

Современное состояние и тенденции развития светодиодов и светодиодного освещения

А.Э. ЮНОВИЧ¹

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Четыре года тому назад журнал опубликовал статью автора с обзором свойств высокоэффективных светодиодов (СД) нового поколения и перспектив широкого применения их как основы освещения будущего [1]. Физика и технология полупроводниковых источников света и их промышленное применение развивались во всем мире за эти годы бурными темпами, превзошедшими оптимистические предсказания статьи о будущей замене ламп накаливания (ЛН) светодиодами.

Преимущества СД, ранее сформулированные лишь специалистами, стали известными и понятными многим инженерам, организаторам производства, финансистам, чиновникам. О них стали сообщать СМИ. СД потребляют лишь 17% электрической энергии относительно ЛН и 50% относительно компактных люминесцентных ламп (КЛЛ). СД в 20 раз долговечнее ЛН и в 5 раз долговечнее КЛЛ, что существенно снижает расходы на эксплуатацию (например, СД лампу можно будет не менять 20 лет). Они не содержат ртути (как КЛЛ), и потому не представляют экологической опасности. У них малый вес и большая устойчивость к деформациям и вибрациям (удобство для потребителя и ванда-лоустойчивость).

Рассмотрим, как было организовано в последние годы развитие СД тематики в США и КНР, и обсудим проблемы создания государственной программы исследований, разработок и производства СД в России.

Государственная программа США была принята Конгрессом США в 2005 г. как часть Акта об энергетической политике и названа «Светодиодное освещение» («Solid-State Lighting, SSL»). Правительство

США, в соответствии с этим Актом, поддерживает исследования, разработки, публикации и коммерческие применения, связанные с технологией СД освещения, которые касаются СД белого света (белые СД).

В феврале и июле 2007 г. состоялись семинары, организованные Министерством энергетики США, посвященные всем сторонам этой программы (2, 3). Организован альянс промышленных компаний по разработкам и внедрению СД освещения (Next Generation Lighting Industry Alliance, NGLIA), работу которого координирует правительство. Министерство энергетики — основная финансирующая организация, но и каждая из компаний альянса делает взнос в развитие программы. Ожидается, что вплоть до конца 2008 г., кроме вложения рискованного капитала, будут необходимы государственные инвестиции для поддержки программы, а затем вложения начнут окупаться и, начиная приблизительно с конца 2010 г., давать результирующую прибыль, быстро возрастающую к 2012 г. При этом предпола-

гается, что каждый год будет создаваться более совершенная продукция. Наиболее выгодно вкладывать средства в развитие крупных компаний, уже участвующих в разработках и производстве СД (рис. 1).

Важно, что для широкого применения СД в общем освещении в будущем следует заменить конструкции традиционных светотехнических устройств и их питание от электрической сети так, чтобы использовать особенности СД. Пока разработчики идут по более простому пути (рис. 2), приспособлявая, например, крепление СД модуля к обычному цоколю ЛН.

Внешний квантовый выход излучения синих СД в настоящее время достиг рекорда: 63% (лабораторные образцы) [7]. Световая отдача белых СД уже достигает 150 лм/Вт [8]. Вслед за фирмой Nichia Corp. о рекордных результатах в 2007 г. сообщили фирмы Cree Lighting (131 лм/Вт), и Philips Lumileds (115 лм/Вт). В сентябре 2007 г. фирма Cree Lighting сообщила о разработанных ею лампах с одним СД большой площади, которые имеют световой поток более 1000 лм для холодно-белого света при световой отдаче 72 лм/Вт и 760 лм для тепло-белого света при световой отдаче 52 лм/Вт. Фирма при этом напомнила, что обычно от разработки новых приборов до их коммерческого выпуска проходит от 12 до 24 месяцев [9]. Сообщения не раскрывают технологических тонкостей, позволивших получить эти рекорды.

