

Нам обещают «светлое будущее»

Наш журнал не раз обращался к проблеме использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) как альтернативы бесконтрольному сжиганию невозполнимых запасов нефти и газа на планете. Слишком сильно зависит состояние природы на Земле от ее решения, от того, как будет выглядеть энергетика будущего, от того, найдет ли человечество в себе силы сделать энергосбережение одним из главных приоритетов своего развития. Поэтому встреча министров «Окружающая среда для Европы», прошедшая в конце мая в Киеве и немало внимания уделившая проблемам энергетики и энергосбережения, а также недавнее присуждение международной премии «Глобальная энергия» американскому, британскому

и российскому ученым за цикл работ по энергосбережению, вновь привлекли внимание общественности к судьбам мировой энергетики. Первой в истории премии «Глобальная энергия», учрежденной по инициативе лауреата Нобелевской премии Ж.И. Алферова самыми солидными российскими бизнес-структурами и, по мнению учредителей, способной конкурировать в международном научном сообществе по значимости и престижу с Нобелевской, удостоены в этом году Ник Холоньяк, профессор Иллинойского университета (США) «за основополагающий вклад в создание силовой электроники и создание первых светодиодов в видимой области спектра», а также Г.А. Месяц, вице-президент РАН (Россия),

и англичанин Ян Смит, старший научный сотрудник научно-исследовательской компании Titan Pulse Sciences Division (США), «за фундаментальные исследования в области мощной импульсной энергетики». Работы, удостоенные этой высокой награды, так или иначе связаны с энергосбережением, которое лежит в основе всех пока еще утопических устремлений человечества к устойчивому развитию. Сегодняшний разговор об энергосбережении начинается статья одного из крупнейших специалистов по светодиодам А.Э. Юновича, большого энтузиаста их применения для решения проблем энергосбережения в нашей стране, где на освещение, увы, все еще расходуется слишком много энергии.

А.Э. Юнович,

доктор физико-математических наук,
профессор МГУ им. М.В. Ломоносова,
Соросовский профессор

Светит больше – греет меньше



Одни из наиболее ярких примеров преобразований в технике, изменивших жизнь людей, — изобретение транзисторов, развитие полупроводниковой электроники и создание компьютеров. Компьютеризация кардинально изменила характер производств, организацию труда и уклад жизни, стала основой современных средств связи.

Сопоставимые по значению перспективы несколько позже возникли и у той области физики, которая изучает люминесценцию, в связи с созданием новых полупроводниковых источников света — светодиодов.

Первые открытия здесь были сделаны еще в 1923 г. О.В. Лосевым в Ленинградском физико-техническом институ-

те и Нижегородской радиотехнической лаборатории. Однако реализовать эти идеи удалось лишь через 40 лет, когда появились первые светодиоды и был заложен фундамент новой отрасли техники — оптоэлектроники.

Нельзя не упомянуть о вкладе в это научное направление вице-президента РАН, директора Физико-техничес-

кого института им. А.Ф. Иоффе, лауреата Ленинской премии, академика Ж.И. Алфёрова, получившего еще в 70-х годах XX в. Золотую медаль Американского физического общества за исследования гетероструктур (многослойных полупроводниковых структур, слои которых образованы из материалов разного химического состава) на основе арсенида галлия. В 2000 г., когда стало ясно практическое значение этих работ, он получил за них Нобелевскую премию.

В 1990-х наша промышленность выпускала свыше 100 млн светодиодов в год, мировая — десятки миллиардов. Светодиоды уже в то время начали применять для передачи и визуализации информации: в световых индикаторах, табло, приборных панелях автомобилей и самолетов, рекламных экранах.

Эффективность излучателя света характеризуется светоотдачей — отношением светового потока (в люменах) к потребляемой электрической мощности (в ваттах). У светодиодов она гораздо выше, чем у ламп накаливания, для всех цветов видимого диапазона.

Светодиоды очень перспективны для обычного освещения, поскольку в сочетании с люминофорами дают белый свет. Электроэнергии они потребляют меньше, чем обычные лампы накаливания и люминесцентные лампы, кроме того, они надежнее и безопаснее. Возможно, что к 2007 г. в ряде стран светодиоды полностью заменят лампы накаливания, а к 2012 г. — люминесцентные лампы.

Около 20% всей электроэнергии в мире расходуется на освещение, поэтому энерго-

сбережение в светотехнике — одна из важнейших проблем, как экономических, так и экологических. По прогнозам, светодиоды уменьшат расход электроэнергии для освещения примерно вдвое, что уже в ближайшие 20 лет позволит сэкономить до 120 млрд долл.

Американская программа энергосбережения, рассчитанная до 2010 г., предполагает только за счет перехода на освещение с помощью светодиодов сэкономить столько электроэнергии, сколько производят 100 средних АЭС.

