

Лауреаты Нобелевской премии по физике 2014 года: И. Акасаки, Х. Аmano и С. Накамура

Андрей Туркин, Александр Юнович (Москва)

Нобелевская премия по физике 2014 года присуждена профессорам Исаму Акасаки и Хироси Аmano из Университета г. Нагоя (Япония), а также профессору Шуджи Накамура из Университета Калифорнии (США) за создание ярких синих светодиодов (СД) и, на их основе, СД белого свечения [1–3].

Решая фундаментальные задачи о квантовых структурах малой размерности в твёрдых телах, лауреаты Нобелевской премии по физике 2014 года дали старт революции в прикладной проблеме освещения, которая приведёт к значительной экономии электроэнергии. Присуждение премии в данном случае показывает, что нет жёсткой границы между фундаментальной и прикладной наукой, они действуют вместе как единое целое.

Исаму Акасаки (Isamu Akasaki) родился в 1929 году в г. Тиран (Япония), в 1952 году окончил Научную школу Университета Киото и начал карьеру в промышленности, а с 1959 года занялся исследовательской преподавательской работой в Университете г. Нагоя (Япония). В 1964 году получил там докторскую степень и параллельно возглавил лабораторию фундаментальных исследований компании Мацусито. В 1981 году стал профессором Университета г. Нагоя, а с 1992 года, выйдя на пенсию, – его почётным профессором и профессором Университета Мейджо (Япония).

Хироси Аmano (Hiroshi Amano), родившийся в 1960 году в г. Хама-

мацу (Япония), окончил инженерный факультет Университета г. Нагоя в 1983 году, остался там в аспирантуре и защитил диссертацию в 1989 году. С 1992 по 2010 годы работал в Университете Мейджо, став профессором в 2002 году, а затем вернулся в альма-матер на должность профессора.

Сюдзи Накамура (Shuji Nakamura), американский гражданин, уроженец японской префектуры Эхиме, родился в 1954 году. Учился в Университете г. Токусима (выпускник 1979 года), где в 1994 году защитил диссертацию по электротехнике. В 1979 году начал работать в компании «Ничия Кемикал» (Япония), выезжал на стажировку в США, а с 2000 года занял постоянную позицию профессора в Калифорнийском университете (Санта-Барбара). Имеет более 200 американских и 300 японских патентов.

И. Акасаки, Х. Аmano и С. Накамура совершили прорыв в создании ярких синих и «белых» светодиодов на основе гетероструктур с квантовыми ямами из нитрида галлия типа InGaN/AlGaIn/GaN [4, 5]. Светодиоды представляют собой полупроводниковые приборы – источники света, работа которых бази-

руется на преобразовании электрической энергии в световую [3]. Свет, отвечающий ширине запрещённой зоны, излучается при рекомбинации электронов, «накачанных» в зону проводимости, и оставшихся в валентной зоне дырок. В настоящее время излучение СД занимает широкий диапазон длин волн, от инфракрасного до ультрафиолетового. Первые СД были разработаны и созданы в 50–60-х годах XX в. в ряде лабораторий. Их длины волн излучения имели различные значения, но лежали в интервале от инфракрасного лишь до зелёного цвета. Чтобы получить с помощью таких источников синий цвет свечения понадобилось существенно больше времени – более 30 лет. Для этого нужно было разработать технологию выращивания кристаллов высокого качества на основе полупроводниковых материалов с большей шириной запрещённой зоны. Решать задачу пришлось на уровне высоких технологий: были созданы установки для роста кристаллов методом металлоорганической газовой эпитаксии, с помощью которых было обеспечено контролируемое легирование слоёв широкозонных полупроводников с *p*-типом проводимости.

Это стало возможным к концу 80-х годов прошлого века, когда удалось реализовать *p*-тип проводимости и создать большую концентрацию дырок в нитриде галлия (GaN), легированного акцептором магнием. Для получения эффективных светодиодных структур синего цвета свечения потребовалось также разработать технологии выращивания твёрдых растворов на основе InGaIn и AlGaIn с различным содержанием индия и алюминия и создания многослойных структур InGaIn/AlGaIn/GaN с активной областью малой толщины – *p-n*-гетеропереходом в структурах с квантовыми ямами.

