

Самая светлая революция и ее творцы

Ю. НОСОВ

Небольшое вступление

Нас уже не удивляет, что во многих светофорах лампочки заменили светодиодами, что подсветка жидких кристаллов полностью перешла к светодиодам, а огромные цветные экраны на стадионах, площадях, эстрадах не только дублируют тех, кого аудитория почти не видит, но и прихорашивают их, а завтра и вовсе заменят – «интеллектуальные», «умные» светодиоды способны на чудеса информационных мистификаций. Светодиодные маяки, створные огни, бакены несомненно эффективнее традиционных; пожаро-, взрыво-, ударобезопасные фонари служат шахтерам, дайверам, спелеологам; ярчайшие, но холодные светильники обеспечивают комфортные условия хирургам, ювелирам, ТВ-дикторам.

А ведь еще совсем недавно, лет десять тому назад, светодиоды были знакомы нам как исключительно скромные, простенькие светлячки в кнопках включения-выключения телевизоров, компьютеров, стиральных машин. Теперь нас не удивляют и «новые места» работы светодиодов: фары дальнего света, салоны самолетов, повсеместная подсветка зданий. Вслед за этим мы без эмоций воспримем и решающий светодиодный прорыв – освещение наших квартир (пока это лишь область фантазии энергетиков, строителей, продвинутых дизайнеров).

Говорят, утрата удивительной способности удивляться есть одно из самых неприятных последствий воздействия технического прогресса на человека – черствеет душа. А удивляться есть чему. Активная область светодиодного чипа, в которой рождается свет, по своему объему в 100000 раз меньше нити накала 60-ваттной лампочки, а светят они почти одинаково; нить накала перегорает через 500 часов, а светодиод может светить «вечнно», правда в паспортах для страховки гарантируют «лишь» 50–100 тысяч часов! Светодиоды уже сравнялись с лучшими люминесцентными трубками, но если требуется засвечивать какую-то определенную зону, то светодиоды оказываются экономичнее своих предшественников в десятки раз. И достигается это лишь специальной формой пластмассового корпуса-линзы, без дорогой и громоздкой внешней оптики. Когда необходим какой-нибудь спектрально-однородный свет, светодиоды вообще вне конкуренции – это заложено в их природе, светофильтры им не нужны (как раз наоборот – излучать в широком спектре, свойственном белому свету, светодиоды не могут, но эту проблему уже решили).



Олег Владимирович Лосев

Итак, светодиодную революцию, начавшуюся в 1990-е годы, в ее внешнем проявлении характеризуют три момента: резкое повышение интенсивности и экономичности свечения («новые» светодиоды называют суперяркими); свечение любого цвета от густомалинового до фиолетового, включая и белый; формирование требуемого пространственного распределения светового потока. Общий итог – создание бурно развивающейся индустрии «полупроводникового света», способной принципиально преобразовать информационную, развлекательную и осветительную технику. Говоря высоким слогом, к 2020–2025 годам ожидается кардинальное изменение световой, цветовой, информационной, культурообразующей составляющих среды обитания человека.

Содержательная же суть революции сосредоточена в крохотном светодиодном чипе, представляющем собой сложнейшую квантово-механическую структуру, изготавливаемую методами нанотехнологии. Успех на дол-

гом и трудном пути был достигнут общими усилиями американских, русских, японских, немецких исследователей и технологов. А началось все в далеком 1922 году, когда Олег Лосев, девятнадцатилетний лаборант Нижегородской радиолаборатории, занялся кристаллическими детекторами... Но прежде – необходимое отступление.

О том, как мы видим, и о световых измерениях

Свет воспринимается сетчаткой, устилающей глазное дно, именно на нее линзой-хрусталиком фокусируется изображение окружающих предметов (рис.1). Сетчатка содержит около 125 миллионов нервных фоторецепторов, которые из-за их продолговатости называют



Рис. 1. Глаз человека в разрезе

палочками, и примерно 6–7 миллионов колбочек, получивших свое название из-за конической формы. Палочки сконцентрированы в основном на краях сетчатки, а колбочки располагаются в небольшой центральной зоне. Колбочки в сотни раз менее чувствительны, чем палочки, но зато «различают» цвета, а палочки реагируют лишь на изменения яркости света. Кавычки приходится использовать потому, что зрительный образ формируется в затылочных областях головного мозга, а глаз – это лишь фотоприемник, принимающий внешнюю информацию, преобразующий ее и по нервным волокнам передающий в мозг. Иными словами, «смотрим» мы глазами, а «видим» затылком. Глазная автоматика отлажена Природой так, что днем активны только колбочки, а в сумерках активны только палочки. Поэтому утверждение «ночью все кошки серы...» имеет вполне научное обоснование.

