

# Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья (обзор)

А.Л. ЗАКГЕЙМ<sup>1</sup>

ФГБУН «Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН», Санкт-Петербург

## Аннотация

Рассматривается широкий круг вопросов по разработке и применению светодиодных систем освещения. Анализируется реализованный и прогнозируемый на ближайшие годы уровень энергоэффективности, связанные с ним экономические выгоды и улучшение экологической обстановки. Особое внимание уделяется вопросам качества освещения светодиодами (ОС СД) как с точки зрения зрительного восприятия, так и влияния на психофизиологическое состояние и общее физическое здоровье человека. Обсуждаются новые возможности создания комфортной и благоприятной для жизнедеятельности человека световой среды при использовании динамически управляемого «интеллектуального» освещения. Приводятся разные мнения не только о преи-

муществах светодиодных источников света (СД ИС), но и о возможных ограничениях их применения с позиций фотобиологической безопасности.

**Ключевые слова:** светодиод (СД), энергоэффективность, качество света, световая отдача, интеллектуальный свет, зрительное восприятие, фотобиологическая безопасность, люминофор, спектр излучения, индекс цветопередачи, RGB.

## 1. Введение

К числу крупных научно-технических достижений, оказавших значительное влияние на качество жизни людей, в ближайшее время, вероятно, добавится ОС СД (или, как принято в англоязычной литературе, *solid-state lighting* – SSL). На сегодня СД ИС рассматриваются в качестве главных кандидатов на роль ИС будущего. Прогресс в области ОС СД определяется как технологическими достижениями, позволившими за 10 лет на порядок по-

высить КПД и световую отдачу ( $\eta_v$ ), так и беспрецедентными темпами роста объёма производства: 31–41 % в год при ускоренном внедрении научно-технологических достижений в серийные приборы [1, 2]. У ведущих производителей СД ИС, таких как *Cree*, *Philips Lumileds*, *Osram Optosemiconductors*, рекордные результаты, продемонстрированные в лаборатории, за 15–18 мес переносятся на коммерческие изделия. Во многих отношениях «светодиодная революция» – не частый в истории техники случай, когда действительность превосходит наиболее оптимистичные прогнозы (свежи обратные примеры: оптический компьютер, высокотемпературная сверхпроводимость). В начале 2000-х эксперты относили к предельным возможностям белых СД выход на уровень  $\eta_v$  порядка 60–80 лм/Вт. А сейчас уже доступны серийные СД с  $\eta_v \approx 150$ –160 лм/Вт [3], а рекордные лабораторные образцы достигли  $\eta_v$  в 250 лм/Вт и чуть более [4], что приближается к теоретическому пределу для белых люминофорных СД – 283 лм/Вт [5]<sup>2</sup>.

По темпам и масштабам экспансии ОС СД сопоставимо с недавним вторжением Интернета или сотовой связи, хотя его влияние на качество жизни людей не представляется столь одно-

<sup>2</sup> Значение теоретического предела зависит от качества света: коррелированной цветовой температуры ( $T_c$ ) и качества цветопередачи. Мы далее коснёмся этого вопроса более детально.

<sup>1</sup> E-mail: zakgeim@mail.ioffe.ru  
Список литературы (96 названий) депонирован в редакции.