Как действует светодиод

Светодиод — полупроводниковый кристалл с двумя электрическими контактами, преобразующий энергию электрического тока в световую. Например, в *p-n* переходе, т. е. на границе между дырочной (*p*) и электронной (*n*) проводимостью, при обычной поляризации внешнего источника тока («плюс» на контакте у *p*-области и «минус» — у *n*-области) электроны из *n*-области поступают в *p*-область, а дырки (вакансии электронов, т. е. те места, где должны были быть электроны, но их нет) из *p*-области — в *n*-область.

Попавшие в эти области пары «электрон — дырка» рекомбинируют (входящие в них частицы «спариваются» и исчезают), излучая кванты света (излучательная рекомбинация) или передавая свою энергию кристаллической решетке (безызлучательная рекомбинация). Излучение тем вероятнее, чем выше концентрация *p-n* пар, сосредоточенных в области рекомбинации. Но, как правило, ее толщина оказывается слишком велика и определяется средним рассто-

янием, на которое перемещаются в кристалле носители заряда до рекомбинации, так что концентрация пар в области рекомбинации невелика и, стало быть, обычный полупроводниковый кристалл светит слабо — большая часть «закачанной» в него энергии расходуется на безызлучательную рекомбинацию, иными словами, на нагрев.

Однако в 1960-х Ж.И. Алфёрову с сотрудниками удалось резко уменьшить толщину этой области в гетероструктурах, многократно повысив тем самым вероятность излучения.

Преимущества светодиодов

Для эффективного излучения света в кристалле в нем должно быть как можно меньше так называемых дефектов (любых неоднородностей), поскольку они заметно усиливают безызлучательную рекомбинацию — энергию расходуется не на свечение, а на нагрев. Для практики наиболее важно отношение числа излучаемых квантов к числу электронно-дырочных пар в зоне рекомбинации. Оно и определяет эффективность преобразования электрической энергии в световую. КПД излучателя ограничен еще и потерями на нагрев всех элементов цепи, поэтому их электрическое сопротивление должно быть минимальным. Восприятие же излучения человеком, глаз которого по-разному реагирует на различные участки спектра, диктует дополнительные требования к излучателям. Излучаемый световой поток должен быть сосредоточен в определенном телесном угле и как можно меньше поглощаться внутри устройства.

Малые размеры светодиодов выгодно отличают их от ламп накаливания, диод —

почти точечный источник света с площадью около 10^{-2} мм². Излучающий кристалл покрывается выпуклым или плоским пластмассовым колпачком размером в несколько миллиметров.

Показатель преломления и конструкция колпачка подбираются так, чтобы сфокусировать излучение в нужном телесном угле $5-45^\circ$. Светодиод потребляет минимум энергии: при напряжении 2–4 В и токе 10–30 мА его электрическая мощность составляет 20–120 мВт. При КПД 5–25% излучаемая мощность достигает 1–30 мВт, а соответствующая сила света 1–30 кд (кандела, или свеча — единица силы света СИ). Самая миниатюрная лампа накаливания работает при напряжении около 12 В и токе 50–100 мА, иными словами, потребляемая ею электрическая мощность в десятки раз больше, что немудрено — в лампах накаливания большая часть потребляемой энергии тратится не на освещение, а на нагрев. Светоотдача современных светодиодов достигла 50 лм/Вт (теоретический предел светоотдачи белых светодиодов составляет около 300 лм/Вт). Для получения больших световых потоков сотни светодиодов объединяют в световые панели.

Замена ламп накаливания светодиодами особенно эффективна в светосигнальной аппаратуре. Лампам нужны цветные светофильтры, что уменьшает КПД — часть излучения поглощается фильтрами. Цвет излучения светодиода может быть любым, фильтры им не нужны.

Революция в светотехнике

Светодиоды широко применяются уже повсюду. В 2002 г. их выпустили уже на 80 млн долл., а, по прогнозам, в

2007 г. объем производства превысит 500 млн долл.

В 1998 г. одиннадцать крупнейших японских компаний разработали программу «Свет в XXI веке» с финансированием на 4 года, но планированием задач до 2010 г. Ее главная цель — к этому моменту полностью заменить традиционные лампы накаливания и люминесцентные лампы светильниками нового типа на основе белых светодиодов. Вслед за этим и в США была принята национальная программа развития освещения «Новое поколение осветительных устройств», рассчитанная до 2020 г. Эта программа была внесена как законопроект в сенат США в 2001 г. Она прошла экспертизу и представлена в 2002 г. для утверждения сенатом и конгрессом. Программа предусматривает до 2011 г. финансирование исследований, разработок и производства светодиодных источников света на уровне 50 млн долл. в год. Авторы программы сравнивают ее значение для США со знаменитым «Манхэттенским проектом» (программой ядерных исследований и разработки атомного оружия в 40-х годах прошлого века).