Впервые излучение, генерируемое в твёрдом теле при протекании электрического тока, было обнаружено Генри Джозефом Раундом в 1907 году в лаборатории Гульельмо Маркони [6]. Раунд обнаружил, что свечение воз-



Исаму Акасаки



Хироси Аmano



Сюдзи Накамура

никает при приложении напряжения к точечному контакту металла с карборундом (SiC, карбидом кремния). При низких напряжениях наблюдался жёлтый свет, а с повышением напряжения добавлялись другие цвета. Советский физик Олег Владимирович Лосев также обнаружил этот эффект – в 1920–1930-х годах он подробно исследовал свечение полупроводника в контакте металл–полупроводник и отмечал: «Здесь происходит совершенно своеобразный электронный разряд, не имеющий, как показывает опыт, накалённых электродов». Свечение было «безынерционное», т.е. не имеющее заметного послесвечения. Лосев получил патент на «световое реле для быстрой телеграфной и телефонной связи, для передачи изображений на расстоянии» и назвал возможный прибор безынертным источником света. Это, по существу, было изобретением светодиода и предсказанием современной оптоэлектроники [4–7]. Стоит отметить, что данные результаты были получены задолго до создания современной электронной теории полупроводников.

Развитие физики твёрдого тела и особенно физики полупроводников в 1940-х годах позволило понять принцип работы *p-n*-переходов, что привело к изобретению транзистора в США в 1947 году (Нобелевская премия 1956 года У. Шокли, Дж. Бардина и У. Брэггана). Стало ясно, что *p-n*-переход, контакт двух областей соответственно с дырочным и электронным типом проводимости, может быть перспективным для излучения света. В 1951 году К. Леховец с коллегами в США [8] попытались объяснить электролюминесценцию в SiC как результат инжекции носителей на стыке полупроводника и металлического контакта с последующей излучательной рекомбинацией электронов и дырок. Однако наблюдаемая энергия фотона оказалась меньше ширины запрещённой зоны SiC, и авторы предположили, что излучательная рекомбинация, скорее всего, происходит на примесях или дефектах кристаллической решётки. В 1955 году инжекционная электролюминесценция была обнаружена в ряде полупроводниковых структур типа $A^{III}B^V$ [9]. В 1955–1956 годах Дж. Хейнс показал, что электролюминесценция наблюдается в германии и кремнии; она была объяснена излучательной рекомби-

нацией электронов и дырок в области *p-n*-перехода [6, 10].

За последующие несколько лет были разработаны методы, позволяющие создавать эффективные *p-n*-переходы в арсениде галлия (GaAs). Этот полупроводник – прямозонный, поэтому в нём велика вероятность рекомбинации электронов и дырок без участия фононов. (Термин «прямозонный» подразумевает, что в координатах квазиимпульс–энергия минимум зоны проводимости лежит точно над максимумом валентной зоны. Поскольку при переходе между этими состояниями квазиимпульс электрона не меняется, такие переходы могут происходить лишь с излучением фотонов, без участия фононов.) Ширина запрещённой зоны GaAs при комнатной температуре составляет 1,4 эВ, что соответствует излучению в инфракрасном диапазоне. Летом 1962 года появилось сообщение о наблюдении излучения в GaAs [11], а через несколько месяцев независимо и практически одновременно тремя исследовательскими группами было обнаружено и когерентное (лазерное) излучение в GaAs при температуре жидкого азота (77 К) [6]. Но прошло ещё несколько лет, прежде чем лазерные диоды получили широкое распространение.

Жорес Иванович Алфёров и его группа в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе в 1960-х годах прошлого века исследовали гетероструктуры соединений типа АШВ на основе арсенида галлия. Было показано, что в двойных гетероструктурах $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ эффективность излучательной рекомбинации – внутренний квантовый выход излучения – достигает 99,7%. За эти работы Ж.И. Алфёров (совместно с Г. Кремером) был удостоен Нобелевской премии 2000 года.

