О современных мощных светодиодах и их светотехническом применении

А.В. АЛАДОВ, Е.Д. ВАСИЛЬЕВА, А.Л. ЗАКГЕЙМ [1], Г. В. ИТКИНСОН, В.В. ЛУНДИН, М.Н. МИЗЕРОВ, В.М. УСТИНОВ, А.Ф. ЦАЦУЛЬНИКОВ

Учреждение РАН «Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН», Учреждение РАН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН», ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника», Санкт-Петербург

Аннотация

В статье кратко рассматриваются история разработки светодиодов за рубежом и в нашей стране, физические принципы работы и современные конструктивно-технологические решения мощных и эффективных светодиодов и осветительных систем на их основе (в частности, мощный цветодинамический *RGB* источник света для медико-биологических целей), а также перспективы дальнейшего внедрения светодиодов и нерешённые проблемы.

Ключевые слова: светодиод, СД, белые СД, СД с люминофором, *RGB* системы.

1. Введение.

Последнее десятилетие отмечено значительным прогрессом в совершенствовании технологий создания полупроводниковых светодиодов (СД), а также многократным улучшением их технических характеристик (прежде всего, эффективности). Параллельно с этим стремительно расширялись масштабы производства СД при беспрецедентно быстром внедрении научно-технологических достижений в серийные приборы. У таких фирм, как *Cree, Philips-Lumileds, Nichia, Osram*, рекордные результаты, продемонстрированные в лаборатории, как правило, за 1–1,5 года переносятся на коммерческие изделия. Можно отметить, что в истории развития техники внедрение СД освещения относится к тем немногочисленным случаям, когда действительность превзошла наиболее смелые прогнозы. В начале 2000 годов большинство экспертов относило к предельным достижениям выход белых СД на уровень световой отдачи (СО) ≈ 60 – 80 лм/Вт к 2010 г. [1]. Сейчас доступны серийные СД с СО ≈ 110 – 120 лм/Вт (подчеркнём: в реальных рабочих режимах, при достаточно больших рабочих токах, равных 0,35 – 0,5 А) [2, 3], а рекордные лабораторные образцы достигли СО 208 лм/Вт при токе 350 мА [4]. Разумеется, при таких параметрах, превышающих по эффективности лампы накаливания в 10, а ртутные люминесцентные лампы (в том числе компактные) в 2 – 2,5 раза, СД становятся главными кандидатами на роль источников света для широкого круга применений, включая общее освещение. Стимулирование разработок и расширение сферы использования СД находятся в центре внимания государственных институтов развитых стран: в качестве примера приведём анонсированную в 2007 г. Министерством энергетики США программу *Bright Tomorrow Lighting Competition L-Prize* по замене 60-ваттной лампы накаливания 6-ваттной СД-лампой с призом для фирмы-победителя 10 млн. долларов США [5] и выделенный в 2010 г. на развитие прорывных технологий в области СД источников света фонд размером 137,8 млн. долларов США [6]. В России тема мощных СД и их применения для освещения стала актуальной с конца 90-х годов прошлого века (важнейшие этапы развития этого направления рассмотрены в обзорах А.Э. Юновича [7, 8]). Настоящая работа имеет целью отразить некоторые последние достижения в этой области с акцентом на совместную деятельность санкт-петербургской «команды» в составе НТЦ Микроэлектроники РАН, Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника».

Высокую эффективность или, в других терминах, экономичность всегда отмечают в качестве первого преимущества применения СД для освещения[2] [9]. Кроме того, широко известны общие достоинства СД как полупроводниковых приборов по сравнению с вакуумными: большой срок службы (50000 – 100000 ч), миниатюрность, механическая прочность, простота питания, быстродействие, отсутствие разогретых до высокой температуры элементов и т. д. Но помимо вышеперечисленных достоинств есть и принципиально новое качество СД освещения, не реализуемое в ламповом варианте: возможность сравнительно простого и безынерционного управления не только яркостными, но и цветовыми (спектральными) характеристиками излучения, что получило название интеллектуальный свет (*smart light*) [10]. Имеющие многолетнюю историю медико-биологические исследования свидетельствуют о значительном влиянии света на здоровье и психофизиологическое состояние человека. СД впервые с момента появления искусственного освещения открывают техническую возможность создания эргономичных источников света, то есть излучателей с параметрами, варьируемыми во времени в зависимости от состояния, рода занятий, возраста, личных предпочтений человека и др., что обеспечивает благоприятное влияние освещения на работоспособность и здоровье людей.

В данной работе кратко рассматриваются история разработки СД за рубежом и в нашей стране, физические принципы работы и современные конструктивно-технологические решения мощных и эффективных СД и осветительных систем на их основе, а также перспективы дальнейшего внедрения и нерешённые проблемы.

2. Современные мощные светодиоды: физические основы работы и энергетические характеристики

Хотя впервые явление электролюминесценции в кристаллах наблюдалось ещё на заре прошлого века [11, 12], начало промышленного выпуска СД относится к 1960-м годам [13]. Достаточно долго это были маломощные приборы, используемые преимущественно в качестве индикаторов.

---

[1] E-mail: zakgeim@mail.ioffe.ru
Список литературы (66 наименований) депонирован в редакции.

[2] За рубежом обычно используется термин Solid-State lighting – буквально, твердотельное освещение.

Однако принципиальное значение имело доказательство Ж.И. Алфёровым с сотрудниками (Д.З. Гарбузовым, В.Б. Халфиным и др.) близкого к 100 % значения внутреннего квантового выхода излучательной рекомбинации в двойных *AlGaAs* гетероструктурах [14, 15], а также выдвижение основополагающих идей по повышению коэффициента вывода света из кристалла с использованием эффектов многопроходности и переизлучения [16–18]. В совокупности это означало потенциальную возможность создания твердотельных источников света с очень высокими КПД. Потребовалось около 40 лет развития эпитаксиальных и постростовых технологий, чтобы сейчас оказаться вблизи этой цели, причём для приборов почти всего видимого спектрального диапазона. Важнейшими этапами на этом пути явились разработка методов эпитаксиального выращивания фосфидных *AlGaInP* [19, 20] и нитридных *AlGaInN* [21–23] многокомпонентных полупроводниковых наногетероструктур с квантоворазмерными активными областями. В основе работы СД лежат три физических процесса: инжекция неравновесных носителей, их излучательная рекомбинация и вывод света из объёма полупроводника, что схематически показано на рис. 1 [24, 25]. Вклад каждого процесса в конечную эффективность прибора может быть представлен сомножителем в выражении (1):

$$CE = \eta_f \cdot \underbrace{\eta_{inj} \cdot \eta_{int} \cdot \eta_{opt}}_{\eta_{ext}}, \qquad (1)$$