Цветовосприятие – уникальная способность человека; по-видимому, оно доступно исключительно высоко-координированному мозгу. Видят все животные, многие зорче нас, некоторые почти в полной темноте, но практически все они пребывают в вечных серых сумерках (отличает ли собака сыр от мяса по цвету – до сих пор предмет дискуссии ученых). А нам, пожалуй, просто невозможно представить жизнь без красок, на уровне подсознания психика коррелирует с цветовой средой: лирическое настроение «окрашено» в голубой цвет и, наоборот, голубое погружает нас в лирику; драма – «фиолетова», оранжевое вызывает мажорный

энтузиазм, мягкие охристо-коричневые тона ассоциируются с ностальгической грустью.

Обычный человек различает до двухсот цветовых оттенков, художники – до нескольких тысяч (так они утверждают, но, возможно, что-то здесь примешано другое), а в специальных технических цветовых атласах (например, в текстильной промышленности) перенумерованы миллионы цветов. Где еще можно найти такое многообразие – в звуках, запахе, во вкусовых ощущениях? Смешно даже пытаться сравнивать.

Физиологически наше цветовосприятие основано на наличии трех видов колбочек, избирательно чувствительных к красному, зеленому и синему цветам (трихроматическое зрение). Используя технические аналогии, можно сказать, что каждый светочувствительный «пиксель» глаза образован R-G-B триадой, как в цветной видеокамере (R, G, B – первые буквы соответствующих английских слов red, green, blue).

Создатели светодиодов стремятся в максимальной степени удовлетворить «требования» глаза. Для освещения нужен белый свет с непрерывным спектром, как у солнца, – этим обеспечивается идеальная цветопередача, естественность окраски окружающих предметов. Для отображения информации надежнее использовать спектрально однородные цвета. Иными словами, в первом случае глаз реагирует на вид и цвет освещенных предметов, во втором – на сам источник света.

Световые измерения также подстраиваются под физиологию глаза, его резко изменяющуюся спектральную чувствительность (рис.2). Однаковыми считаются воздействия, вызывающие одинаковые зрительные

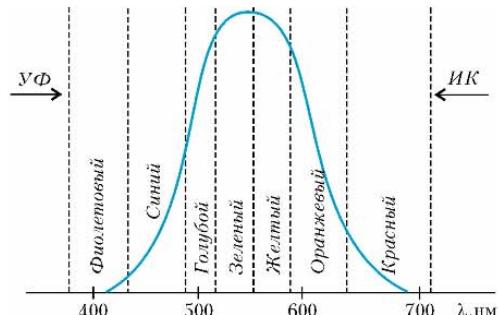


Рис. 2. Спектральная чувствительность человеческого глаза ощущения, хотя физически они могут сильно различаться.

Мощность световой волны называется световым потоком и измеряется в люменах (лм). Для примера укажем, что «физическая цена» 1 лм в зеленой области составляет $1/680$ Вт, в фиолетовой – $1/62$ Вт, в красной – $1/6$ Вт, точные пересчетные коэффициенты есть для каждой спектральной точки. Шестидесятиваттная лампочка излучает 500 лм, люминесцентная трубка – 5000 лм, уличный натриевый светильник – 10–30 тыс. лм. Светоотдача (лм/Вт) характеризует эффективность преобразования «электричество – свет», у лампочки накаливания это 10–11 лм/Вт, у лампы дневного света 80 лм/Вт.