Появление гетероструктур позволило локализовать носители в квантовых ямах таких структур при одновременном снижении оптических потерь. Лазерные диоды стали работать в непрерывном режиме при комнатной температуре, что открыло дорогу для их использования в различных областях науки и техники.

В конце 1950-х годов начались исследования электролюминесценции фосфида галлия (GaP) [6, 9], ширина запрещённой зоны которого равняется 2,2 эВ. Определённые трудности на пути создания светодиодов на его основе возникли по причине того, что GaP – непрямозонный полупроводник и рекомбинация носителей

в нём возможна лишь с участием фононов, что снижает её вероятность и, как следствие, эффективность излучения. Скачок в создании эффективных СД на основе GaP был сделан параллельно тремя исследовательскими группами из Германии, Великобритании и США [6]. Использование различных легирующих примесей, например Zn-O или N, в разных концентрациях, позволили исследователям получить целый ряд длин волн излучения в диапазоне от красного до жёлто-зелёного цвета. К концу 1960-х годов многие производители в разных странах начали промышленно изготавливать красные и жёлто-зелёные СД на основе GaP [12].

У кристаллов твёрдых растворов $GaAs_{1-x}P_x$ длина волны излучения может быть короче, чем у аналогов из GaAs, и достигать видимого диапазона, в то время как запрещённая зона остаётся прямой для значения параметра x ниже 0,45. Н. Холоньяк младший с коллегами в конце 1950-х годов начали заниматься проблемой создания *p-n*-переходов на таких соединениях, и им удалось сделать из них СД. В 1962 году был создан лазерный диод с длиной волны излучения 710 нм, лежащей в красном диапазоне [6, 13].

Получение синего света в полупроводниковом кристалле оказалось значительно более трудной задачей. Ранние попытки построить источник синего света на базе непрямозонных материалов ZnSe и SiC успеха не имели. Материалом, который смог позволить разработать синие СД, стал нитрид галлия.

GaN – прямозонный полупроводник типа $A_{III}B_V$ со структурой кристаллической решётки типа вюрцита. Его выращивают на подложках из сапфира (Al_2O_3) или SiC, несмотря на различие постоянных кристаллической решётки. Для легирования GaN используют, например, кремний (для создания проводимости *n*-типа проводимости) и магний (для *p*-типа проводимости). Нелегированный GaN имеет *n*-тип проводимости, ширина его запрещённой зоны равна 3,4 эВ при комнатной температуре, что соответствует длине волны излучения в ультрафиолетовой области. К сожалению, легирование вносит изменения в технологический процесс роста GaN, по причине чего материал становится хрупким.

О создании эффективных источников излучения на основе GaN серьёзно думали несколько исследовательских групп уже в конце 1950-х годов.

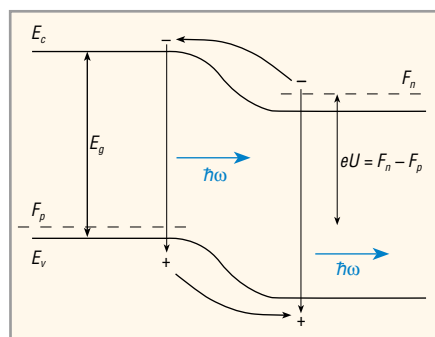


Рис. 1. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного (p - n) перехода при приложении потенциала eU в прямом направлении. Стрелками показана инжекция электронов и дырок при прямом токе через переход и их последующая рекомбинация с излучением квантов света $\hbar\omega$. Здесь E_v – потолок валентной зоны, E_c – дно зоны проводимости, F_p и F_n – квазиуровни Ферми для дырок и электронов, соответственно. E_0 – ширина запрещенной зоны

Г. Гриммайс и Н. Кельманс получили эффективную фотолюминесценцию GaN в широком спектральном диапазоне, используя различные активаторы [6]. Но в то время вырастить кристаллы GaN было очень трудно, исследовались только небольшие порошковые образцы, а создать p - n -переход в таком материале технологически было невозможно.