где: CE – полный КПД; h_{ext} – внешний квантовый выход; h_f – коэффициент питания; h_{inj} – коэффициент инжекции; h_{int} – внутренний квантовый выход; h_{opt} – коэффициент вывода излучения. Забегая вперёд, отметим, что для лучших современных СД все члены выражения (1) могут быть доведены до уровня 95–97 %, так что полный КПД совершенного СД может составить примерно 90 %. Рекордный экспериментальный результат $CE > 70$ % для синего *AlInGaN* СД сейчас, по-видимому, принадлежит фирмам *Cree* и *Osram* [4, 26]. Существенным моментом в работе СД (особенно мощных, для систем освещения) является зависимость входящих в (1) сомножителей от уровня возбуждения – рабочего тока. На сегодняшний день выяснение природы и поиск путей преодоления характерного для *InGaN* структур падения эффективности с увеличением тока (*efficiency droop*) является предметом научных дискуссий и одним из центральных моментов в соперничестве ведущих фирм-производителей [27–29].

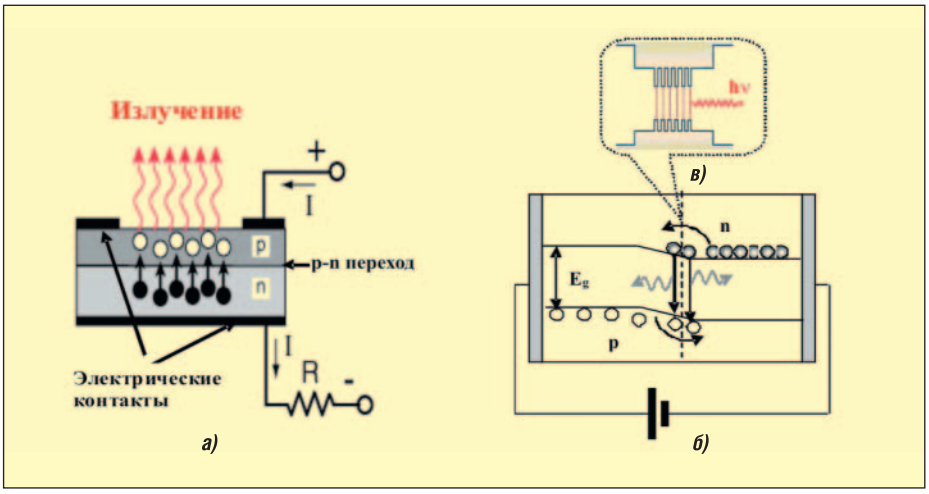

Рис. 1. Схематическое изображение сечения СД (а) и внутренних процессов инжекции (б) и излучательной рекомбинации в квантово-размерной структуре (в), ведущих к генерации излучения

Не входя в детальный анализ выражения (1), остановимся кратко на двух его членах: h_{int}, определяемым преимущественно уровнем технологии эпитаксиального роста излучающей гетероструктуры, и h_{opt}, обусловленным, в основном, конструкцией излучающего кристалла (отметим, что это упрощённое разделение – оба параметра тесно взаимосвязаны). Рассмотрим указанные вопросы на примере наиболее передовых на сегодняшний день излучателей – синих и зелёных СД в системе *AlInGaN*.

3. Вопросы эпитаксиального выращивания высокоэффективных *AlInGaN* излучающих гетероструктур для широкого спектрального диапазона 400–560 нм

Ключевой технологией в процессе изготовления СД является эпитаксиальный рост СД структур – последовательное осаждение на подложку (сапфир или карбид кремния) слоёв различных материалов: *GaN*, *InGaN* и *AlGaN*. Эпитаксиальная структура СД состоит из буферного слоя *GaN*, слоёв *GaN n*- и *p*-типов легирования и активной излучающей области на основе повторяющихся слоёв *InGaN*, разделённых барьерами *GaN*. Типичный вид квантоворазмерной гетероструктуры показан на рис. 2.

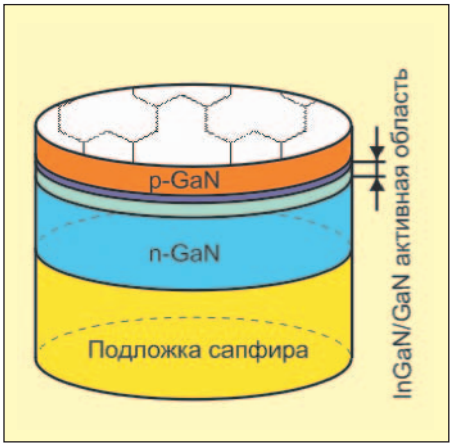

Рис. 2. Последовательность слоёв в типичной светодиодной структуре на основе GaN

Особенностью гетероструктур на системе материалов *InGaAlN* состоит в том, что рост осуществляется на подложках сапфира или карбида кремния, не согласованных с *GaN* по параметру решётки, а все слои, составляющие гетероструктуру *GaN*, *InGaN* и *AlGaN*, также являются несогласованными по параметру кристаллической решётки. Это приводит к высокой плотности дефектов в эпитаксиальной структуре, которая составляет 10^8–10^9 см$^{-2}$. Кроме того, данный факт накладывает ограничения на толщину и состав слоёв в эпитаксиальной структуре. Превышение критических значений состава или толщины приводит к релаксации и возникновению дефектов. В случае роста слоёв *InGaN* без ухудшения кристаллического качества возмож-

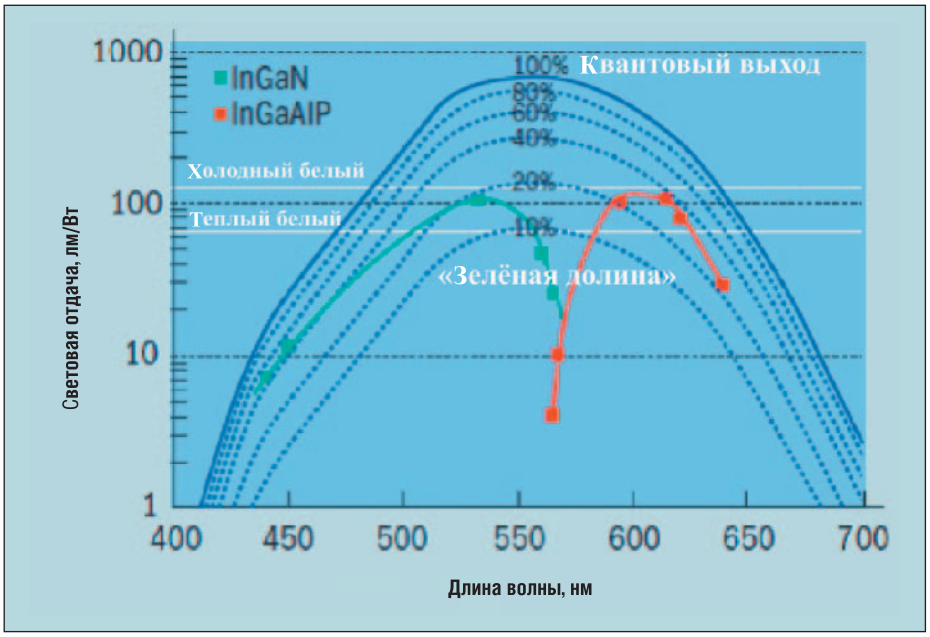

Рис. 3. Зависимость световой отдачи от длины волны излучения для СД на основе InGaAlN и InGaAlP [30]

