов Японии, где и расположена Nichia; в 1979 году окончил университет в Токусиме. 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 перспективной работой 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.

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 сине-зеленых светодиодов. Зная, что главной проблемой является получение подходящих материалов, а хорошим методом их выращивания — MOCVD (Metalorganic Chemical Vapor Deposition) — метод осаждения пленок из металлоорганических соединений, он поехал для его освоения в университет штата Флорида (США). После посещения множества светодиодных конференций Накамура вспомнил: «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 осознал проблему согласования 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 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 следстви-

ем обработки пучком электронов, а результатом прогрева. Позже оказалось, что получению проводимости р-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 отдельных потока газов: главный, переносящий с высокой скоростью параллельно подложке смесь компонентов реакции — триметилгаллия (CH₃)₃Ga и аммиака NH₃, источников Ga и N — в потоке газа, носителя молекулярного водорода; и вспомогательный, направленный перпендикулярно подложке, переносящий неактивный газ N₂, 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 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 своим 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. 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 диода на 2000 мккд, 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/AlGaIn с активным слоем InGaN, легированным Zn.

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. Он состоит из 3-нанометрового активного слоя $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$, заключенного между слоями p-AlGaIn и n-GaN, выращенными на сапфире. Такой тонкий слой InGaIn сводит к минимуму влияния рассогласования решеток: упругое напряжение в слое может быть снято без образования дислокаций и качество кристалла остается высоким. Здесь слой InGaIn образует одиночную квантовую яму, 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 InGaIn и окружающим материалом, а изменение толщины дает возможность дополнительно управлять длиной волны излучения. В 1995 году при еще меньшей толщине слоя InGaIn 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 5×10^4 ч (измеренное), а по теоретическим оценкам — более 10^6 ч (около 150 лет!).

Фирма Nichia запатентовала ключевые этапы технологии и к концу 1997 года выпускала уже 10–20 млн голубых и зеленых светодиодов в месяц.

Интересна также история появления сверхъярких голубых и зеленых светодиодов в России. Об этом рассказывает профессор МГУ Александр Эммануилович Юнович, один из ведущих российских специалистов в области оптоэлектроники:

«Люминесценцию карбида кремния впервые наблюдал Олег Владимирович Лосев в Нижегородской радиотехнической лаборатории в 1923 г. и показал, что она возникает вблизи p-n-перехода.

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].

Первая научная статья о кристаллах нитрида галлия была опубликована профессором МГУ Г. С. Ждановым в 30-х гг. Люминесценцию в гетероструктурах на основе арсенида галлия впервые исследовали в лаборатории Ж. И. Алферова в 60-х гг. и показали, что можно создать структуры с внутренним квантовым выходом, близким к 100%. Разработки структур и светодиодов на основе нитрида галлия велись в ленинградских Политехническом и Электротехническом институте в Калуге, в Зеленограде в 70-х гг.,

но они тогда не привели к созданию эффективных голубых светодиодов.

В 1995 году я прочел первые статьи Накамуры и понял, что «голубая проблема» в принципе решена. Тогда же я получил грант сороковского фонда. В декабре на эти деньги я смог поехать на конференцию в США, и там профессор Жак Панков познакомил меня с С. Накамурой. Я забросил наживку: мол, хочу приобщить студентов Московского университета к передовым достижениям в области голубых светодиодов и рассказать им о столь замечательном изобретении. Рыбка клюнула, и в феврале я получил от д-ра С. Накамуры из Японии бандеролью 10 светодиодов — от фиолетового до зеленого. Все потом оказалось просто — фирма Nichia Chemical начинала выпуск светодиодов на рынок и была заинтересована в научной рекламе. В лаборатории МГУ мы их досконально исследовали, сняли все характеристики и получили новые научные результаты. Д-р С. Накамура дал любезное согласие на совместную публикацию наших первых статей.

Одновременно специалисты из группы Бориса Феропонтовича Тринчука в Зеленограде продемонстрировали образцы зеленых светодиодов начальникам из ГАИ и получили положительный отзыв. Все дело в том, что эта группа сделала опытный образец светодиодного светофора, но у них не было хороших зеленых светодиодов. Светофоры с новыми сверхъяркими зелеными светодиодами намного превосходили светофоры с лампами, и московское правительство сделало заказ на 1000 светодиодных светофоров к 850-летию Москвы. Такое везение!