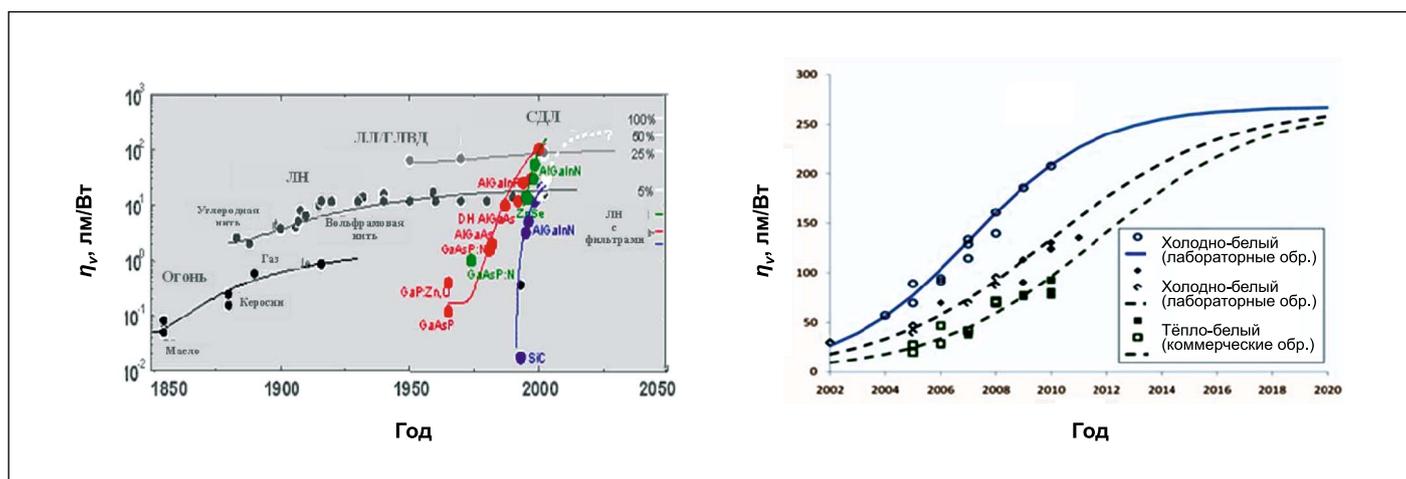


Рис. 1. Эволюция световой отдачи источников света ( $\eta_v$ ) от масляных до светодиодных: а – взгляд на 150 лет назад (историческая ретроспектива); б – взгляд на 10 лет вперёд (прогнозируемое будущее). ЛН – лампа накаливания общего назначения, ЛЛ – люминесцентная лампа, РЛВД – разрядная лампа ВД, СДЛ – светодиодный источник света (в т.ч. СД-лампа). Различные по цвету кривые обозначают полупроводниковые соединения, из которых изготовлены СД (условно соответствуют цвету свечения СД) [11]

значным. При этом ОС СД даёт возможность сравнительно простого, динамичного управления фото- и колориметрическими характеристиками излучения. Это качество, изначально названное «умным светом» (*smart light*) [6], а сейчас частенько называемое «настраиваемым», «регулируемым», «персонализированным» светом, расширяет функциональные возможности осветительных приборов, но главное – открывает перспективы создания варьированной эргономичной световой среды, в отличие от сегодняшней – неуправляемой и статичной. ОС СД по ряду показателей должно стать благоприятным для жизнедеятельности и здоровья человека, но в каких-то проявлениях может оказываться и вредным. В настоящее время в сферу интенсивных исследований и анализа возможностей (и ограничений) ОС СД вовлечены государственные учреждения, такие как Минэнерго США, общественные организации типа *Illuminating Engineering Society of North America (IESNA)*, *Alliance for Solid-State Illumination and Technologies (ASSIST)*, *International Dark-Sky Assosiation (IDA)*, крупнейшие фирмы-производители *Philips-Lumileds*, *Osram*, *Cree*, *Nichia* и др., а также ряд НИИ, университетов, лабораторий: *Lighting Research Center at Rensselaer Polytechnic Institute (LRC RPI)*, *National Institute of Standards and Technology (NIST)*, *American National Standard Institute (ANSI)* и др. Ежегодное количество публикаций по СД-тематике исчисляется сотнями, число международных конференций – десятками.

Огромные перспективы ОС СД вряд ли уже будут кем-то оспариваться, однако существует широкий разброс мнений по оптимальным условиям его применения, а также медико-биологическим аспектам воздействия излучения СД на зрение, психофизиологическое состояние и общее физическое здоровье человека. Опасения вызывают последствия длительных экспозиций, суммарный результат которых может проявляться лишь через годы. Спектр мнений по СД-тематике представлен в журналах разного профиля: научно-технических, экономических и медицинских, а также в СМИ. В данном обзоре мы попытаемся охватить соответствующие наиболее актуальные вопросы с учётом разных точек зрения.