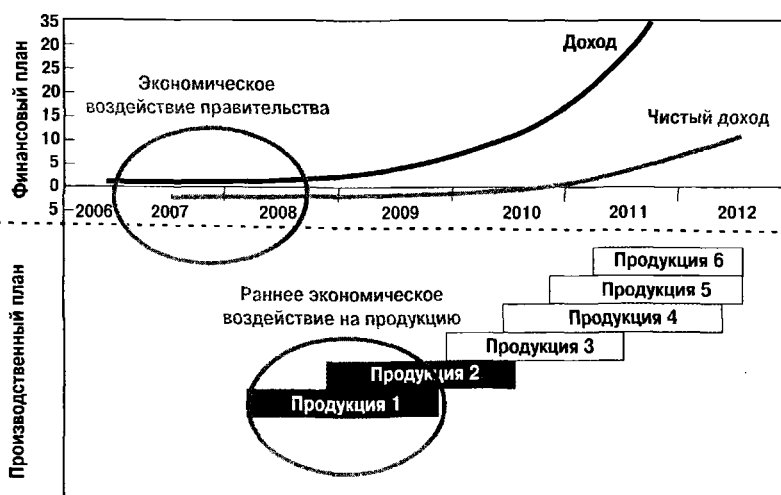


Рис. 1. Финансовые вложения в первый период развития светодиодного освещения поддерживаются правительством и частным (рисковым) капиталом. Эти вложения начинают окупаться через два-три года, а затем дают быстро возрастающую прибыль [2, 3]

¹ По материалам доклада на LED-Forum 28-29 ноября 2007 г., Москва. E-mail: yunovich@phys.msu.ru

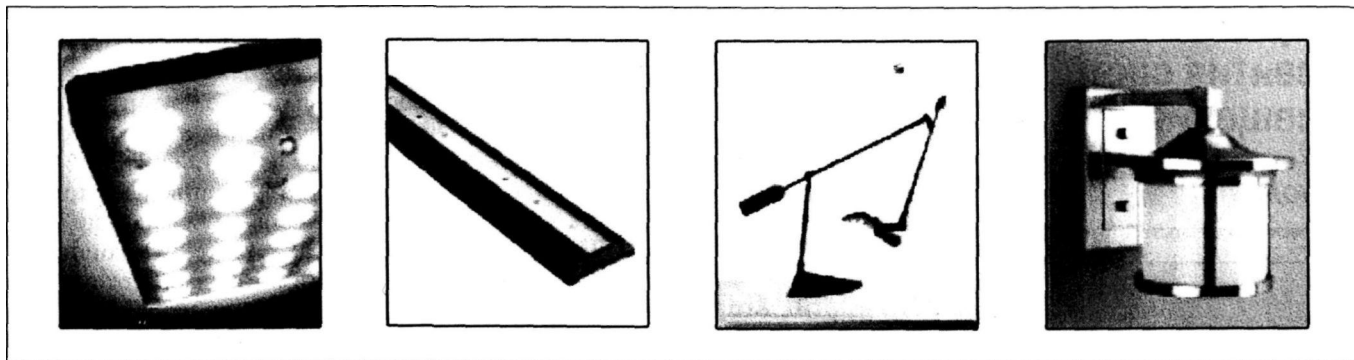


Рис. 2. Светильники со светодиодами, получившие премии Министерства энергетики США [6]