Светильники, освещдающие какую-то площадку (например, настольная лампа), характеризуют силой света (пространственной плотностью светового потока), измеряемой в кандалах ($1 \text{ кд} = 1 \text{ лм}/\text{стер}$), и углом излучения. Для примера, светодиодный светофор обеспечивает силу света $300\text{--}500 \text{ кд}$ в угле 20 градусов. Световой поток в 1 м^2 , равную 1 люксу (1 лк); для чтения вполне комфортно 500 лк , в операционной иногда хотят иметь и 50000 лк . Яркость – это отношение силы света к площади излучения, у светофора она составляет $10 \text{ тыс. кд}/\text{м}^2$, а у домашнего ТВ экрана – $500 \text{ кд}/\text{м}^2$.

«Свечение Лосева»

Вернемся к нашей истории.

Лосев, 1922 год... Поначалу он и лаборантом-то не был, его взяли посыльным, т.е. никем и с никакой зарплатой, но главнос – разрешили заниматься радиотехникой. Тогда это было «болезнью» любознательного юношества, как в 30-е годы – авиация, в 50-е – атомная физика, сейчас – бизнес. Олег родом из Твери, в Нижнем Новгороде у него не было «ни кола, ни двора», он ночевал в здании лаборатории на предчарданной лестничной площадке, голода (как все) и работал, работал, работал до восторга и изнеможения.

Неожиданно и вопреки всякой логике он обнаружил, что некоторые кристаллические детекторы не только детектировали, но и усиливали радиосигналы – объяснение этому эффекту дали лишь через три десятилетия, после изобретения транзистора. Сконструированный на таком детекторе радиоприемник – *кристиадин* – принес Лосеву мировую известность и место в истории техники.

Но здесь речь о его другом, еще более значимом открытии. Олег заметил, что карбидокремниевые детекторы при пропускании через них тока испускают слабый зеленоватый свет, и с 1927 года он занялся этим явлением специально, посвятив ему всего себя. (Увы, жизнь его оказалась обидно короткой – Олег Владимирович Лосев скончался от истощения и холода в блокадном Ленинграде в январе 1942 года.) Его эксперименты показали, что свечение не было связано ни с поверхностными электрическими разрядами, ни с разогревом, «холодный свет» шел из самого кристалла.

Уже в 1930 году Лосев дал удовлетворительную теоретическую трактовку своим опытам на основе существующих квантовых представлений. Говоря сегодняшним языком, он открыл *инжекционную люминесценцию* полупроводников, тогда на Западе называемую «свечением Лосева» (Losev Light). Его мировому признанию открыло дверь то обстоятельство, что он оперативно публиковался в немецких научных журналах. По-видимому, существенно и то, что по жизни с ним рядом оказывались такие замечательные учёные, как В.Л.Лёвшин, В.К.Лебединский, М.А.Бонч-Бруевич, А.Ф.Иоффе. Они не были его научными руководителями в общепринятом понимании, но несомненно оказали огромное влияние на его личность и на его признание. («Юноше, обдумывающему житье», подскажем, что попасть в подобную «компанию» не менее

важно, чем родиться с талантом.) Характерно, что никто из мэтров не приписывался к Лосеву в соавторы – тогдашняя этика научного сообщества была щепетильна.

Для практических целей «свечение Лосева» было слишком слабым, тогда наука еще не знала, как его усилить, а тем временем грянула вторая мировая война, и интерес к занятому явлению фактически пропал. Лишь спустя почти два десятилетия, уже после изобретения транзистора (1948) и разработки американцем У.Шокли теории *p–n*-перехода (1949) вновь обратились к объяснению люминесценции полупроводников.

При протекании тока через диод часть электронов полупроводника «забрасывается» с равновесного нижнего энергетического уровня на более высокий уровень возбуждения, решающую роль при этом играет налиение *p–n*-перехода, потенциальный барьер которого преодолевают электроны. А обратные переходы электронов с высокого квантового уровня на более низкие сопровождаются выделением энергии в виде фотонов, поток которых образует световое излучение (рис.3). Максимальный энергетический зазор E_3 определяется самой природой полупроводника ($E_3 = E_n - E_b$, где E_n и E_b – границы зоны проводимости и валентной зоны соответственно) и называется шириной запрещенной зоны, положение других уровней E_1, E_2, \dots определяется видом вводимых легирующих примесей и неконтролируемыми дефектами. Чем значительнее энергетический «скачок» электрона ΔE , тем меньше длина волны излучения λ , предельные возможности реализуются при $\Delta E = E_3$. Нетрудно видеть, что для генерации «синих» фотонов ($\lambda = 465 \text{ нм}$) пригоден только нитрид галлия GaN, тогда как красно-желтую часть спектра успешно могут «закрыть» тройные соединения GaAsP и GaAlAs. Отметим, что нередко переходы электронов верхнего уровня на нижний происходят не прямо, а через множество промежуточных уровней с испусканием такого же множества квантов, соответствующих инфракрасному (ИК) излучению. Но это – *безызлучательные переходы*, которые с точки зрения генерации света представляют собой бесполезное растрачивание энергии.