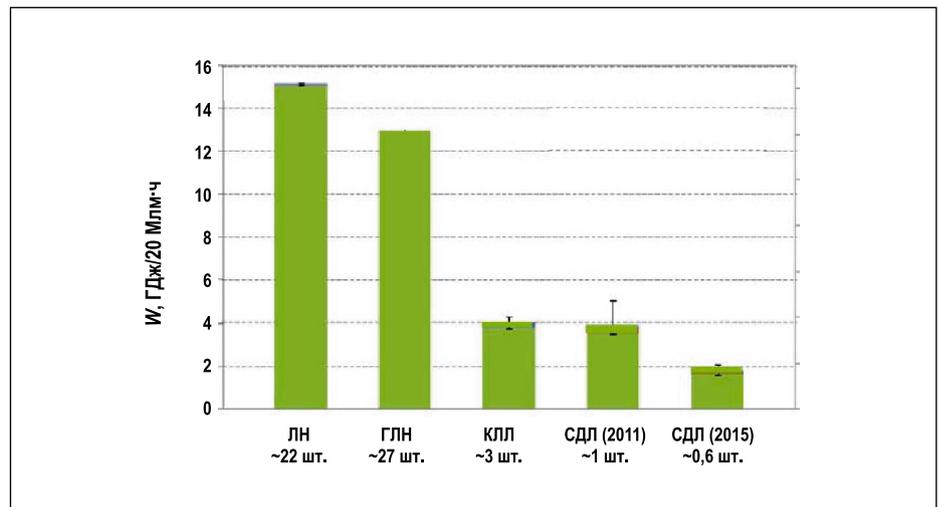


Рис. 2. Электроэнергия  $W$ , расходуемая современными ЛН, КЛЛ и СДЛ (образцов 2011 и 2015 гг.) для производства 20 Млм·ч световой энергии [17]

## 2. Освещение светодиодами: от энергетической эффективности к экономической выгоде и экологической безопасности

Приход СД в освещение стал возможен в итоге многолетнего развития идей и технологий создания полупроводниковых многокомпонентных соединений – гетероструктур, на основе которых получают наиболее эффективные полупроводниковые излучатели: инжекционные лазеры и СД [7–9]. Для этого приходом важными стали два научно-технологических результата, достигнутые к середине 1990-х:

- Благодаря освоению нитридных,  $AlGaInN$ , и фосфидных,  $AllnGaP$ , гетероструктур СД «перекрыли» практически весь видимый спектральный диапазон<sup>3</sup>.

- По КПД и  $\eta_v$  СД превзошли уровень широко распространенных ЛН и ГЛН, демонстрируя тенденцию быстрого дальнейшего роста.

В литературе имеется множество вариантов диаграмм, иллюстрирующих эволюцию  $\eta_v$  СД в сравнении с другими ИС. На рис. 1, заимствованном из [11] и слегка адаптированном с учётом последних достижений, приведены генеалогическое древо ИС и графики роста  $\eta_v$  различных его ветвей за последние 150 лет. Вид кривых свидетельствует о прекращении ро-

ста  $\eta_v$  «традиционных» ламп всех типов на фоне 10–20-кратного роста  $\eta_v$  СД в течение последних десятилетий (по закону Хейтца). В итоге в 2011 г. рекордные значения  $\eta_v$  лабораторных образцов СД составили 230–260 лм/Вт [4, 12]. Для нашего рассмотрения больший интерес имеет взгляд в будущее, чем в прошлое, представленный на рис. 2. По прогнозам Минэнерго США [13], к 2020 г. коммерческие белые СД выйдут по  $\eta_v$  на 250 и 230 лм/Вт для холодного- и тёпло-белых вариантов соответственно. В то же время анализ потенциала роста традиционных ламповых ИС [14] даёт весьма скромные цифры. Так, для ЛН и ЛЛ возможное повышение  $\eta_v$  к 2030 г. оценивается лишь в 5%, а РЛВД – в 15%. Таким образом, превосходство СД по  $\eta_v$  перед ЛН достигнет 10–15 крат, перед ЛЛ и КЛЛ – 3–4-х и перед РЛВД – примерно 2-х<sup>4</sup>.

Что значат преимущества по  $\eta_v$  в финансовом (деньги), натуральном (нефть, газ, обогащённый уран и прочие материалы, идущие на производство электроэнергии) и экологическом (снижение выбросов вредных веществ, отказ от строительства новых электростанций, сетей и др.) отношениях? О масштабности вопроса свидетельствует использование для освещения 19–22% от всей производимой в мире электроэнергии. В абсо-

<sup>3</sup> Известна проблема «зелёной долины» – низкой эффективности СД с длиной волны 530–560 нм, но она не является критической для ИС общего назначения и, по-видимому, вскоре будет решена [10].

<sup>4</sup> На самом деле не всё так однозначно: КПД СД зависит от уровня возбуждения и может заметно снижаться при выходе на высокие яркости СД. Сегодня это одна из главных физических проблем создания мощных СД [15].