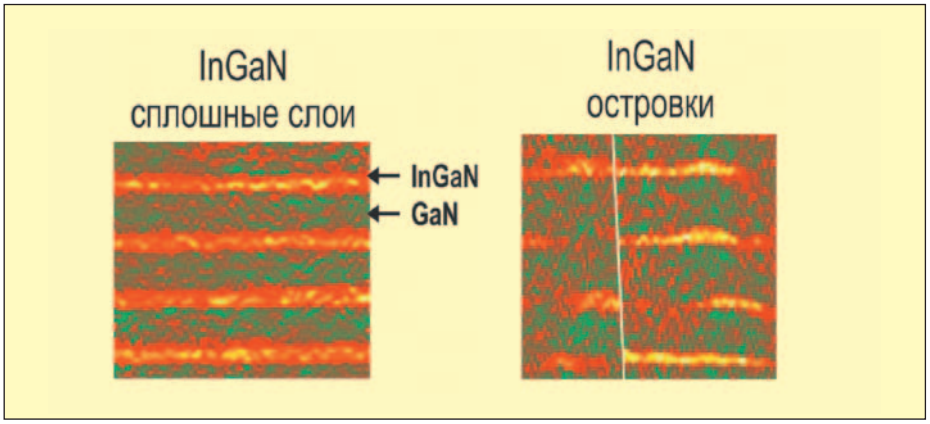

Рис. 4. Полученные методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения изображения структур со сплошными слоями InGaN и с островками

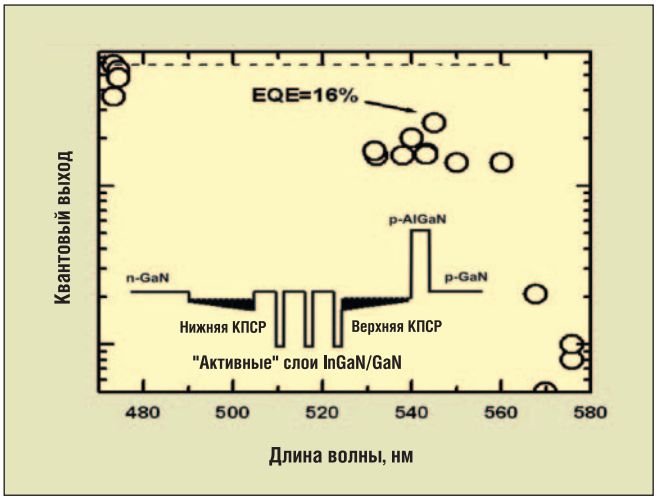

Рис. 5. Зависимость внешнего квантового выхода (EQE) от длины волны излучения в светодиодных структурах (измерения на пластине, численное значение относится к внешнему квантовому выходу корпусированного светодиода)

но осаждение слоёв с составом менее 20 % и толщиной несколько нанометров. В результате этих ограничений до настоящего времени высокая квантовая эффективность излучения была реализована в диапазоне от УФ до ближнего зелёного (400–530 нм) излучения (см. рис. 3). Дальнейшее увеличение длины волны приводит к драматическому падению эффективности излучения. Поскольку для другой системы материалов (*InGaAlP*), которая используется для изготовления красных СД, реализация излучения в зелёной области спектра невозможна из-за фундаментального ограничения по ширине запрещённой зоны, то проблема достижения эффективного излучения в диапазоне длин волн 530–580 нм является общей проблемой изготовления твердотельных источников света и получила название проблемы «зелёной долины». В промышленно выпускаемых в настоящее время белых СД реализация излучения во всём видимом диапазоне длин волн достигается посредством использования люминофорных покрытий, которые преобразуют излучение синего цвета в зелёное, жёлтое и красное. При таком преобразовании часть энергии теряется из-за стоксовых потерь. Разработка технологии эпитаксиального роста активных областей, излучающих во всём спектральном диапазоне, позволит избежать стоксовых потерь и увеличить эффективность излучения.

Для преодоления проблемы, связанной с существованием критических значений состава и толщины *InGaN*, в ФТИ им. А.Ф. Иоффе были разработаны специальные подходы, позволяющие трансформировать напряжённый слой *InGaN*, осаждённый на поверхность *GaN*, и формировать пространственно-разделённые островки *InGaN*, сохраняя при этом достаточно низкий средний состав по *In* [31]. На рис. 4 приведены изображения двух многослойных структур *InGaN/GaN*, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Видно, что использование специальных технологических методов (в данном случае состава газовой фазы при осаждении *InGaN*) позволяет трансформировать сплошной слой *InGaN* в массив островков размером 10–20 нм. Кроме того, видно, что внутри этих островков распределение *In* также неоднородно, и наблюдается формирование локальных областей (квантовых точек) размером 2–3 нм с составом по *In* до 60 %. Важнейшим преимуществом данного подхода является также подавление транспорта носителей в плоскости слоёв *InGaN* к областям дефектов, что также значи-

тельно повышает эффективность излучения. На рис. 5 приведено схематическое изображение активной области СД структуры, содержащей один или несколько слоёв квантовых точек, ограниченных с обеих сторон короткопериодной сверхрешёткой (КПСР) *InGaN/GaN* [32]. Использование КПСР позволило улучшить структурное совершенство и инжекционные свойства СД структур. Синие СД с такой активной областью продемонстрировали внешнюю квантовую эффективность около 30 %, а зелёные СД с длиной волны излучения в районе 540 нм – около 16 % (в зелёных СД верхняя сверхрешётка отсутствовала, чтобы уменьшить суммарное содержание индия). Оптимизация условий роста *InGaN* квантовых точек позволила создать СД, излучающие вплоть до 560 нм, однако эффективность излучения в этом случае снижалась до 4–5 % (рис. 5).