Развитая теория (1951) объяснила, в частности, низкую интенсивность «свечения Лосева» – «вина» полностью ложилась на карбид кремния, где преобладают безызлучательные переходы. Разобрались, что не подходят транзисторные германий и кремний, «вычислили», что именно нужно для эффективной люминесценции, но... таких полупроводников в природе не существовало.

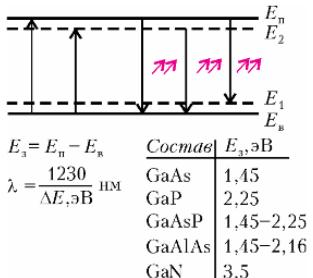


Рис. 3. Схема генерации света в полупроводнике

Первый акт светодиодной истории завершился. Успех? Провал? Будущее покажет, а пока – занавес.

Идеальные полупроводники для «свечения Лосева»

Вообще говоря, история «приборного проекта», как показывает опыт, обычно содержит последовательное решение четырех задач: разработка физических основ и изобретение прибора – выбор (или синтез) необходимых материалов и технологий – создание собственно прибора – применение. По счастливому стечению обстоятельств антракт между первым и вторым «действиями» не затянулся.

В 1952–53 годах немец Генрих Велькер предложил теорию создания целого класса искусственных полупроводников, обозначенных как A^3B^5 , на основе соединения элементов 3-й и 5-й групп таблицы Менделеева (рис.4) и практически синтезировал некоторые из них.

Группы		
III	IV	V
5 B бор	6 C углерод	7 N азот
13 Al алюминий	14 Si кремний	15 P фосфор
Sc 21 скандий	Ti 22 титан	V 23 ванадий
31 Ga галлий	32 Ge германий	33 As мышьяк
Y 39 иттрий	Zr 40 цирконий	Nb 41 ниобий
49 In индий	50 Sn олово	51 Sb сурыма
La 57 лантан	Hf 72 гафний	Ta 73 тантал
81 Tl таллий	82 Pb свинец	83 Bi висмут
Ac 89 актиний	Rf 104 резерфордий	Db 105 дубний

Рис. 4. Фрагмент периодической таблицы химических элементов

tronики, основных потребителей полупроводников, были синтезированы арсенид и фосфид галлия (GaAs, GaP), арсенид и арсенид индия (InSb, InAs), арсенид-фосфид галлия (GaAlP), арсенид галлия-алюминия (GaAlAs). Ождалось, что использование арсенида галлия позволит повысить рабочую температуру и быстродействие транзисторов (спустя годы это подтвердилось), однако необходимой технологии тогда разработать не смогли.

Возвратимся однако немного назад. Еще в 1950 году, т.е. за 2 года до публикаций Велькера, аспиранта Ленинградского физико-технического института Нина Горюнова синтезировала сурымянистый индий (InSb) и предсказала его полупроводниковые свойства. Но зарубежной публикации не последовало, и Запад ее открытия не заметил. Горюнова, как химика, руководствовалась принципом кристаллохимического подобия новых соединений, и это не очень воспринималось окружающими ее физиками,

ей не верили – трудно стать пророком в своем отечестве. Трудно, но сильных духом это не останавливает.