Во всем мире специализированные компании появляются, как грибы после дождя. Так, крупнейшие участники рынка электробытовых приборов и осветительных устройств — Hewlett-Packard и Philips — образовали компанию LumiLeds; их не менее значительные конкуренты Siemens и Osram — компанию Osram Optosemiconductors; General Electric и Emcore — компанию Gelcore и т. д. Стоимость «святого светового» светодиода — его полупроводникового «чипа» — за последние несколько лет снизилась от 1 до 0,2 долл. и, по всем прогнозам, будет стремительно

падать, что, конечно, ускорит вытеснение ламп светодиодами.

Ну, а что же у нас? Достижения пока скромны. Можно упомянуть фонтан на площади Европы в Москве (у Киевского вокзала), подсвечиваемый 960 светодиодами, меняющими цвет согласованно с музыкальным сопровождением. На перекрестках Москвы к 850-летию города установили 1000 светофоров на светодиодах. На Манежной площади установлен полноцветный экран, состоящий из миллионов светодиодов — уменьшенный аналог того, что смонтирован на одном из небоскребов Таймс-Сквер, центральной площади Нью-Йорка. Постепенно у нас внедряются и железнодорожные светофоры на светодиодах с узкой направленностью излучения, которые пользуются все большей популярностью в мире.

Во всех случаях, когда информацию надо передать световыми сигналами определенного цвета: в автодорожных и железнодорожных светофорах, панелях управления всех видов транспорта, сигнальных огнях на том же транспорте, дорожных световых табло, фонарях аэродромных полос и т. д. — светодиоды имеют огромные преимущества перед обычными лампами. Они не требуют цветных светофильтров, лучше различимы глазом, поскольку близки к монохроматическим источникам света. Уже проектируются телевизоры с размером экрана по диагонали более 70 см, в которых каждая из 100 тыс. светящихся точек, формирующих изображение, образована светодиодами трех цветов — синего, зеленого и красного.

Упомянутая компания Osram Optosemiconductors, специализирующаяся на про-

	Светодиод 2002	2007	2012	2020	Лампа накаливания	Люминесцентная лампа
Светоотдача, лм/Вт	25	75	150	200	16	85
Срок службы, тыс. ч	20	>50	>100	>100	1	10
Световой поток, лм	25	200	1000	1500	1200	3400
Входная мощность, Вт	1	2,7	6,7	7,5	75	40
Стоимость 1 люмена, долл.	200	20	<5	<2	0,4	1,5
Стоимость 1 лампы, долл.	5	4	3	<3	0,5	5
Выход на рынок и конкурентоспособность	Слабое освещение	Замена ламп накаливания	Замена люминесцентных ламп	Любые применения		

изготовлении светодиодов, изготовила потолочный плафон из 14 тыс. голубых, зеленых, желтых, красных и белых светодиодов. Режим их работы устанавливается процессором, поэтому простым выбором тока легко задать освещение того или иного типа: от теплого, близкого к свету ламп накаливания, до холодного, как у люминесцентных ламп. Излучение светодиодов в плафоне сфокусировано так, что свет идет вниз, не рассеиваясь к стенам. Впрочем, для массового применения светодиодов в обычном освещении еще понадобятся серьезные психофизиологические исследования зрительного восприятия человеком излучения светодиодов различных цветов.

Светодиоды незаменимы для декоративного освещения архитектурных объектов, что наглядно продемонстрировано в Дуйсбурге (Германия) при подсветке моста светильниками, смонтированными в столбах ограды.

Производство светодиодов в последние годы опережает все самые оптимистичные прогнозы на 20–30%. Большинство экспертов сходятся

во мнении, что лет через 10 лампы накаливания станут анахронизмом и перестанут использоваться для освещения. Их заменят гораздо более экономичные и функциональные светодиоды.

Возможно ли «светлое будущее» в России?

Назрела необходимость в долгосрочной отечественной программе исследований и разработок для создания источников света на светодиодах. На ее начальном этапе понадобятся крупные капиталовложения, которые многократно окупятся в дальнейшем. Потребуется и координация (возможно, даже объединение) предприятий электронной и светотехнической промышленности, введение новых специальностей в высших и средних специальных учебных заведениях для подготовки новых кадров, расширение международных научных, технических и промышленно-экономических связей в этой области. Для финансирования программы придется привлечь средства как федерального, так и региональных бюджетов, а также отечественных и зарубежных частных инвесторов.

Чтобы осуществить такую программу, предстоит создать промышленное производство светодиодов нового поколения из самых современных материалов, другой светотехнической аппаратуры на основе полупроводниковых приборов. Но все эти затраты окупятся сторицей. Ведь неоспоримые преимущества светодиодов обусловлены не только гигантским энергосбережением, но и уменьшением загрязнения окружающей среды, улучшением восприятия света (в конечном итоге — улучшением здоровья населения), невиданной экономией для потребителей.

Увы, пока светодиоды в России выпускают на импортных чипах. Для их производства необходимо дорогое импортное оборудование. Конструирование и производство отечественного оборудования — далекая перспектива, хотя определенный задел в нашей электронной промышленности есть.

Публикация подготовлена на основе статей автора в журналах «Природа» и «Светотехника»