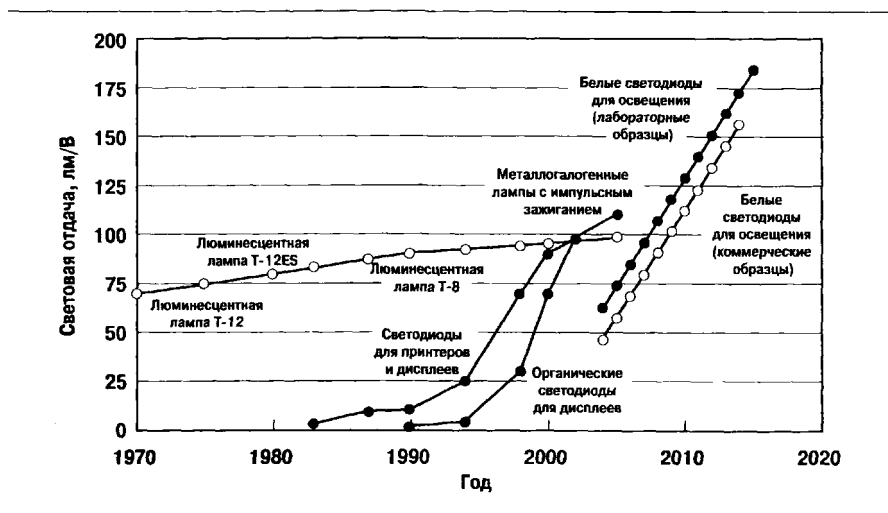


Рис. 3. Сравнение световой отдачи традиционных источников света (люминесцентных и металлогалогенных ламп) с белыми светодиодами в последние годы и в планируемом будущем

Заметим, что программа США в 2002 г. предполагала массовое экономически выгодное производство белых СД для освещения со световой отдачей 150 лм/Вт к 2020 г. Эта программа в настоящее время скорректирована, и к 2015 г. планируется световая отдача 160 лм/Вт. Промышленные коммерчески доступные белые СД разных фирм в 2007 г. имеют световую отдачу 40-80 лм/Вт; одиночные СД при токе 350 мА дают световой поток до 100 лм (рис. 3 и 4).

Быстрый рост эффективности белых СД был достигнут благодаря исследованиям и разработкам по всем направлениям, связанным с технологией СД. Улучшилась технология изготовления сапфировых и карбид-кремниевых подложек для эпитаксиального роста; было усовершенствовано выращивание *p-n-гетероструктур* типа InGaN/AlGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами **были** сконструированы СД с луч-

шим коэффициентом оптического вывода. Созданы омические контакты с малым сопротивлением, обеспечен эффективный отвод тепла от кристалла к корпусу. Разработаны новые люминофоры для повышения общего индекса цветопередачи белых СД.

Но необходимы не только исследования «методом проб и ошибок», как в большинстве случаев шло развитие технологии СД, но и количественные теоретические предсказания оптимальных свойств материалов, структур и конструкций для СД на основе последних достижений физики, химии и других наук. Технология СД — это существенная часть нанотехнологий. Для выращивания совершенных структур должна быть уменьшена плотность дислокаций, расстояние между которыми составляет порядка сотен нм. Идет разработка структур с множественными квантовыми ямами толщиной 2-3 нм, необ-

ходимых для получения близкого к 100% внутреннего квантового выхода излучения. Создаются фотонные кристаллы с периодами порядка десятков и сотен нм для лучшего вывода излучения из СД. Разрабатываются люминофоры с размерами кристаллитов порядка 3 нм для лучшего преобразования синего излучения кристаллов в белых СД. **Все это — нанотехнологии.**

Развитие светодиодных исследований и разработок идет во всем мире. Ведущие фирмы-производители (Cree Lighting, Philips Lumileds, Nichia Corp., Osram Optosemiconductors, Toyoda Gosei, Seoul Semiconductor) провели реорганизации, вложили и получили крупные инвестиции, существенно расширились, поглотив небольшие фирмы, и стали, по существу, транснациональными. Кроме США, Японии и Германии, массовое конкурентоспособное производство СД создано в Республике Корея, КНР и на Тайване. Между основными фирмами заключены соглашения, переданы лицензии (рис. 5), ведутся споры и судебные тяжбы об интеллектуальной собственности. СД выпускаются сотнями миллионов штук в год. Общий объем СД рынка в мире в 2005 г. составил 4 млрд. долларов, и предполагается, что в 2010 г. он превысит 8 млрд. долларов.

Важен пример развития светодиодной тематики в КНР. В 2004 г. в КНР была сформулирована государственная программа развития СД освещения [12]. Министерство науки и технологии объединило 15 НИИ и 50 промпредприятий из разных районов страны и выделило на начало программы 17 млн. долларов. Если в 2001 г. в КНР использовались только

импортные синие СД, то в 2005 г. собственное производство гетероэпитаксиальных структур и кристаллов обеспечивало уже 40% от общего числа применяемых синих СД— основы для белых СД [13]. Объем продаж СД производства КНР в 2004 г. составил 12 млрд. юаней (1,45 млрд. долларов) (рис. 6).