Разработанные подходы были применены для создания активных областей монолитных полихромных источников белого света, содержащих несколько квантово-размерных слоёв *InGaN*, излучающих на различных длинах волн, смешение излучения которых позволяет получить белый свет [33]. Активные области выращенных структур содержали два слоя *InGaN/GaN* толщиной 3 нм, излучающие в синем диапазоне длин волн 440–450 нм, и один слой *InGaN* толщиной около 3 нм, излучающий в зелёном спектральном диапазоне 540–570 нм (рис. 6). Слои InGaN, излучающие в синем и зелёном диапазонах, пространственно разделены КПСР *InGaN/GaN* с толщинами слоёв *InGaN* и *GaN* около 1 нм. Последовательность слоёв в активной области монолитной СД структуры приведена на вставке на рис. 6.

Одной из проблем при создании монолитных источников белого света является обеспечение инжекции носителей в слои *InGaN*, где идёт генерация излучения. Неоднородная инжекция приводит к тому, что интенсивность излучения уменьшается по мере увеличения расстояния между излучающим слоем *InGaN* и областью *p*-легирования. Использование КПСР *InGaN/GaN* позволило улучшить транспорт носителей в активную область и повысить эффективность излучения в СД структурах. Максимальная достигнутая внешняя

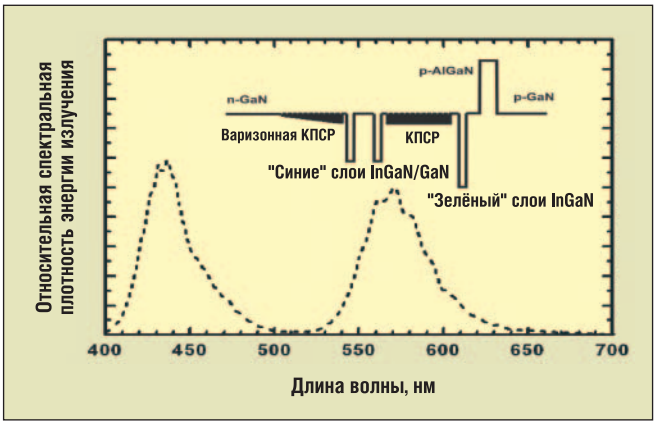

Рис. 6. Спектры излучения и последовательность слоёв в активной области (на вставке) монолитной светодиодной структуры

квантовая эффективность излучения в таком дихромном монолитном СД достигает значения около 3,5 % (для СД без линзы) при токе примерно 20 мА и коррелированной цветовой температуре в пределах 6000–6500 К. Уменьшение эффективности излучения монолитного СД по сравнению с эффективностью зелёных СД связано со значительным увеличением общего содержания индия в активной области, что, по-видимому, приводит к дополнительному формированию дефектов. Однако необходимо отметить, что несмотря на это увеличение общего содержания индия катастрофического уменьшения квантового выхода излучения не наблюдается. Это открывает возможности изготовления монолитных источников света, содержащих в активной области 3 или 4 слоя *InGaN*, излучающих в синей, зелёной и жёлтой областях спектра и позволяющих создавать источники белого света с высоким индексом цветопередачи.

4. Конструкции мощных и эффективных излучающих кристаллов

Что касается второй важнейшей проблемы – достижения высоких значений коэффициента вывода излучения h_{opt}, (иначе говоря, исключения потерь на поглощение внутри полупроводника и на контактах), то в современных СД она решается посредством создания достаточно «изящных» вертикальных или мезапланарных (флип-чип) конструкций излучающих кристаллов. В дальнейшем они монтируются на плату-носитель, выполняющую одновременно роль механической основы, отражателя, токоподвода и теплоотвода (последний играет существенную роль в мощных СД для систем освещения). В качестве примера на рис. 7 схематически приведено сечение мощного флип-чип излучающего кристалла и фотография его общего вида после монтажа на кремниевую плату-носитель [34, 35].

Важнейшим эффектом, препятствующим выводу генерируемого излучения наружу, является полное внутренне отражение как на внешней границе сапфир-воздух, так и на внутренней границе *GaN*-сапфир. Это приводит к тому, что с первого прохода из кристалла через световыводящую поверхность выходит не более 4 % генерируемого внутри изотропного излучения. Остальное «зацикливается» в образующихся волноводах с постепенным поглощением в объёме кристалла и на контактных покрытиях, которые, как правило, имеют низкий коэффициент отражения или – в случае полупрозрачных контактов – пропускания. Основные усилия, направленные на повышение оптической эффективности конструкции, связаны с созданием внутренних отражающих и рассеивающих поверхностей, обеспечивающих многопроходность излучения с увеличением конечной вероятности покинуть кристалл. В некоторых наиболее «продвинутых» на сегодняшний день конструкциях сапфировая подложка полностью удаляется методами лазерной абляции (технология «*lift-off*»), и тонкая (несколько микрометров) прозрачная активная область СД более «не изолирована» от среды, в которую выводится излучение [36–38].

Вторая крупная проблема конструирования мощных излучающих кристаллов связана с созданием электрических контактов и обеспечением равномерного растекания тока по площади *p-n*-перехода [39]. Как видно из

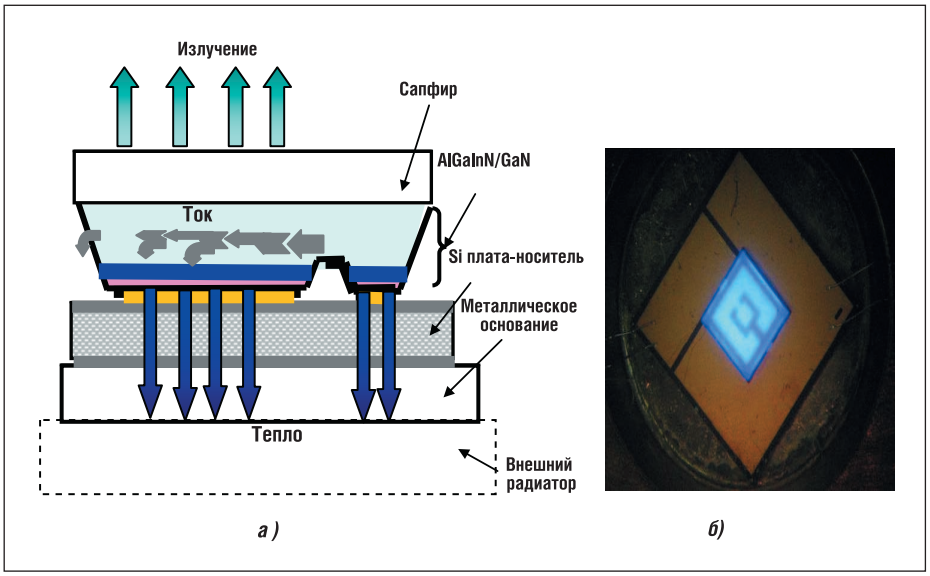

Рис. 7: а – сечение мощного излучающего кристалла флип-чип конструкции МК 24 (ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника»): стрелками показаны направления световых, токовых и тепловых потоков; б – фотография вида кристалла сверху, сквозь подложку