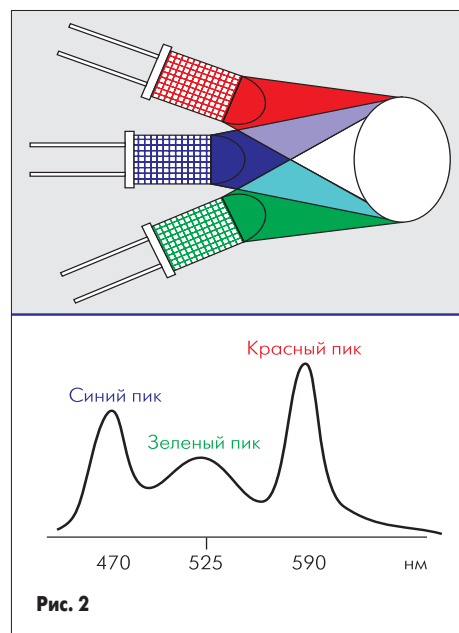
Как раз тогда у нас гостила киргизская скрипачка Райкан Карагулова — выпускница Московской консерватории, ученица моей жены, которая работала в Японии первым концертмейстером симфонического оркестра в Осаке. Выяснилось, что место ее работы находится неподалеку от фирмы Nichia Chemical! Б. Ф. Тринчук дал ей тысячу долларов и попросил купить на них и прислать на мой адрес 200 зеленых светодиодов. Из них были изготовлены первые светофоры из той юбилейной тысячи. Москва стала первым в мире городом с массовым применением светодиодных светофоров.

Наши ученые и инженеры в НИИ «Сапфир» пытались повторить достижение японцев и изготовить структуры на основе нитридов для голубых и зеленых светодиодов на старой эпитаксиальной установке, которую пришлось модернизировать, чтобы достичь более высоких температур и давлений. Но инициатива заглохла из-за отсутствия денег и интереса руководства».

Изобретение синих светодиодов замкнуло «RGB-круг» и дало возможность получения СИД белого света.

На сегодняшний момент существует три способа получения белого света с помощью светодиодов:

- смешивание в определенной пропорции излучения красного, зеленого и синего светодиодов. При этом могут быть использованы как отдельные светодиоды разных



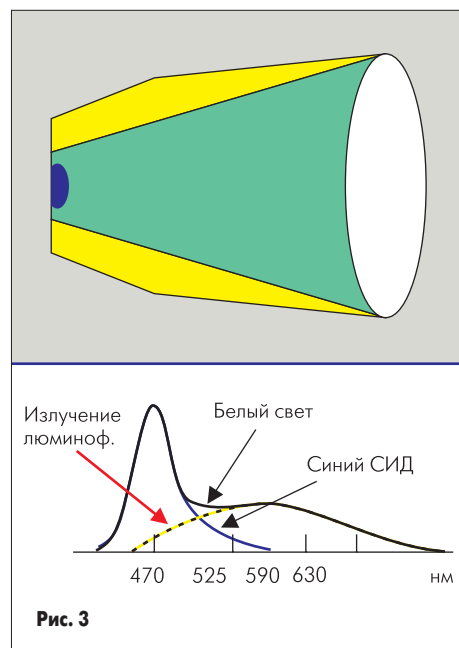
цветов, так и 3-кристальные светодиоды, объединяющие кристаллы красного, синего и зеленого свечения в одном корпусе.

На рис. 2 показано получение белого света путем смешивания в определенной пропорции излучения красного, зеленого и синего светодиодов.

Основой более дешевого и распространенного способа получения светодиода белого света является полупроводниковый кристалл структуры InGaIn, излучающий на длине волны 460–470 нм (синий цвет) и нанесенный сверху на поверхность кристалла люминофор на основе YAG (иттрий-гадолиниевых гранатов, активизированный Ce^{3+}), излучающий в широком диапазоне видимого спектра и имеющий максимум в его желтой части спектра.

На рис. 3 показано получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесенного на него слоя желтого люминофора.