Таблица 1 [17]

Вид источников света	$P_{el}$ , Вт	$\Phi_v$ , лм	$\tau$ , ч	$C_{pr}$ , \$
ЛН	60	900	1000	0,5
КЛЛ	15	900	8500	5
Светодиодные образца 2011 г. (в т.ч. СДЛ)	12,5	800	25000	50
Светодиодные образца 2015 г. (в т.ч. СДЛ)	5,8	800	40000	20

Таблица 2

Параметры		Год			
		2010	2012	2015	2020
Холодно-белые светодиоды ( $T_{\text{и}} \approx 5000 \text{ K}$ )	$\eta_v$ , лм/Вт	134	176	224	258
	Удельная стоимость светового потока, \$/кЛм	13	6	2	1
Тёпло-белые светодиоды ( $T_{\text{и}} \approx 3000 \text{ K}$ )	$\eta_v$ , лм/Вт	96	141	202	253
	Удельная стоимость светового потока, \$/кЛм	18	7,5	2,2	1

лютных цифрах на 2010 г. – это около 3500 ТВт·ч, или в денежном выражении – около \$350 млрд. [14] (больше годового бюджета России).

Корректный переход от  $\eta_v$  к удельной стоимости генерируемой световой энергии  $C$  может быть выполнен, согласно [16], по выражению<sup>5</sup>

$$C = [(C_{pr} + P_m) / \tau + P_{el} \cdot C_{el}] / \Phi_v, \quad (1)$$

\$/кЛм·ч,

где  $\Phi_v$  – световой поток ИС, кЛм;  $C_{pr}$  – цена ИС при покупке (первичная);  $P_m$  – эксплуатационные расходы (на обслуживание и замену выходящих из строя приборов), \$;

$P_{el}$  – потребляемая электрическая мощность, кВт;  $C_{el}$  – стоимость электроэнергии, \$/кВт·ч;  $\tau$  – срок службы, ч.

Несложный подсчёт по данным табл. 1 показывает, что удельная стоимость светового потока при  $\Phi_v = 800$ –900 лм (например) для ЛН, КЛЛ и СДЛ, соответственно, равна около 0,55; 5,5 и 60 \$/кЛм. По экспертным оценкам, несмотря на рост  $\eta_v$  и падение  $C_{pr}$  при росте объёмов производства,  $C$  для СДЛ останется выше, чем у ЛН, даже к 2020 г. (табл. 2 [13]). Однако, как следует из (1),  $C_{pr}$  даже

дорогих СДЛ вносит лишь малый вклад в конечную стоимость световой энергии, получаемой за весь ресурс работы прибора. На главные роли, по рис. 2<sup>6</sup>, выходят  $P_{el}$  и  $\tau$ . Как можно рассчитать, согласно рис. 2, при  $C_{el} = 0,1$  \$/кВт·ч стоимость только «электрической» составляющей произведённых 20 Млм·ч составит для ЛН, КЛЛ, СДЛ (2011 г.) и СДЛ (2015 г.), соответственно, 420, 100, 90 и 60 \$. Это сравнение говорит о том, что уже и сейчас применение СДЛ выгоднее, чем всех «традиционных» ламп. Разумеется, это преимущество будет нарастать по мере повышения  $\eta_v$  и падения  $C$  СДЛ (табл. 2) при неизбежном росте  $C_{el}$ . Оценка на перспективу в 15 лет приведена в [18] и сжато, графически, – на рис. 3: для СДЛ  $C$  асимптотически приближается к 0,3 \$/Млм·ч, для КЛЛ вряд ли упадёт ниже 1,2 \$/Млм·ч, а для ЛН «замрёт» на 8–10 \$/Млм·ч. Нельзя не отметить ещё один аспект экономии электроэнергии, связанный с применением СДЛ. Их работа легко про-

<sup>6</sup> Обеспечение ресурса работы СДЛ ( $\tau$ ) в 25000 ч требует использования периодически заменяемых 22–25-ти ЛН и 3-х КЛЛ, но главное – стоимость потреблённой электроэнергии в десятки раз превосходит стоимость ламп. (На рис. 2 энергия приведена в МДж, при этом 1 кВт·ч  $\approx$  3,6 МДж.)

<sup>5</sup>  $\eta_v$  представлено в выражении через  $P_{el}$  и  $\Phi_v$ .

граммируется и управляется датчиками освещённости, что позволяет оптимизировать освещение, включая/выключая или регулируя его интенсивность в данный момент и в данном месте.