Первые кристаллы GaN были выращены в конце 1960-х годов методом хлоридно-гидридной эпитаксии (HVPE) [6, 14]. Изучением технологии роста и легирования GaN с целью разработки синих светодиодов занимались ряд лабораторий в Соединённых Штатах, Японии и Европе [6, 15]. Возникшие проблемы казались непреодолимыми: шероховатость поверхности не контролировалась, большая концентрация примесей переходных металлов загрязняла выращенный материал. Легирование p -области акцепторными примесями сопровождалось компенсацией отрицательных ионов акцепторов положительными ионами водорода H^+ . Роль водорода в то время ещё не была изучена.

Ж.И. Панков, ведущий учёный в данной области, писал, что, несмотря на значительный прогресс в изучении GaN, произошедший в те годы, многое ещё только предстоит сделать [6]. Основными целями в технологии выращивания GaN, по его мнению, должны были быть синтез свободных монокристаллов, а также обеспечение эффективного легирования мелкими

акцепторами для достижения высоких концентраций дырок в материале p -типа.

В 1970-х годах были разработаны новые методы выращивания кристаллов, а именно молекулярно-лучевая эпитаксия (MBE) [6] и металлоорганическая газофазная эпитаксия (MOVPE) [6]. Были предприняты усилия по выращиванию GaN этими методами [6]. Исаму Акасаки начал изучать GaN в 1974 году, в то время он работал в Исследовательском центре компании «Мацусита» в Токио. В 1981 году он занял должность профессора в университете г. Нагоя и продолжил исследования GaN вместе с Хироси Аmano и другими сотрудниками. Первые кристаллы GaN высокого качества и с хорошими оптическими характеристиками были получены ими методом MOVPE в 1986 году [6, 15]. Прорыв стал результатом целой серии экспериментов и наблюдений. Тонкий (30 нм) слой из поликристаллического AlN осадил на подложке из сапфира при низкой температуре (500°C), а затем нагрели до температуры роста GaN (1000°C). В процессе нагрева слой приобретал текстуру мелких кристаллитов с определённой ориентацией, на которых можно было выращивать GaN. Плотность дислокаций растущего кристалла GaN вначале была высокой, но быстро уменьшалась после образования слоя толщиной в несколько микрометров. Исследователям удалось получить слои с поверхностью высокого качества, что было важно для последующего выращивания тонких многослойных структур. Кроме того, оказалось возможным растить слои n -GaN с существенно более низкой концентрацией электронов. Сюдзи Накамура, будучи сотрудником японской химической компании «Ничия Кемикал», позже разработал аналогичный метод, где AlN был заменён тонким слоем GaN, выращенным при низкой температуре [15].

Одной из основных проблем для изготовления p - n -переходов была трудность с легированием p -GaN – нужно было создать контролируемый технологический процесс, обеспечивающий большую концентрацию дырок.

На физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в 1981–1982 годах группа Г.В. Сапарина и М.В. Чукичева показала, что в GaN возможна активация акцепторов Zn электронным пуч-

ком в растворе электронного микроскопе. Исследователи использовали это для оптической записи информации с шириной линии менее 1 мкм [15–17].

В конце 1980-х годов Акасаки, Аmano и их коллеги сделали важный дальнейший шаг в этом направлении. Они продемонстрировали, что с помощью сканирующего электронного микроскопа можно создать слой GaN с активированными акцепторами Zn [6, 15]. Подобным же образом облучение электронами приводило к улучшению излучающих свойств GaN, легированного акцепторами Mg [6, 15]. Это открытие стало важным прорывом на пути к созданию p - n -переходов в GaN.