По оценке руководителя китайской программы д-ра Линг Ву сейчас, в ходе выполнения 11-го пятилетнего плана, уже более 600 предприятий с 40 тыс. работников прямо связаны с производством СД. Четыре особых промышленных района созданы с центрами в городах Даляне, Шанхае, Нанчанге и Ксямене. Пятый промышленный район создается в Шеньжене, близ Гонконга.

В КНР проведено несколько конференций, симпозиумов и промышленных выставок, посвященных СД освещению. Третья промышленная выставка и форум по СД освещению состоялись в Шанхае в августе 2007 г. Несколько десятков китайских и зарубежных фирм представили стенды и доклады по всем разделам физики, технологии и производства СД [14]. К инвестициям в СД отрасль привлечены американские и европейские фирмы, которых привлекают налоговые льготы и дешевая рабочая сила. В освещении на Олимпийских играх 2008 г. в Пекине будут широко использованы СД; договоры подписаны и с организациями КНР (включая Гонконг), и с фирмами Тайваня.

В этой статье не рассмотрены программы развития СД освещения в Европейском Союзе, Республике Корея и на Тайване. С материалами 4-й Европейской промышленной выставки и Симпозиума по светодиодному освещению в Бирмингеме в июне 2007 г. можно ознакомиться в интернете [15].

Журнал «Светотехника» в последние годы неоднократно публиковал статьи в которых предлагалось создание широкомасштабной программы исследований и разработок СД и промышленного развития СД освещения в России И, 16, 17]. Такая программа пока не создана.

Однако исследования и разработки структур и СД на основе нитридов галлия, индия и алюминия в России в последние годы заметно расширились.

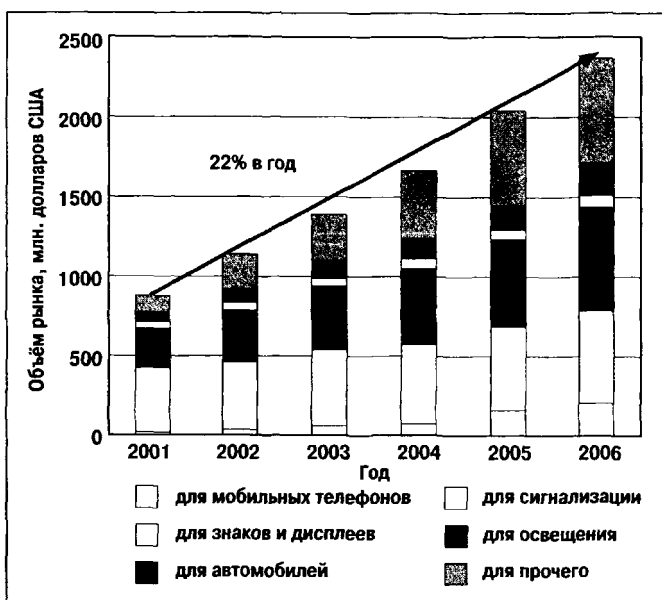


Рис. 4. Рост объема продаж светодиодов в США за последние годы составляет 22% в год, в 2006 г. (без учета светодиодов для мобильных телефонов) — около 2,5 млрд. долларов. Зеленым цветом выделена часть продаж, связанная с применением светодиодов в освещении [10]