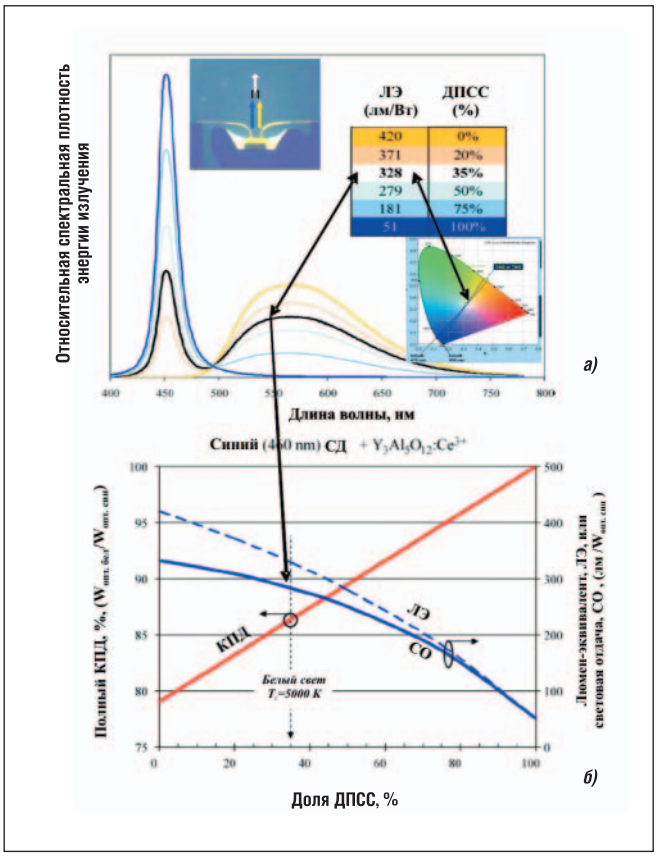

Рис. 8: а – зависимость спектра излучения белого светодиода от доли прошедшего сквозь люминофор синего света (ДПСС) (Blue leakage fraction). На вставках: сечение, люмен-эквиваленты (ЛЭ) для различных спектров, положение на диаграмме цветности МКО; б – зависимость полного КПД, люмен-эквивалента и световой отдачи (КПД синего = 100%, пассивные потери = 0) от доли прошедшего синего излучения

рис. 7 *а*, в кристаллах мезапланарной конструкции с односторонним расположением контактов (выгодной с точки зрения отсутствия затенения света контактными площадками) существует значительная латеральная составляющая тока по тонкому слою с относительно низкой проводимостью. Более-менее однородная плотность тока в активной области достигается благодаря специально рассчитываемой топологии контактных площадок, как это проиллюстрировано на рис. 7 *б*, где *n*-контакт представляет собой две подобные прямоугольные рамки, вложенные одна в другую. Обычно длина растекания тока из-под *n*-контакта по слою *GaN* не превосходит 300–400 мкм, поэтому для СД большой площади он всегда имеет многоэлементную (часто встречно-штыревую) конфигурацию.

Специальным вопросом технологии контактных покрытий для СД является совмещение низких удельных контактных сопротивлений с высокой отражающей способностью, что может быть достигнуто применением многослойных систем на основе полупроводниковых (*ITO*) и металлических (*Ag, Al*) слоёв [40]. За последнее десятилетие общее последовательное сопротивление нитридных СД было снижено примерно на порядок: от 5–10 до 0,3–0,5 Ом.

Наконец, последним существенным моментом в конструировании излучающих кристаллов для мощных СД является обеспечение минимальных значений тепловых сопротивлений приборов [41]. При типичных на сегодняшний день рабочих токах (0,35–1 А через кристалл площадью 1 мм^2) величина рассеиваемых тепловых потоков составляет единицы ватт. В то же время, из соображений стабильности цветовых и мощностных характеристик излучения и для поддержания длительного ресурса желательно, чтобы температура активной области не превышала 80–100^0 С. При этом необходимо учесть, что сапфир имеет низкую теплопроводность. В показанной на рис. 7 флип-чип конструкции задача решается, во-первых, посредством близкого расположения активной области (*p-n*-перехода) к плоскости монтажа (расстояние не превышает 0,2 мкм) и, во-вторых, использованием для монтажа кристалла на корпус материалов с высокой теплопроводностью: кремниевой или *AlN* платы-носителя и тонких слоёв металлических припоев (*Au/Sn*, *Pb/Sn*). У прибора, показанного на рис. 7, тепловое сопротивление до внешнего радиатора составляет 6–8 К/Вт.

5. Белые светодиоды на основе люминофорного преобразования излучения

В настоящее время наибольшее распространение в качестве источников белого света получили СД с частичным преобразованием синего излучения полупроводникового кристалла в более длинноволновое жёлто-зёленое излучение с помощью нанесённого на кристалл неорганического люминофора (чаще всего