Объяснение эффекта электронного облучения было дано как в работах МГУ [16, 17], так и в статье Накамуры и его коллег [18]. Ионы акцепторов Mg или Zn⁻, образуют комплексы с ионами водорода H⁺, материал становится компенсированным. Иначе говоря, при легировании акцепторами дырки не образуются. Подобный эффект нейтрализации примесей водородом был известен из работ группы Панкова по другим материалам [6, 15]. Действие электронного пучка, нагревающего GaN:Mg до температур выше 400°C, разделяет комплексы Mg-H и активирует акцепторы. Накамура показал, что термическая обработка – отжиг в атмосфере азота N₂ – тоже приводит к активации акцепторов Mg.

Важнейшим шагом в разработке эффективных синих светодиодов было создание технологии выращивания и легирование p -типа твёрдых растворов на основе нитридов, AlGa_{1-x}N и InGa_{1-x}N, которые необходимы для получения гетероструктур. Такие гетероструктуры были созданы в начале 1990-х годов исследовательскими группами Акасаки и Накамуры [6, 15].

На рисунке 1 показана энергетическая диаграмма двойной гетероструктуры с p - n -переходом p -Ga_{1-x}N/In_xGa_{1-x}N/ n -Ga_{1-x}N при прямом токе. Дырки из p -области инжектируются в область In_xGa_{1-x}N с меньшей шириной запрещенной зоны и встречают потенциальный барьер, ограничивающий их инжекцию в n -область. В свою очередь, электроны из n -области инжектируются в область In_xGa_{1-x}N и встречают потенциальный барьер, ограничивающий их инжекцию в p -область (см. рис. 2).

Толщина потенциальной ямы d может быть сделана очень малой, срав-

нимой с длиной волны де Бройля для электронов. Энергетический спектр электронов и дырок в такой системе зависит от толщины d в соответствии с законами квантовой механики – здесь говорят о квантовой яме. Инжекция в квантовую яму приводит к большой концентрации электронно-дырочных пар, и в ней увеличивается вероятность излучательной рекомбинации. Акасаки и его коллеги разработали структуры на основе AlGaIn/GaN [1, 4, 6, 15]. Накамура с большим успехом использовал для создания гетеропереходов комбинации InGaIn/AlGaIn/GaN и InGaIn/GaN, делая на их основе одиночные и множественные квантовые ямы [2, 6, 15, 19]. В 1994 году Накамура и его коллеги добились значения квантового выхода излучения такой структуры с квантовыми ямами 2,7%, используя двойной гетеропереход InGaIn/AlGaIn/GaN (см. рис. 3) [18]. Эти важные первые шаги открыли путь к разработке эффективных синих светодиодов. Обе исследовательские группы из Японии продолжали развивать технологию производства синих светодиодов в сторону повышения эффективности и универсальности, а также расширения возможных приложений. Синее лазерное излучение на основе GaN-гетероструктур наблюдалось обеими группами в 1995–1996 годах [1, 2, 6]. Группа в МГУ показала, что в синих светодиодах Накамуры внешний квантовый выход излучения достигает 9% [20].

Современные эффективные СД на основе гетероструктур GaN и его твёрдых растворов стали результатом целой серии прорывов в физике полупроводниковых кристаллов и в физике излучающих устройств на основе полупроводниковых гетероструктур. Исследования оптических явлений в светодиодах позволили существенно повысить коэффициент вывода оптического излучения из прибора. История развития синих, зелёных, красных и «белых» СД показана на рисунке 4.

Успешная разработка эффективных СД привела к возможности создания белых источников света. Одним из способов получения белого света может быть использование свечения одновременно нескольких СД разного цвета, а именно красного, зелёного и синего (см. рис. 5а). Если в комбинации с синим светодиодным кристаллом использовать люминофоры, которые при возбуждении синим светом имеют либо жёлто-зелёную полосу свече-

ния, либо жёлто-зелёную с красным, то также возможно получить белый свет (см. рис. 5б и в). Подбирая различные люминофоры, относительную интенсивность синей и жёлто-зелёной полосы, добавляя дополнительный красный люминофор, можно менять цветовую температуру белого цвета. Таким образом, оттенок белого цвета можно изменять от «холодного» до «тёплого» диапазона. Один из вариантов получения белого цвета – возбуждение трёх люминофоров (красного, зелёного и синего) с помощью светодиодного кристалла УФ-диапазона (см. рис. 5г).