Когда в 1946 году Горюнова пришла в ленинградский Физтех, позади были химфак Университета, работа инженером в заводской лаборатории, война, голодные месяцы в блокаде, эвакуация. Теперь ей уже 30, у нее четырехлетний сын и годовалая дочь, надо растить детей и выживать самой – прозаическое трудовое будущее вроде бы вполне определилось. А она поступает в аспирантуру, да еще к самому академику А.Ф.Иоффе – патриарху отечественных физиков. Абрам Федорович определил в качестве ее темы исследование так называемого «серого» олова – одной из модификаций этого металла, образующегося на поверхности обычного «белого» олова при длительном хранении на холода (в просторечии это «оловянная чума»). Тема – так себе, ожидать в ней ярких открытий не приходилось, но академик был методичен и планомерно осваивал клеточку за клеточкой в полупроводниковом пространстве. А для аспирантки «оловянная чума» на несколько лет стала важнее всего в мире, ей она отдает всю энергию, страсть, настойчивость. Горюнова пробивается в запасники Эрмитажа (!), где ей разрешают с потемневших стариных оловянных потиротов наскрести пригоршню злосчастной серой дряни. В 1951 году – блестящая защита диссертации. Само «серое олово», как и ожидалось, интереса не представило, но развитые в работе Горюновой общие подходы к химии сложных полупроводников позволили ей выйти на соединения A^3B^5 , к которым пришел и физик Велькер. И лишь «после Велькера» и после ряда технологически блестательных достижений американцев начали заниматься исследованиями указанных соединений у нас, но приоритет Горюновой 1950 года оказался, увы, безвозвратно утраченным – сложившееся мнение научного сообщества практически невозможно изменить.

В дальнейшем профессор Н.А.Горюнова внесла огромный вклад в технологию получения новых полупроводниковых соединений и в научные обобщения по этой группе веществ, совершив, по словам Нобелевского лауреата Н.Н.Семенова, «переворот в неорганической химии». Согласитесь, в XX веке претендовать на такое могут не многие.

При всей несходности личностей О.В.Лосева и Н.А.Горюновой в их судьбах и путях к открытиям есть много общего. Оба пришли в науку в тяжелейшие для страны голодные годы, когда многие думали лишь о выживании, и пошли по избранному пути исключительно целеустремленно и с полной самоотдачей. Оба открыли новое там, где никто не искал, где, казалось бы, и найти-то было нечего, обоих отличала удивительная интуиция. Оба вращались в высококультуральной научной среде и при этом сумели сохранить независимость суждений и самостоятельность в выборе пути, вполне в духе принципиального индивидуализма. И обоим сопутствовала удача.

Итак, в 1950-е годы соединения A^3B^5 в транзисторную электронику не пошли, однако выяснилось, что

арсенид галлия и арсенид-фосфид галлия – идеальные полупроводники для реализации «свечения Лосева». Тогда же ученые всего мира устремились в новую область физики и техники – квантовую электронику – и сосредоточились на разработке лазеров. В 1960 году были созданы рубиновый и газовый лазеры, а в сентябре 1962 года – полупроводниковый лазер на основе арсенида галлия, правда излучал он в ближней инфракрасной области. В ноябре того же года один из не самых удачливых участников «лазерного проекта» американец Ник Холоньяк сообщил о создании светодиодов красного свечения на основе соединения арсенид-фосфид галлия и о начале их полупромышленного выпуска. Светодиод (рис.5) родился как бы сам собой, легко и просто, едва был

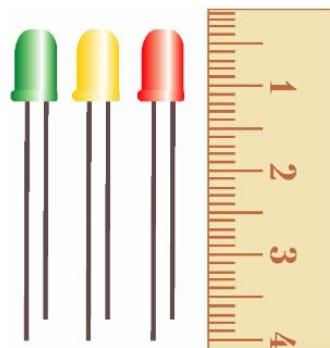


Рис. 5. Миниатюрные светодиоды

создан необходимый полупроводник. Его презентацию озаглавили «Свет надежды», вроде бы обычный журналистский штамп, а оказалось – пророчество. (И вновь мы упустили свой приоритет: на полгода раньше в одном из «почтовых ящиков» был организован выпуск довольно-таки ярких карбидокремниевых светодиодов для ядерной техники, но все засекретили, и первоходец в историю вполне оправдано вошел Холоньяк, получивший в 2003 году российскую премию «Глобальная энергия».)