YAG: Ce), так что суммарное излучение даёт белый свет. Схематически это показано на вставке на рис. 8. Принцип работы, заимствованный у люминесцентных ламп, был впервые предложен ещё в 1977 г. [42], но практическую значимость приобрёл во второй половине 1990-х годов после создания эффективных синих полупроводниковых излучателей [23, 43]. К сегодняшнему дню конструкции и анализу работы таких приборов посвящены десятки работ, в том числе и российских учёных [44–48]. Одним из главных моментов в достижении высоких эффективности и индекса цветопередачи является качество люминофора, оптимизация его толщины и геометрии расположения относительно излучающего кристалла, что требуется для обеспечения заданной цветовой температуры. Рис. 8, взятый за основу из [49], наглядно иллюстрирует работу люминофорного СД и факторы, влияющие на его СО. В зависимости от толщины люминофора, иными словами, от соотношения синей и жёлтой полос излучения, можно получить белый свет с различной цветовой температурой (T_c) в диапазоне 2000–10000 К. При увеличении толщины люминофора, с одной стороны, растёт люмен-эквивалент суммарного излучения, а с другой – увеличиваются стоксовы потери (неизбежный механизм потерь даже при 100 % квантовом выходе люминофора). Оптимум с точки зрения СО (рис. 8 б) достигается при 35 % доле синего излучения в смеси ($T_c \approx 5000$ К). Теоретическое значение СО достигает при этом 283 лм/Вт (предполагается 100 % КПД синего кристалла и отсутствие пассивных потерь излучения при передаче его в люминофор). На практике прогресс в значении СО люминофорных белых СД за время, прошедшее с момента их появления, составил десятки раз: от 10–15 до 208 лм/Вт (уже упоминавшееся рекордное значение для лабораторных приборов, продемонстрированное фирмой *Cree* в январе 2010 г.). Для серийных промышленных приборов ведущих производителей (*Cree, Philips-Lumileds, Nichia, Osram, Semiled, Seoul Semiconductors*) типичное значение СО составляет сегодня 80–90 лм/Вт при равном около 80 лм выходящем с единичного кристалла площадью примерно 1 мм^2 световом потоке. Однако по более высокой цене можно приобрести и излучатели с СО 100–120 лм/Вт [2, 3]. Указанные значения СО относятся к холодному белому свету ($T_c \approx 5000$ К), тогда как для тёплых тонов ($T_c \approx 3000$ К) значение СО на 15–20 % ниже. Основным недостатком большинства люминофорных СД остаётся сравнительно низкий индекс цветопередачи (около 70). Он может быть повышен в некоторых типах приборов, благодаря использованию более сложных люминофоров, но это всегда даётся ценой снижения СО.

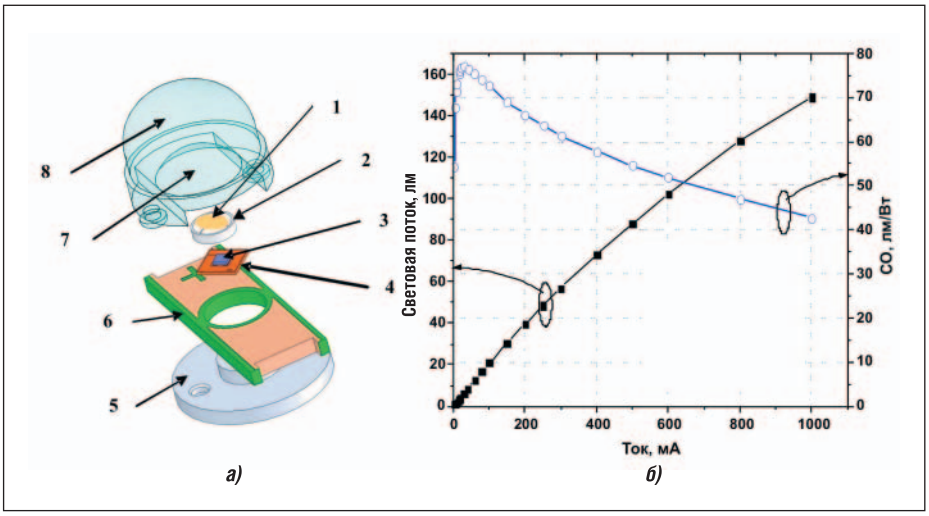

Рис. 9: а: – схематическое изображение светодиода IRS-50-W-8: 1-слой люминофора, 2 – отражатель, 3 – InGaN излучающий кристалл типа МК 24, 4 – Si плата-носитель, 5 – металлический корпус, 6 – печатная плата с выводами, 7 – гель, 8 – линза из поликарбоната; б – зависимость светового потока (Ф) и световой отдачи от тока

В России полный производственный цикл (от роста эпитаксиальной структуры до корпусирования) изготовления мощных белых СД осуществляет ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника». Исходные квантово-размерные *InGaN/GaN* эпитаксиальные структуры с длиной волны излучения 460–470 нм выращиваются на установках *E300*, *D180* фирмы *Veeco*. Основным «ноу-хау» в дизайне и технологических режимах выращивания структур является на сегодняшний день преодоление эффекта падения квантового выхода с ростом рабочего тока, поскольку именно режимы больших токов представляют интерес для осветительных систем. За последние годы здесь удалось достичь заметного прогресса [50].

В основе белого СД использована мезапланарная конструкция излучающего кристалла, описанная выше. Далее, как показано на рис. 9, излучающий кристалл методом флип-чип монтируется на кремниевую плату-носитель, которая, в свою очередь, располагается на металлическом основании – эта часть конструкции важна для обеспечения минимальных значений теплового сопротивления (6–8 К/Вт). Сверху излучающий кристалл закрывается слоем люминофора, иммерсионным гелем и линзой из поликарбоната [51]. На рис. 9 б представлены главные энергетические характеристики излучателя: зависимости полного светового потока и СО от тока. Как видно из графика, максимальный световой поток составляет 150 лм, максимальная СО – около 80 лм/Вт, а падение СО от максимального значения (малый ток) до уровня, соответствующего средним значениям рабочих токов (350–500 мА), не превосходит 24 %. Последнее значение является одним из лучших, достигнутых на сегодняшний день. СД описанной конструкции нашли широкое применение в различных светотехнических изделиях, выпускаемых ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника» [52].

6. *RGB* источники света с динамически управляемым цветом свечения

В предыдущем разделе мы рассмотрели получившие в настоящее время наибольшее распространение белые СД на принципе люминофорного преобразования излучения. К их несомненным достоинствам следует отнести высокую СО, относительную простоту и невысокую стоимость, но при этом, как и ламповые источники излучения, они не являются пе-