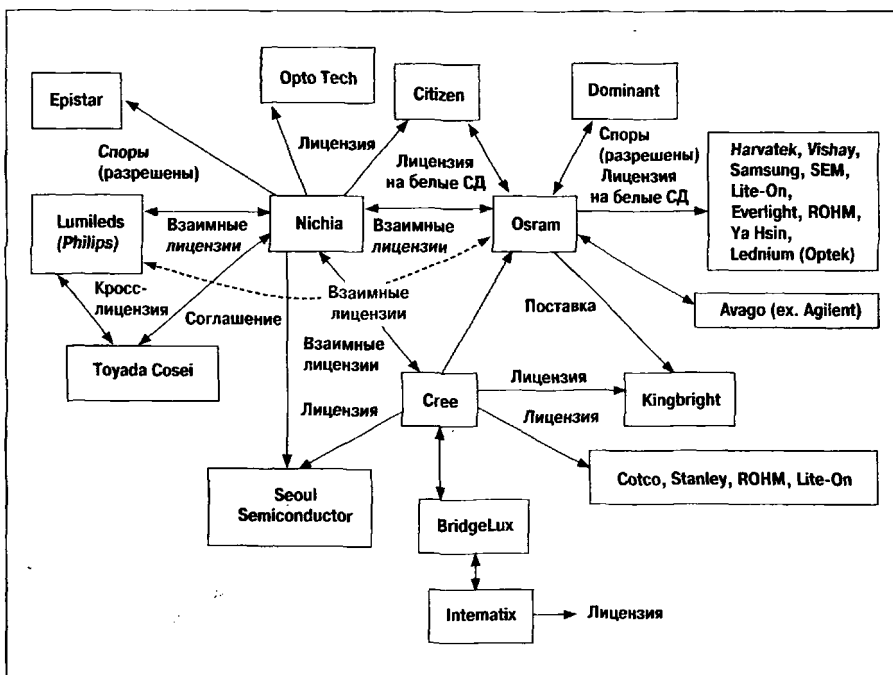


Рис. 5. Основные международные светодиодные фирмы-производители и их взаимные связи [15]

Были получены важные научные результаты; академические и университетские лаборатории стали получать поддержку от бюджетных и научных фондов, от отечественной промышленности, от зарубежных фондов и инвесторов [18].

Лидером научных исследований, связанных с СД тематикой в России, является Физико-технический институт РАН им. А.Ф. Иоффе. Важнейший вклад в эти работы сделан лабораторией лауреата Нобелевской премии академика

Ж.И. Алферова. Проводятся исследования роста структур на основе нитридных полупроводниковых соединений. Используются разные методы: газовая эпитаксия из металлорганических соединений, молекулярно-лучевая эпитаксия, хлоргидридная эпитаксия. Изучается влияние дефектов структуры и различных примесей на излучательную рекомбинацию в полупроводниковых гетероструктурах с квантовыми ямами. Предложены и успешно применяются оригинальные

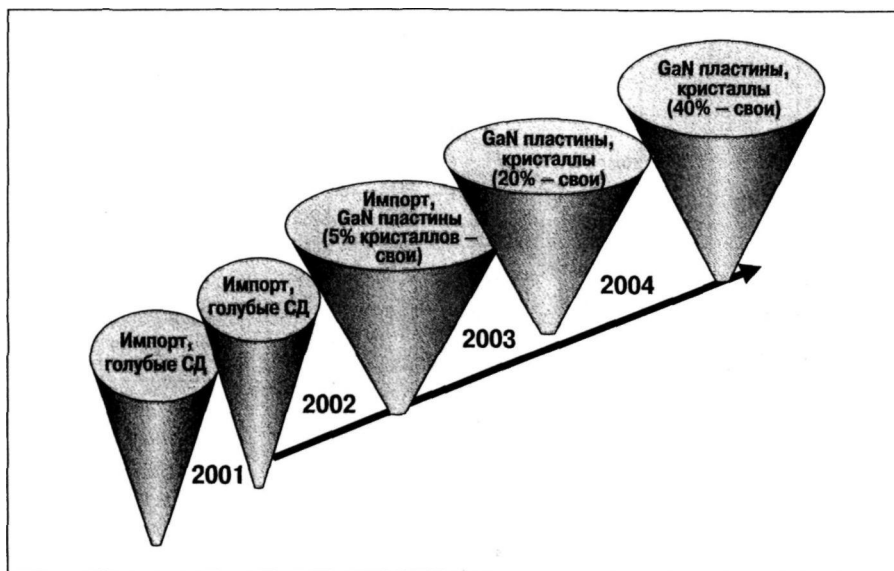


Рис. 6. Развитие производства светодиодов в КНР в 10 пятилетке [14]

методики изучения электрических и оптических свойств гетероструктур. Научные исследования тесно связаны с разработками СД. Физико-технический институт вместе с Санкт-Петербургскими Политехническим университетом и Электротехническим университетом готовят кадры как для промышленных предприятий Санкт-Петербурга, так и для других научных и промышленных центров России.