Так фактически совместились второй и третий этапы «светодиодного проекта», успешно завершившегося к середине 1960-х годов. Разумеется, жизнь на этом не остановилась, расширились производство и применение светодиодов, совершенствовались их устройство и характеристики, порой – принципиально. В 1970-е годы ученые ленинградского Физтеха, возглавляемые Ж.И.Алферовым, предложили технологию гетероструктур – гетеросветодиоды оказались значительно ярче и долговечнее своих предшественников. (О гетероструктурах, за которые Ж.И.Алферов удостоен Нобелевской премии 2000 года, написано предварительно, так что не будем здесь повторяться.)

Японский вызов

Все это замечательно, но в завершенном «светодиодном проекте» был существенный изъян – он охватил лишь красную область спектра и отчасти оранжевую и

желтую, зеленого и синего света не получилось, а без этого невозможно реализовать белый свет. В световом пространстве нельзя довольствоваться частью, сделанной наполовину – это не младенец, который со временем повзрослеет, это – одинокий инвалид. Что-то вроде настенной живописи не знавших синего ацтеков – огненно-рыжий окрас, искажение пропорций, бешеная энергетика. Постоишь у стены минут десять – во рту пересыхает.

Как получить недостающие цвета спектра, наука прекрасно знала еще в 1970-е годы – надо просто использовать широкозонный полупроводник (см. таблицу на рисунке 3). Хорошо смотрелся нитрид галлия – замещая в нем частично галлий индием, можно было надеяться получить любые цвета свечения от фиолетового до зеленого. Все бы хорошо, да вот незадача – удавалось синтезировать GaN только *n*-типа, и ни при каких обработках он не превращался в полупроводник *p*-типа. А без этого нет *p-n*-перехода и нет светодиода. Родился даже тезис о принципиальной недостижимости этого – неудачникам как-то надо было оправдаться. На нитриде галлия фактически поставили крест. К счастью, не все.

В 1991 году японец Судзи Накамура опубликовал статью о создании сверхпрецзионной установки для выращивания точайших и совершенных слоев GaN (InGaN), через полгода – о получении *p-n*-переходов и их ярком голубом свечении, а с 1993 года фирма «Ниче», где работал Накамура, начала производить на продажу голубые светодиоды силой света 1 кд! (Заметим, что этой условной границы суперяркости «красные» светодиоды тогда уже достигли благодаря использованию соединения AlInGaP – это было «крутко», но вполне ожидаемо и в освоенной спектральной области.)

«Японский вызов» стал шоком для светодиодного мира: фирма «Ниче» занималась люминофорами для осветительных ламп, гигантам электроники «эти химики» вообще не были известны, а золушки становятся принцессами только в сказках и при обязательном содействии доброй феи. Фея для «Ниче» нашлась ...

Накамура пришел на фирму в 1979 году, ему было 25 лет, и он сумел убедить руководство в перспективности светодиодов. За три года он разработал отличную технологию «красного» светодиода, включая и соответствующий полупроводник, но продать разработку электронной промышленности не удалось – в традиционных направлениях уже наступило насыщение. Та же судьба постигла и два последующих проекта. Однако Накамура был упорен, к тому же за 10 лет приобрел важный опыт: решающей для светодиодов является технология исходного полупроводника. Фирма поставила на него еще раз, дала 3 млн долларов на изготовление установки, но сотрудников не выделила, так что он делал все своими руками. И стену, перед которой остановилась высокая наука, пробила технология. (Забегая вперед, отметим, что на успехе Накамуры фирма стала зарабатывать по 200 млн долларов прибыли ежегодно – такова цена удачной инновации.)

В 1989 году некий стажер одного из японских университетов, изучая воздействие электронного луча на GaN-пленки, как-то раз забыл выключить установку на ночь, а утром обнаружил необычайно яркое свечение образца – активация примеси, превращающей GaN в полупроводник *p*-типа, состоялась. (Как часто в истории науки случаются открытия, сделанные по нерадивости, забывчивости, неграмотности, лености их авторов! Это не призыв забывать выключать установки на ночь, важно другое – не проглядеть счастливую случайность.) Несколько годами раньше похожий результат получили и исследователи из Московского университета. Однако обе публикации научный мир не заметил, нитрид галлия был уже не в моде, все разом переключились на селенид цинка, а вскоре так же дружно отвернулись и от него. (Удивляет, как глубокие независимые умы вдруг словно по командебросают все и бегут на какую-нибудь яркую вспышку, которая частенько оборачивается миражом. А может они в массе не такие уж «глубокие и независимые»?)