Стоит отметить, что в источниках света на основе СД в основном используются первые три упомянутых выше метода. Эти источники света, имеющие достаточно большой срок службы (более 50 тыс. часов), используются сейчас в качестве замены ламп накаливания и разрядных ламп в светотехнических изделиях.

Сегодня белые СД на базе GaN служат основными источниками света в дисплеях на основе жидких кристаллов – в компьютерных мониторах и экранах телевизоров, а также в большинстве мобильных устройств (телефонах, планшетах, ноутбуках и т.д.). Синие и ультрафиолетовые диодные лазеры из GaN также используются для записи в компакт-дисках DVD; они необходимы для хранения информации, включая музыку, фотографии и фильмы. Будущие применения могут включать в себя использование ультрафиолетовых СД на основе AlGaIn/GaN в системах очистки воды и воздуха, так как УФ-излучение обладает бактерицидным, противогрибковым и противовирусным действием.

В последнее время начался новый этап в развитии светодиодного освещения. В конце 2011 года светотехнические устройства со светодиодами из GaN превысили по световой отдаче традиционные источники освещения – лампы накаливания и разрядные лампы. Это означает революцию в светотехнике.

Коэффициент полезного действия лампочки накаливания, изобретённой в 1879 году Томасом Эдисоном, всего около 4%. Это соответствует значению световой отдачи ~16 лм/Вт. Световая отдача люминесцентной лампы, предложенной в 1900 году П. Купером Хьюиттом, достигает 70 лм/Вт. А у промышленно выпускаемых белых светодиодов этот параметр составляет более

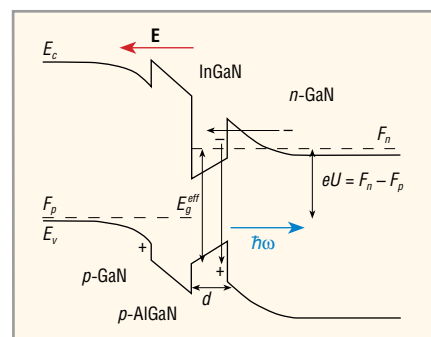


Рис. 2. Инжекция электронов и дырок в квантовую яму ширины d и излучательная рекомбинация в двойной гетероструктуре на основе нитрида галлия. E – напряжённость электрического поля

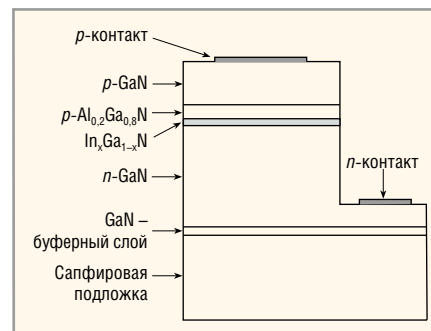


Рис. 3. Схема светодиодной гетероструктуры типа InGaIn/AlGaIn/GaN

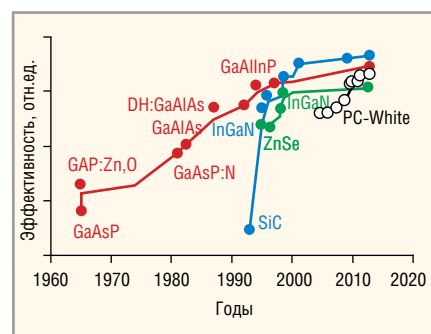


Рис. 4. История развития синих, зелёных, красных и «белых» СД

100 лм/Вт, у лучших промышленных образцов – порядка 140 лм/Вт. Рекордные значения световой отдачи белых светодиодов, достигнутые в лабораториях в 2014 году, превышают 300 лм/Вт, что соответствует КПД 50%.