Сегодня большой общественный интерес вызывают не сэкономленные деньги, которые для большинства абстрактны, когда счёт идёт на миллиарды и триллионы, а последствия новых технологий для окружающей среды, возможности улучшения экологической обстановки и, в конце концов, образа жизни людей. В ряде работ исследуется влияние ОС СД на экологию [14, 17–20]. Алгоритм анализа здесь таков: от сэкономленного энергопотребления к сокращению сжигания углеводородов, уменьшению вредных выбросов в атмосферу, отказу от нового строительства электростанций и передающих сетей и другой инфраструктуры энергетики. Также учитываются преимущества безвредной утилизации СДЛ по сравнению с ртутьсодержащими лампами. По официальным оценкам [14], в США к 2030 г. до 76 % световой энергии будет производиться СД ИС, что сократит потребление электроэнергии примерно на 300 ТВт·ч. При нынешних  $C_{el}$  полученная экономия составит порядка \$30 млрд. При этом общая экономия электроэнергии за период 2010–2030 гг. составит примерно 2700 ТВт·ч, или, соответственно, порядка \$270 млрд., а сокращение выбросов  $CO_2$  – 1,8 Гт. С учётом того, что на США приходится примерно четверть мирового потребления электроэнергии, нетрудно перейти к глобальным оценкам.

### 3. Качество света светодиодов: зрительный и биологический аспекты

Действие света на человеческий организм, естественно, включает зрительное восприятие, воздействие на психофизиологическое и эмоциональное состояние, а также возможное поражение элементов глаза и кожи и отдалённые последствия для физического здоровья вообще (фотобиологическая опасность). Приход СД ИС в освещение дал новый толчок исследованиям по качеству освещения [21], актуальность которых усиливается по крайней мере тремя обстоятельствами:

- Люди проводят всё больше времени, включая светлую часть суток, при искусственном освещении, что обусловлено расширяющимся строительством безоконных производственных и офисных помещений.

- СД ИС имеют свою специфику, отличающую их от всех типов традиционных ИС. Так, для наиболее распространённых сейчас белых люминофорных СД характерно наличие сильной голубой полосы с пиковой длиной волны  $\lambda_{max} \approx 450-460$  нм и дефицит излучения в красной области (630–750 нм). Использование же белых СД на основе принципа цвето-смещения (RGB) впервые в практике освещения позволяет реализовывать динамичное управление спектром (цветом) излучения – «умный свет» – с новыми возможностями влияния на биологические процессы в организме человека (животных, растений).

- Обнаружен неизвестный ранее тип глазных рецепторов, не участвующих в зрительном процессе, но синхронизирующих функционирование организма с состоянием световой среды – канал биологических часов [22–25]. Случайное временное совпадение этого открытия (начало 2000-х) с появлением СД ИС с управляемыми характеристиками открыло широкие возможности для «тонких» исследований биологического действия света.

Отметим, что если в вопросе энергоэффективности и экономических выгод, которые сулит ОС СД, существует большее или меньшее согласие, то по качеству и последствиям его применения ведётся оживлённая дискуссия [26, 27]. Вкратце рассмотрим составляющие качества освещения применительно к современным СД ИС, опираясь на рис. 4, где показаны типичные относительные спектры ряда ИС на фоне кривых  $V(\lambda)$  и относительного спектра биологического действия  $B(\lambda)$  [23–25], о котором более подробно см. ниже.

**1) Фотобиологическая безопасность.** Излучение СД ИС, как любых других ИС, при высокой интенсивности может поражать части глаза (роговицу, хрусталик и сетчатку) и кожу. Хотя повреждения могут носить фотохимический и термический характер, для СД ИС видимого диапазона существенен лишь первый вариант.

При проверке фотобиологической безопасности ИС необходимо учитывать два параметра: облучённость

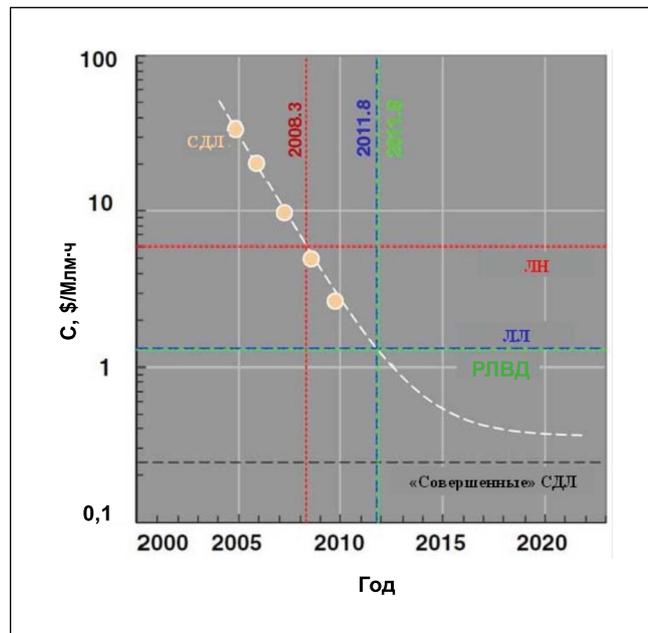


Рис. 3. Эволюция стоимости световой энергии  $C$  для СД-источников света (СДЛ): кружки – данные по коммерческим приборам с  $R_a = 85$  и  $T_c = 3800$  К за 2005–2009 гг.; белая кривая – экстраполяция реальных значений для СДЛ на ближайшие годы; вертикальные пунктирные цветные линии – годы достижения паритета СДЛ с традиционными источниками света. Горизонтальные пунктирные цветные линии – прогнозируемые минимальные значения  $C$  для различных источников света [18]