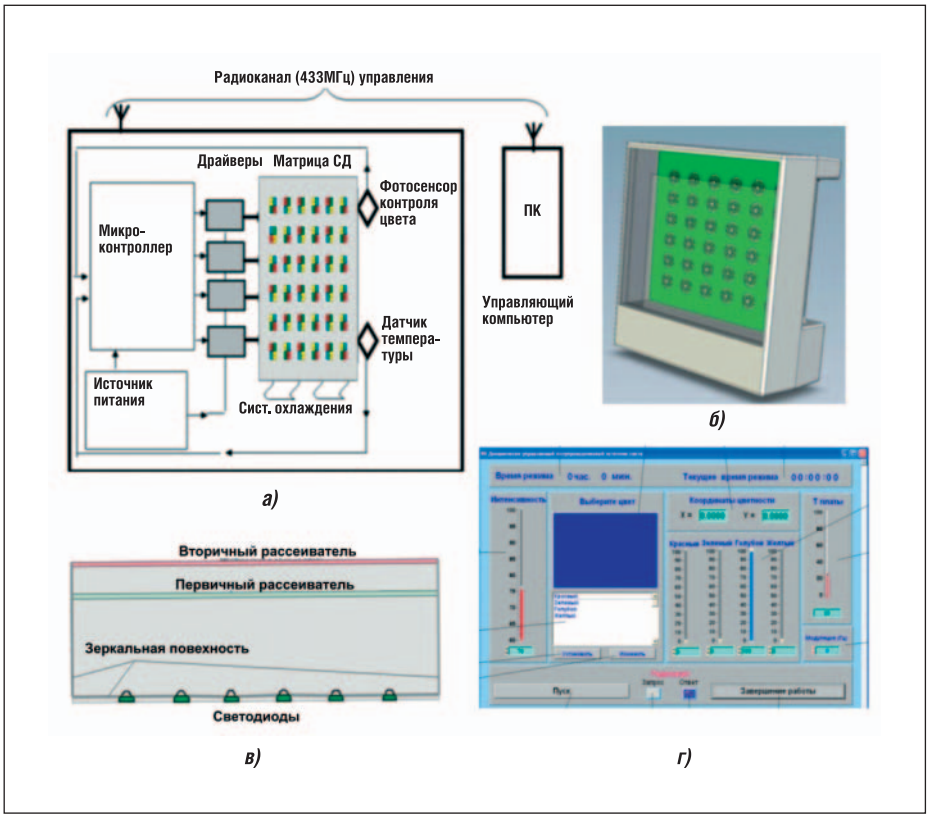

Рис. 10. Мощный цветодинамический источник света: а – блок-схема; б – общий вид; в – оптическая система; г – управляющий интерфейс

рестраиваемыми, т. е. их спектр излучения или цвет задаётся в процессе изготовления и не может быть изменён. Кроме того, принципиальным ограничителем их эффективности является наличие стоксовых потерь при преобразовании коротковолнового излучения в более длинноволновую область. Вместе с тем, другой подход – сложение излучения от разноцветных полупроводниковых кристаллов с независимым питанием (*RGB-mixing*) – позволяет создавать практически безынерционные управляемые источники света (*smart light*) с возможностью синтезировать почти всё цветовое поле диаграммы цветности МКО [53]. Излучатели с регулируемой цветовой температурой [54, 55] могут получить широкое применение не только для декоративной подсветки, что широко используется уже сейчас, но и для несравнимо более важных задач, связанных со здоровьем человека. Данные о глубокой взаимосвязи «свет – здоровье», а точнее о влиянии освещения на физическое, психофизиологическое и эмоциональное состояние человека, вытекают из большого числа медико-биологических исследований, имеющих длительную, от Парацельса, историю [56–61]. Последнее нетрудно понять, если учесть, что эволюция человека как биологического существа миллионы лет протекала в условиях естественного (солнечного) освещения с его известным спектральным составом, а также временными (суточными и сезонными) изменениями спектрального состава и интенсивности. Лишь в последние 100 лет цивилизованная часть человечества стала проводить всё больше времени при искусственном освещении, кардинально отличающемся от естественного. Проблема эта всё более усугубляется – строительство офисных и промышленных объектов без окон ведёт к тому, что люди проводят при искусственном освещении не только тёмное время суток, но и большую часть жизни. Последствия такого изменения «среды обитания» далеко не ясны, но тема «свет и здоровье» становится всё более актуальной. В этой связи нами – совместно с медицинскими исследовательскими учреждениями: Центром авиакосмической медицины (Москва), ГМУ им. И.П. Павлова (Санкт-Петербург), ГУ СПб НИПНИ им. В.М. Бехтерева (Санкт-Петербург) – начаты исследования по применению мощных перестраиваемых полупроводниковых *RGB* источников света в различных медико-биологических приложениях.

Одно из направлений исследований посвящено изучению возможности коррекции психофизиологического состояния человека с помощью управляемого по цвету и интенсивности светового воздействия, что особенно важно для персонала, работающего в экстремальных условиях [62]. Созданный для этих целей аппаратно-программный комплекс на основе динамически управляемого («интеллектуального») полихромного источника света является универсальной системой медико-технического назначения, объединяющей в себе диагностические, корректирующие и прогностические функции. При варьируемом световом воздействии регистрируются электрическая активность мозга, сердечная активность, артериальное давление, частота дыхания и другие параметры организма человека, дающие комплексную оценку его психофизиологического и функционального состояния.

В основе экспериментальной установки лежит разработанный в последние годы мощный управляемый *RGB* осветитель [63–65], конструкция и общий вид которого показаны на рис. 10.

Собственно излучающий модуль представляет собой матрицу из 36 мощных разноцветных (красного, зелёного, синего и жёлтого – *RGBA*-система) СД в совокупности с оптической системой, обеспечивающей однородное смешение и заданное угловое распределение излучаемого света. Электронный блок включает в себя плату процессора управления, драйверы питания, приёмо-передатчик радиоканала обмена данными с управляющим компьютером и систему охлаждения. Управление световыми параметрами осуществляется с удалённого компьютера с использованием разработанного программного обеспечения. Соответствующий интерфейс позволяет легко выбирать цветовые характеристики в количественном (координаты цветности) или качественном (восход, полдень и т. п.) представлении, а также изменять во времени по заданному алгоритму цвет и яркость излучения. В специальном окне дисплея отражается реализуемый в данный момент цветовой оттенок.

Одним из требований, которыми мы руководствовались при разработке прибора, являлась его последующая универсальность, т. е. возможность использования как для локального освещения, так и для освещения помещений. В этой связи, источник рассчитывался на входную электрическую мощность до 400 Вт и генерируемые световые потоки (в белом цвете), приближающиеся к 10 000 лм. Для управления интенсивностью той или иной цветовой составляющей используется широтно-импульсная модуляция, позволяющая снизить влияние амплитуды тока на спектральные и энергетические характеристики СД, особенно сильное для излучателей зелёного диапазона.

Другой аспект применения «интеллектуального» света в медицине связан с разработкой полихромных управляемых осветителей для освещения операционных с целью улучшения контраста визуализации биологических тканей при проведении операций, т. е. изменения цвета освещения при работе на разных тканях: сосуды, нервные волокна и т. д. Как известно, первые попытки применения люминофорных белых СД в хирургии потерпели неудачу из-за низкого качества белого света. Применение полихромных *RGB* источников открывает здесь новые перспективы. Принцип построения такого светильника аналогичен источнику света, описанному выше, однако для создания требуемых условий освещённости операционного поля необходим эффективный перенос энергии излучения от СД модуля к освещаемому объекту при обеспечении высокой степени однородности по освещённости и цвету рабочего поля. При реализации общей схемы построения СД источника для операционных необходимо также учитывать требования к уровню освещённости, габаритам, надёжности и безопасности.