Человеческий глаз комбинацию такого рода воспринимает как белый цвет. Такие светодиоды намного дешевле 3-кристальных, обладают хорошей цветопередачей, а по све-



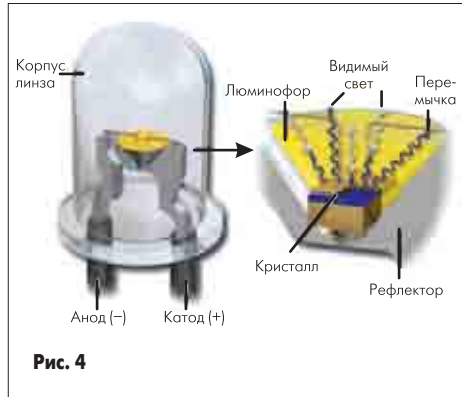


Рис. 4

тоотдаче (до 30 лм/Вт) они уже обогнали лампы накаливания (7–10 лм/Вт).

На рис. 4 показано строение 5-миллиметрового светодиода, излучающего белый свет.

Еще один метод получения белого света — возбуждение 3-слойного люминофора светодиодом ультрафиолетового спектра (УФ-СИД).

На рис. 5 показано получение белого света с помощью ультрафиолетового светодиода и RGB-люминофора.

У каждого способа есть свои достоинства и недостатки. Технология RGB в принципе позволяет не только получить белый цвет, но и перемещаться по цветовой диаграмме при изменении тока через разные светодиоды. Этим процессом можно управлять вручную или посредством программы, можно также получать различные цветовые температуры. Поэтому RGB-матрицы широко используются в светодинамических системах. Кроме того, большое количество светодиодов в матрице обеспечивает высокий сум-

марный световой поток и большую осевую силу света. Но световое пятно из-за аберраций оптической системы имеет неодинаковый цвет в центре и по краям, а главное, из-за неравномерного отвода тепла с краев матрицы и из ее середины светодиоды нагреваются по-разному, и, соответственно, по-разному изменяется их цвет в процессе старения — суммарные цветовая температура и цвет «плывут» за время эксплуатации. Это неприятное явление достаточно сложно и дорого скомпенсировать.

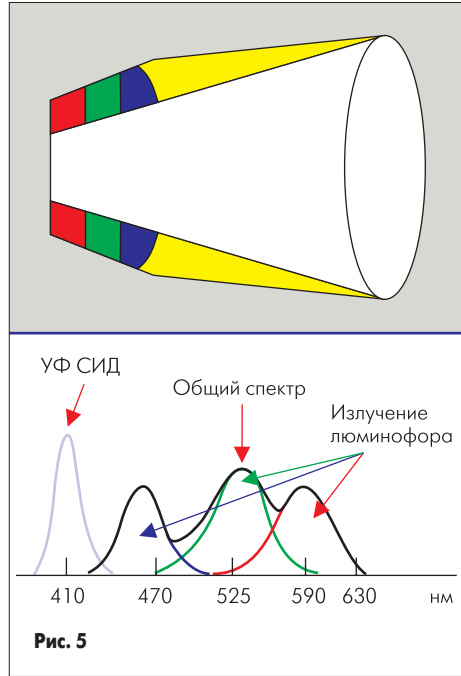


Рис. 5

Белые светодиоды с люминофорами существенно дешевле, чем светодиодные RGB-матрицы (в пересчете на единицу светового потока), и позволяют получить хороший белый цвет. И для них в принципе не проблема попасть в точку с координатами (0,33; 0,33) на цветовой диаграмме МКО. Недостатки же таковы: во-первых, у них меньше, чем у RGB-матриц, светоотдача из-за преобразования света в слое люминофора; во-вторых, достаточно трудно точно проконтролировать равномерность нанесения люминофора в технологическом процессе и, следовательно, цветовую температуру; и, наконец, в-третьих — люминофор тоже стареет, причем быстрее, чем сам светодиод.

Промышленность на данный момент выпускает как светодиоды с люминофором, так и RGB-матрицы — у них разные области применения.

Как уже упоминалось, строение светодиода не ограничивается стандартным 5-мм корпусом и определяется мощностью излучения и прямым током, проходящим через диод. Световой поток, излучаемый светодиодом, напрямую зависит от прямого тока, протекающего через светодиод. Чем больше ток, тем ярче светит светодиод. Это связано с тем, что чем больше ток, тем больше электронов и дырок поступают в зону рекомбинации в единицу времени. Но ток нельзя увеличивать до бесконечности. Из-за внутреннего сопротивления полупроводника и р-п-перехода диод перегреется и выйдет из строя.

Продолжение следует