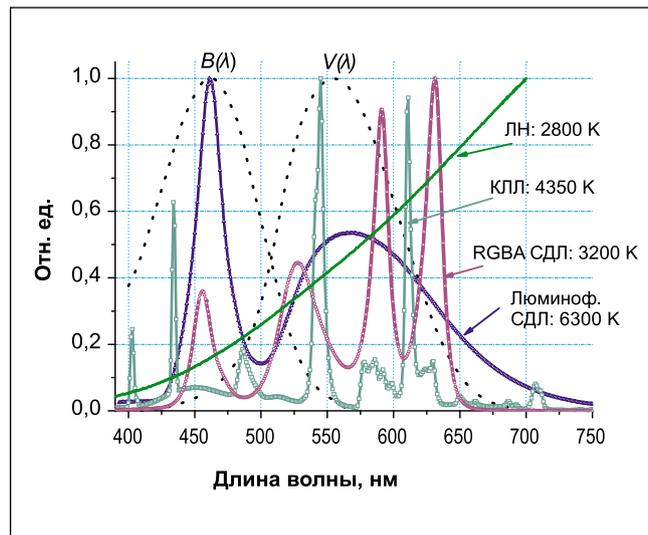


Рис. 4. Спектры излучения 4-цветного (RGBA) СД ( $T_c=3200$  К), люминофорного СД (6300 К), КЛЛ (4350 К) и ЛН (2800 К) на фоне кривых  $V(\lambda)$  и  $B(\lambda)$

(Вт/м<sup>2</sup>) от ИС на зрачке глаза и энергетическую яркость (Вт/ (м<sup>2</sup>·ср)) ИС.

Как ни странно, вначале по нормам фотобиологической безопасности СД были отнесены к лазерному стандарту IEC60825, содержащему 4 группы риска – от полной безопасности до мгновенного поражения. Сделано это было скорее от «родства» по происхождению и принципу работы, чем от близости излучательных характеристик и, тем более, функционального назначения. Сейчас ситуация изменилась, и безопасное применение СД регламентируется общим стандартом на ИС IEC62471–2006 («Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems»), согласно которому полная безопасность применения гарантирована лишь для слабоярких ИС: с яркостью менее 104 кд/м<sup>2</sup>. Со-

временные высокоомощные СД, используемые для освещения, могут во много раз превосходить этот уровень, что требует контроля за параметрами ОП с ними и соответствующих рекомендаций по безопасной эксплуатации. Достаточно детально вопросы фотобиологической безопасности СД ИС рассматриваются в недавно появившейся серии статей [29–31].

Несмотря на наличие стандарта IEC62471–2006 и объективных методов измерения освещённости и яркости, вопрос о рисках повреждения глаз излучением СД нельзя считать закрытым. Причина – в особенности спектральных характеристик белых люминофорных СД с их синего-голубой полосой излучения (450–470 нм), особенно ярко выраженной при высоких

$T_y$  (5000–6000 К) – см. рис. 4. Но нормы стандарта касаются интегральных характеристик излучения, без учёта специфики спектра. В то же время офтальмологические исследования свидетельствуют: пороги фотохимического разрушения сетчатки в синеголубой области спектра в 50–100 раз ниже, чем в зелёно-красной (500–700 нм) [32]. На особую опасность повреждения сетчатки синеголубой компонентой излучения СД у детей и молодых людей недавно было указано в работах [33, 34, 49]. Поскольку последствия повреждения сетчатки носят накопительный характер и могут проявляться через годы, следует проявлять особую осторожность и предусмотрительность при освещении детских учреждений холоднобелыми СД ИС.