Оптическая система осветителя, показанная на рис. 11, предназначена для создания однородного светового пятна заданного размера на расстоянии 700 мм от излучателя. Для достижения наивысшего КПД осветительной системы было решено отказаться от использования каких-либо рассеивателей, применив в системе только оптические элементы, обеспечивающие пространственный перенос излучения без формирования изображения. Однородное световое поле достигается при помощи концентратора и трёхлинзового объектива. Применённая формирующая оптика позволила создать осветительную систему с КПД около 80 % при высокой однородности освещённости и цвета во всей рабочей области. В качестве источника света использовался мощный *RGBW* (красный, зелёный, синий, белый) полупроводниковый излучатель площадью примерно 40 мм^2 с входной электрической мощностью до 50 Вт.

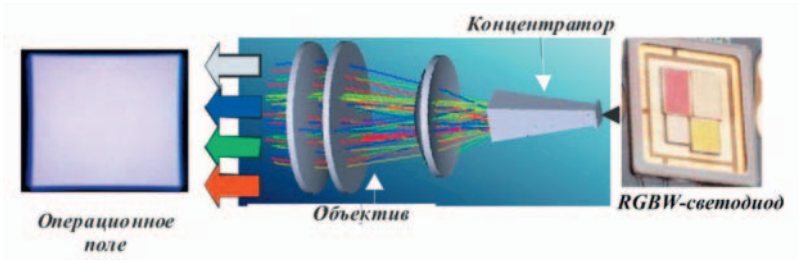

Рис. 11. Оптическая схема хирургического светильника на основе RGBW светодиодного модуля

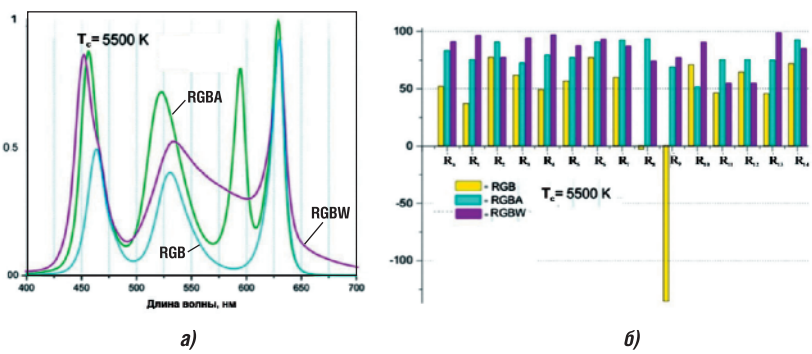

Рис. 12. Характеристики излучения RGB, RGBA и RGBW светодиодных модулей при синтезе белого света с T_c = 5500 К: а – спектры излучения белого света с T_c = 5500 К; б – диаграмма индексов цветопередачи

Обе вышеописанные и применённые полихромные системы (*RGBA* и *RGBW*) обладают значительными преимуществами по сравнению с широко используемыми люминофорными СД и трёхцветными (*RGB*) системами. На рис. 12 представлены спектры излучения и диаграммы индексов цветопередачи *RGB*, *RGBA* и *RGBW* модулей. Как видно из рис. 12 *а*, спектры четырёхцветных модулей неплохо перекрывают всю видимую область длин волн, что позволяет синтезировать широкий набор цветов, а при синтезе белого света достичь достаточно высоких значений не только общего (*CRI* ≈ 80–90), но и частных ($R_1 – R_{14}$) индексов цветопередачи (рис. 12 *б*). Видно, что для четырёхцветных *RGBA* и *RGBW* систем все индексы цветопередачи имеют положительное значение, причём в дальнейшем возможно и их увеличение за счёт расширения спектров излучения исходных СД.

7. Заключение

Кратко резюмируя историю развития СД за последнее десятилетие, можно заключить, что стремительный прогресс в технических характеристиках приборов в совокупности с быстрым внедрением научно-технологических результатов в практику позволил СД завоевать первый плацдарм на «территории» общего освещения. Сейчас он мал (около 1–2 %), но даже по осторожным экспертным оценкам будет необратимо расширяться с выходом на 10–11 % к 2012 г. [66]. По-видимому, центр тяжести работ в этом направлении смещается в область промышленного производства, а именно, освоения

уникальных СД технологий, многократного увеличения масштабов выпуска, снижения издержек и себестоимости изделий. По последнему показателю СД пока значительно отстают от традиционных ламп. Необходимы также серьёзные усилия в вопросах метрологии и стандартизации новых источников освещения.

Если оценивать место России в этой области, то можно констатировать, что отечественная промышленность заметно отстала, а внедрение СД освещения осуществляется, в основном, посредством импорта изделий и заимствования регулирующих норм из-за рубежа (отметим, что отечественные стандарты (ГОСТы) по метрологии СД относятся ещё к 70-м годам прошлого века).

В последнее время был принят ряд решений, включая правительственный уровень, по развитию отечественного СД освещения. Существенный вклад в развитие этого процесса должны внести Госкорпорация РОСНАНО, Федеральные целевые программы Министерства образования и науки РФ, участие частных инвесторов. Как осуществится реализация намеченных планов – вопрос, пока не имеющий однозначного ответа.

Основные результаты, изложенные в данной работе, получены в рамках выполнения Государственных контрактов с Федеральным агентством по науке и инновациям № 02.523.12.3017 от 14 августа 2008 г. и № 02.512.11.2333 от 01 июня 2009 г. и гранта РФФИ 09–02–12449-офи_м.

Аладов Андрей Вальменович. *Окончил в 1981 г. физический факультет Белорусского государственного университета. Ведущий инженер Учреждения РАН «Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН»*

Иткинсон Григорий Владимирович, *инженер. Окончил Ленинградский электротехнический институт в 1973 г. Генеральный директор ЗАО « Светлана-Оптоэлектроника»*

Устинов Виктор Михайлович, *доктор физ.-мат. наук, профессор, член-корр. РАН.Окончил в 1981 г. Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина). Заместитель директора учреждения РАН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»*

Васильева Елена Дмитриевна, *кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник. Окончила ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина). Директор по научной и проектной работе. ЗАО "Светлана-Оптоэлектроника"*

Лундин Всеволод Владимирович, *кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1995 г. Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина). Старший научный сотрудник учреждения РАН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»*

Цацульников Андрей Фёдорович, *кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1989 г. Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина). Старший научный сотрудник учреждения РАН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»*

Закгейм Александр Львович, *кандидат техн. наук, старший научный сотрудник. Окончил в 1972 г. Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина). Заведующий сектором оптоэлектронных приборов Учреждения РАН «Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН»*

Мизеров Михаил Николаевич, *кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник. Окончил в 1971 г. Ленинградский институт точной механики и оптики. Директор Учреждения РАН «Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН»*