Используемые для освещения белые светодиоды большей частью основаны на комбинации мощных синих кристаллов и различных люминофоров, преобразующих синий свет в белый. Помимо высокой эффективности СД имеют длительный срок службы. Стоимость светодиодов за последнее десятилетие упала в 20 раз, и они продолжают дешеветь; ожидается, что их цена в конце 2015 года станет меньше, чем у соответствующих эффективных люминесцентных ламп. Рынок свето-

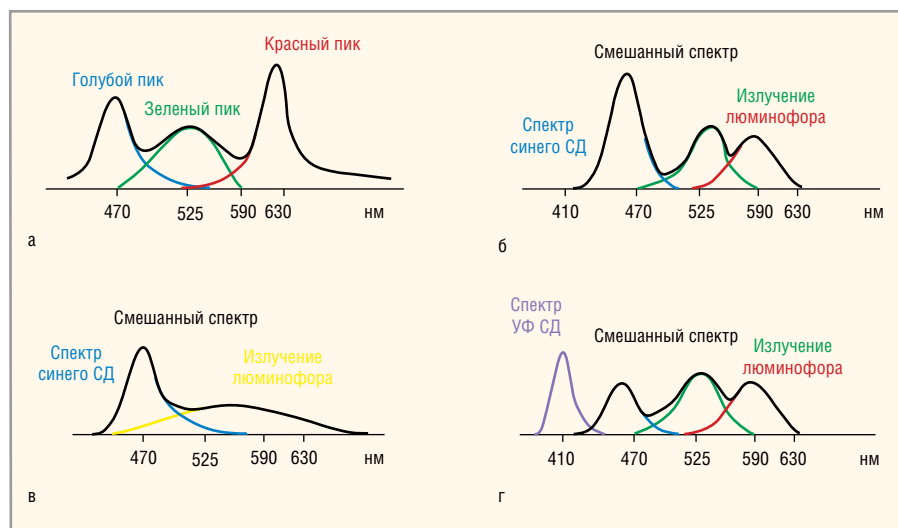


Рис. 5. Методы получения белого цвета с помощью светодиодов:

- а) комбинация нескольких СД разного цвета: красного, зелёного и синего;
 б) комбинация синего светодиодного кристалла с жёлто-зелёным люминофором;
 в) комбинация синего светодиодного кристалла с жёлто-зелёным и красным люминофором;
 г) комбинация УФ-кристалла с тремя люминофорами: синего, зелёного и красного цвета

диодных источников освещения переживает бум.

Заглядывая в будущее, можно предсказать, что трёхцветные и многоцветные сборки светодиодов также найдут свою нишу для применения в освещении. Это позволит создать динамическое управление цветовой композицией, что существенно расширит области применения светодиодных светотехнических устройств.

Замена обычных ламп, особенно ламп накаливания, на светодиодные приведёт к резкому снижению потребления электроэнергии (в промышленно развитых странах на освещение идёт около 20–30% всего энергопотребления).

Прежние технологии освещения будут заменены на новые, светодиодные. В странах с недостаточно развитыми электросетями или их вообще не имеющих можно использовать осветительные приборы на основе белых СД. Аккумуляторные источники питания для них будут заряжаться днём от солнечных батарей. В этом случае произойдёт переход от керосиновых ламп сразу к белым светодиодным лампам.

Подводя итог всему сказанному, ещё раз отметим, что работа нобелевских лауреатов 2014 года использовала решение фундаментальных задач о квантовых структурах малой размерности в твёрдых телах, в частности в полупроводниковых гетероструктурах, для решения прикладной проблемы экономии электроэнергии в освещении.

Исследования и разработки во всём мире, международная научная кооперация, поддержка правительствами ряда стран создали новую светодиодную промышленность. Светодиоды белого свечения уже стали основой светотехники настоящего и ближайшего будущего. Миллионы людей уже сейчас используют светодиодное освещение.

Поскольку энергия, потребляемая новыми источниками белого света, в 10 раз меньше, чем требующаяся для ламп накаливания, использование эффективных синих СД кристаллов приводит к существенной экономии электроэнергии. Это, несомненно, должно принести огромную пользу человечеству, не только заметно снизить энергопотребление, но и улучшить экологическую ситуацию.