**2) Биологический эквивалент излучения.** Со второй половины 2000-х гг. особое внимание светотехнического и медицинского сообществ стала привлекать тема незрительного воздействия света на организм и его последствия для здоровья [34–36]. Возникновение этой проблемы было связано с открытием незрительного канала восприятия света на основе меланопсинсодержащих ганглиозных клеток сетчатки (МГКС) [22–25]. Эти клетки, составляющие лишь 2% от общего числа колбочек и палочек, вовлечены в некоторые нервные реакции на свет, такие как рефлекторное сужение зрачка<sup>7</sup>. Но, что наиболее важно, сигналы от них поступают непосредственно в эпифиз – нейроэндокринный орган, регулирующий секрецию гормона мелатонина в кровь и передающий таким путём информацию о световом режиме окружающей среды внутрь организма. В простейшем приближении, действие биологического канала заключается в том, что сильное освещение подавляет секрецию мелатонина, вызывая состояние активности, а слабое (или нулевое) способствует выработке этого гормона, приводя к состоянию расслабления и сна (к примеру, разница в концентрации мелатонина в крови спящего и бодрствующего ребенка достигает 40 раз [38]). Такая синхронизация состояния организма с окру-

жающей световой средой – биологические часы, очевидно, имеет эволюционные корни: развитие жизни на Земле в условиях суточной цикличности освещения.

Собственно влияние мелатонина на физиологические процессы и здоровье человека являлось предметом всесторонних медицинских исследований вне связи с искусственным освещением, тем более с СД ИС [38–40]. Было установлено, что отклонения от естественных суточных колебаний содержания мелатонина в крови, сложившихся в ходе биологической эволюции, не только нарушают психическое состояние (бессонница, депрессия, тревога), но, накапливаясь в течение длительного времени, ведут к тяжёлым последствиям для общего здоровья человека: преждевременному старению, потере репродуктивной функции, эндокринным заболеваниям, развитию рака груди и др. Новый всплеск интереса к «мелатониновой» проблеме (или угрозе) совпал с открытием незрительного канала восприятия света и определением соответствующего *относительного спектра биологического (подавление секреции мелатонина) действия  $V(\lambda)$*  – рис. 4 [23, 25]. Как видно из рис. 4, область высоких значений  $V(\lambda)$  лежит в синеголубой области спектра белых люминофорных СД. Этот факт привлек большое внимание организаций, связанных с гигиеническими аспектами освещения, включая Минэнерго США, опубликовавшего специальный документ [41], а также разработчиков СД ИС. Суть проблемы заключается в том, что как раз в вечернее и ночное время, когда концентрация мелатонина в крови должна расти, включаются искусственные ИС, действующие противоположно. В ряде работ определялся биологический эквивалент излучения разных ИС, дающих одинаковый зрительный эффект [34, 36, 42–44]. Для расчёта биологического эквивалента излучения используется следующий подход<sup>8</sup>:

Вначале спектральные распределения исследуемых ИС нормируются,  $\Phi_e(\lambda)_{i, norm}$ , из условия одинакового светового потока, определяемого интегралом

$$\Phi_{v,i} = 683 \int_{380}^{770} \Phi_e(\lambda)_{i, norm} V(\lambda) d\lambda = const.$$

Далее рассчитывается соответствующий биологический эквивалент  $BioEq_i$ , равный интегралу перекрытия нормированного спектрального распределения  $\Phi_e(\lambda)_{i, norm}$  с кривой  $B(\lambda)$ :

$$BioEq_i = \int_{380}^{770} \Phi_e(\lambda)_{i, norm} B(\lambda) d\lambda.$$

В табл. 3 приведены некоторые результаты расчёта  $BioEq_i$  ИС разного типа, заимствованные из [44]. В ней  $RGBA$  (Red-Green-Blue-Amber) обозначает смешение излучений четырёх монохромных кристаллов с  $\lambda_{max}=630, 530, 460$  и  $595$  нм соответственно, а  $RGBW_c$  – трёх монохромных кристаллов с  $\lambda_{max}=630, 530$  и  $460$  и люминофорного СД холоднобелого ( $W_c$ ) света ( $T_y \approx 6300$  К) [44, 46–48].

Как следует из табл. 3,  $BioEq_i$  СД ИС (как люминофорных, так и на основе цветосмешения) с низкой  $T_y$  (1800–2700 К) даже меньше, чем у ЛН. При этом общий индекс цветопередачи  $R_a$  в варианте  $RGBA$  может быть достаточно высок:  $>90$ . Для СД ИС нейтрально-белого света ( $T_y = 3200–4500$  К) характерны примерно в 1,2–1,5 раза большие  $BioEq_i$ , чем у обычных ЛН.