Исследования излучательной и безызлучательной рекомбинации в СД р-n-гетероструктурах с квантовыми ямами на основе GaN, проведенные на физическом факультете МОСКОВСКОГО государственного университета им. М.В. Ломоносова, позволили дать рекомендации по разработкам эффективных СД [19-22].

ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника» (Санкт-Петербург) разрабатывает полный технологический цикл создания белых СД, от подготовки подложек для эпитаксии, эпитаксиального роста структур и создания оригинальных конструкций кристаллов до осветительных устройств. Последние проходят эксплуатационные испытания в освещении домов в северных регионах России и железнодорожных вагонов. КПД синих СД, разработанных на «Светлане», достиг 31%, а световая отдача белых СД — 40 лм/Вт [23, 24].

Работы по эпитаксиальному выращиванию СД структур на основе GaN начаты в ЗАО «Элма — Малахит» (Зеленоград) [25]).

ООО «НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ» выпускает (на основе импортных структур) и белые СД для общего освещения, и СД всех диапазонов видимого и ближнего ИК-излучений. Коммерческие белые СД и модули на их основе, разрабатываемые в «ОПТЭЛ», достигли световой отдачи 40–50 лм/Вт, а световой поток единичных СД - 100 лм [22, 26]. ЗАО «Кавер Лайт» и КБ «Пола +» — разрабатывают эффективные СД специальных конструкций с узкими световыми пучками для железнодорожных светофоров и разных цветов для автомобильной промышленности. СД производятся и НИИ полупроводниковых приборов в Томске, и ОАО «Протон» в Орле. Они выпускаются миллионами штук в год и широко применяются в разных видах освещения.

На 5-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» было представлено более 80 докладов от 50 организаций; половина из них была посвящена проблемам эпитаксиального выращивания гетероструктур, а 30 докладов - световодам и лазерам [18]. В рамках конференции была проведена научно-промышленная выставка, на которой были представлены образцы технологического оборудования и материалов для эпитаксиального роста и различные устройства на основе нитридных полупроводниковых приборов. В выставке приняли участие как зарубежные, так и отечест-

венные компании: AIXTRON, VEECO, LayTech Gesellschaft, ЗАО «Научное и технологическое оборудование», ЗАО «Интек Вакуум», ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника», ООО «НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ», ЗАО «Монокристалл». Конференция показала, что исследования и разработки по СД тематике в России развиваются в русле мирового научного процесса и в рамках международного сотрудничества. Следует заметить, что многие работы по физике и технологии СД за рубежом развиваются нашими учеными и инженерами.

Светотехнические исследовательские и промышленные организации в России прониклись идеей СД освещения. Ежегодные семинары и выставки в Доме Света (Москва), посвященные этой проблеме, собирают сотни участников [27].

Таким образом, в России есть все необходимое для создания широкомасштабной программы развития СД освещения. Но без направляющей организационной деятельности и систематического целевого финансирования со стороны государства этого недостаточно. Без взаимодействия и координации деятельности всех Российских организаций любая такая программа не будет эффективной. Создание такой программы привлечет инвестиции частного капитала, а поскольку инвестиции должны будут окупаться, они будут давать прибыль в ближайшие годы. Примеры США и КНР это доказывают.

Решения руководства нашей страны о развитии нанотехнологий включают, как один из разделов, разработки и производство СД. Поэтому при создании программы развития нанотехнологий необходимо создать государственную программу исследований, разработок и производства СД в России, которая обеспечит развитие СД освещения и большую экономию электроэнергии в нашей стране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юнович А.Э. Светодиоды как основа освещения будущего. Светотехника. 2003. № 3. С. 2-7.
2. U.S. Department of Energy, Voices for SSL Efficiency Workshop, Boston, MA,