Первая публикация данного материала состоялась в журнале «Природа», 2015, № 1, С. 75–81.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akasaki I. and Amano H. Breakthroughs in Improving Crystal Quality of GaN and Invention of the *p-n* Junction Blue-LED. Jpn. J. Appl. Phys. 2006. 45. Pp. 9001–9010.
2. Nakamura S. and Krames M.R. History of Gallium–Nitride-Based Light-Emitting Diodes for Illumination. Proceeding of The IEEE. 2013. Pp. 1–10.
3. Юнович А.Э. Светодиоды на основе гетероструктур из GaN и его твёрдых растворов. Светотехника. 1996. №5/6. С. 2–7.
4. Юнович А.Э. Лауреат Премии Кюто 2009 года Исаму Акасаки и немного истории светодиодов. Светотехника. 2010. № 2. С. 65–66.

5. Рабинович О.И., Юнович А.Э. Об открытии полупроводниковых источников света (к истории создания светодиодов). Светотехника. 2014. № 3. С. 40–45.
6. Шуберт Ф.Е. Светодиоды. Перевод с английского под редакцией проф. А.Э. Юновича. М. ФизМатЛит. 2008.
7. Lossev O.V. Luminous Carborundum Detector and Detection Effect and Oscillations with Crystals. Philosophical Magazine. 1928. V. 6. Pp. 1024–1028.
8. Lebovec K., Accardo C.A. & Jamgochian E. Injected Light Emission of Silicon Carbide Crystals. Phys. Rev. 1951. V. 83. Pp. 603–607.
9. Wolff G.A., Hebert R.A. & Broder J.D. Electroluminescence of GaP. Phys. Rev. 1955. V.100. Pp. 1144–1148.
10. Braunstein R. Radiative Transitions in Semiconductors. Phys. Rev. 1955. V. 99. Pp. 1892–1893.
11. Pankove J.I. Tunneling-Assisted Photon Emission in Gallium Arsenide *p-n* Junctions. Phys. Rev. Lett. 1962. V. 9. Pp. 283–285.
12. Юнович А.Э. Излучательная рекомбинация и оптические свойства фосфида галлия. В сб. Излучательная рекомбинация в полупроводниках. М. Наука. 1972. С. 224–304.
13. Holonyak N. and Bevacqua S.F. Coherent (Visible) Light Emission from Ga(As_{1-x}P_x) Junctions. Appl. Phys. Lett. 1962. V. 1. Pp. 82–83.
14. Maruska H.P. & Tietjen J.J. The Preparation and Properties of Vapour-Deposited Single-Crystalline GaN. Appl. Phys. Lett. 1969. V. 15. Pp. 327–329.
15. Туркин А. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике. Компоненты и Технологии. 2011. № 5. С. 6–10.
16. Четверикова И.Ф., Чукичев М.В., Храмов А.П. Оптические свойства нитрида галлия. Обзоры по электронной технике. 1982. Сер. 6. Вып. 1. Вып. 8.
17. Сапарин Г.В., Обьеден С.К., Четверикова И.Ф., Чукичев М.В. Бюллетень МГУ. Сер. 3. Физика и Астрономия. 1983. Т. 24. № 3.
18. Nakamura S., Iwasa N., Senoh M. and Mukai T. Hole Compensation Mechanism of P-Type GaN Films. Jpn. J. Appl. Phys. 1992. V. 31. Pp. 1258–1266.
19. Kudryashov V.E., Turkin A.N., Yunovich A.E., Zolina K.G., Nakamura S. Spectra of Super-bright Blue and Green InGaN/AlGaIn/GaN Light-Emitting Diodes. Journal of the European Ceramic Society. 1997. V. 17. Iss. 15–16. Pp. 2033–2037.
20. Туркин А.Н., Юнович А.Э. Измерения мощности излучения голубых и зелёных InGaN/AlGaIn/GaN светодиодов с помощью фотопреобразователей из аморфного кремния. Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 23. С. 82–86.