Накамура увидел в публикациях главное – активация нитрида галлия и превращение его в полупроводник *p*-типа возможны. Этой процедуре он нашел удачное технологическое воплощение, которое и стало основой производства «синих» светодиодов в 1993 году. А вскоре он изящно использовал традиционные наработки фирмы «Ниче»: если на «синий» чип нанести подходящий люминофор, то, благодаря преобразованию части светового потока в зелено-желто-красные тона, можно, как итог, получить белый свет. Тем самым, светодиоды сделали серьезную заявку на вторжение в осветительную технику, и начиная с 2000–2001 годов светодиодная революция получила колоссальное ускорение.

Напомним, что «героем» всех этих пафосных событий является скромный, миниатюрный светодиодный чип площадью 2–4 мм^2 и толщиной в доли миллиметра. Но его внутренняя структура – это букет супер достижений физики и технологии твердого тела. Нитрид галлия удается получать только в виде тонких пленок, поэтому в качестве подложки берут пластину карбида кремния (он структурно близок к GaN) и на ней выращивают несколько десятков слоев состава GaN и его производных InGaN и AlGaN. Некоторые из них имеют вспомогательное технологическое назначение, а в активной зоне, т.е. там, где рождается свет, чередуются попеременно излучающие пленки InGaN и барьерные пленки чистого GaN (рис.6). Такие образо-

вания называют *сверхрешетками*, в них состав пленки изменяется на расстояниях, соизмеримых с размерами атомов, и ни одна из областей фактически не является однородной и независимой от соседей. Свойства сверхрешеток существенно отличаются от свойств тех же полупроводников в виде массивных образцов или в виде толстых пленок. Технология сверхрешеток открыла неисчерпаемые возможности перед создателями новых материалов, неизвестных и недоступных природе.

Излучающий слой при ближайшем рассмотрении оказывается существенно неоднородным по площади, добавки индия скапливаются в небольших образований, занимающих не более 10% пленки. Это так называемые *квантовые точки* – «последний писк» полупроводниковой модели, которой, правда, уже лет двадцать. Именно через квантовые точки протекает ток светодиода, в них же рождается излучение, все осталное в кристалле – наподобие постамента под статуей, вроде бы и не обязателен, а без него нельзя.

Современные светодиоды – ярчайшая иллюстрация могущества нанотехнологии, только благодаря ей эффективность преобразования электричества в свет приблизилась к 50% по белому свету, а по спектрально-однородным цветам она еще выше.

Вернемся к земным делам, здесь было множество занимательных событий. Несколько лет фирме «Ниче» удавалось никого не подпускать к своей технологии и получать сверхприбыль, торгуя готовыми чипами, но когда на кону миллиарды долларов, ни патенты, ни суды не спасают от промышленного шпионажа, и секреты разглашаются. Накамура перебрался в США, и начались судебные разборки фирмы с перебежчиком, а в сентябре 2006 года Накамура получил престижную премию Миллениум (1 млн евро) – мир признал его лидерство.

Эпилог

Неблагодарное дело писать историю революции во время самой этой революции. Только-только автор придумает какую-то схему изложения событий, как вдруг – бац! – появляется открытие, перечеркивающее все его построения. Если отдаешься безудержной фантазии, то можно ожидать многого. Например, создания полупроводниковых структур с таким многообразием энергетических уровней, которые позволяют получать любое свечение и внешними командами управлять и изменять его. Тогда отпадет необходимость в люминофорах, повысится светоотдача, улучшится «качество» света, возрастет долговечность и температурная стабильность светодиодов.

Быть может, завтра эту фантазию превратят в реальность кто-то из наших читателей. Так что не будем подводить итоги, тема остается открытой...

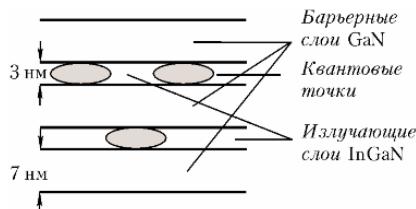


Рис. 6. Чередование слоев в активной зоне светодиода с квантовыми точками