В то же время заметно выделяются степень биологической активности ( $BioEq_i = 230–310\%$ ) СД ИС с  $T_y > 6000$  К. Это коррелирует с данными работ [34, 36, 43, 51], но выводы о реальной опасности освещения, «перегруженного» синеголубой составляющей, значительно разнятся. Если СД ИС с  $T_y = 2700–3000$  К опасений не вызывают, то освещение холоднобелыми люминофорными СД, по мнению некоторых исследователей, ведёт к 5-кратному снижению содержания мелатонина в крови по сравнению, например, с освещением НЛВД, и следует ввести тотальный запрет на вечерне-ночное освещение ИС с заметной долей излучения на длинах волн короче 540 нм. При этом главная опасность, согласно [36, 50], состоит в повышенном риске заболеть раком груди. Вместе с тем существуют другие данные, свидетельствующие о том, что важны не столько спек-

<sup>7</sup> По последним данным, МГКС принимают некоторое участие и в зрительном процессе [37].

<sup>8</sup> В работе [45] сообщается о создании «люксметра», скорректированного под  $B(\lambda)$ .

тральные характеристики ИС, сколько длительность экспозиции и уровень освещения [36, 42, 54]. Утверждается, что, при умеренных освещённостях, час пребывания под холодным светом от люминофорного СД ИС снижает концентрацию мелатонина в крови на 3–8% (эффект меньше, чем от телевизионного просмотра хоккейного матча).

Неопределённость в медицинских оценках сказывается и на документах организаций, занимающихся вопросами регламентации освещения: *IDA*, *IESNA*, *ASSIST* и др. Так, *IDA* рекомендовано не использовать освещение холодно-белыми СД в тёмное время суток (в основном это отнесено к дорожному освещению) [52, 53], а *ASSIST* занимает менее радикальную позицию, полагая, что при освещённостях, типичных для дорожного или архитектурного освещения, риска для здоровья нет [36, 42]. Бесспорной только всеми признаётся необходимость дальнейших медико-биологических исследований.

С появлением СД ИС большой интерес привлекла концепция светодинамического (изменяемого по спектрально-цветовым и яркостным характеристикам) освещения как безмедикаментозного способа воздействия на психофизиологическое и эмоциональное состояние человека. Несмотря на многолетнюю историю [54–57], именно появление ОС СД переводит вопрос в практическую плоскость. В последние годы в НТЦ микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН (Санкт-Петербург) совместно с Центром авиакосмической медицины (Москва) и НИПНИ им. В.М. Бехтерева (Санкт-Петербург) были разработаны аппаратно-программные комплексы, сочетающие динамически управляемый полихромный СД ИС и датчики, регистрирующие при варьируемом световом воздействии показатели электрической активности мозга (электроэнцефалограмму, ЭЭГ), и уровень постоянных потенциалов головного мозга, УПП), сердечную активность (частоту сердечных сокращений, ЧСС, и артериальное давление, АД), частоту дыхания, скорость выполнения специальных тестов и другие параметры, дающие комплексную оценку психофизиологического и функционального состояния человека [46–48]. Управление све-

Вид источников света	$\Phi_v$ , лм	$T_u$ , К	$R_a$	BioEq, %
ЛН	100	2800	99.8	100
КЛЛ	100	2860	80	83
		4350	79	158
НЛВД	100	–	–	52
Светодиодные с люминофором	100	2698	81	87
		3198	88	114
		6379	73	231
Светодиодные RGBA	100	2500	91	74
		3200	93	115
		4500	93	168
		6500	93	206
		10000	94	232
Светодиодные RGBW <sub>c</sub>	100	1800	54	56
		2500	57	83
		4500	73	180
		6500	88	247
		10000	86	309

том (интенсивность и спектральный состав) осуществляется с удалённого компьютера с использованием разработанного программного обеспечения. Соответствующий интерфейс позволяет задавать цветовые характеристики в количественном (координаты цветности,  $T_u$ ) или качественном (восход, полдень и т. п.) представлениях, а также изменять их во времени по заданному алгоритму (рис. 5). Главными задачами исследований были коррекция психофизиологического состояния человека с помощью управляемого светового воздействия, что особенно важно для персонала, работающего в условиях экстремальных психологических нагрузок (авиадиспетчеры, операторы на объектах повышенной опасности, экипажи космических кораблей и подводных лодок, сотрудники МЧС и др.) [58] и светотерапия ряда заболеваний (сезонная депрессия, расстройство сна и др.). Проведённые к настоящему моменту исследования позволили установить следующее [59–61]:

- Белый свет ИС с  $T_u=3800, 4800$  и  $7000$  К не оказывает значимого влияния на спектральные характеристики большинства основных ритмов ЭЭГ и, соответственно, достаточно нейтрален, а свет с низкой  $T_u$  (1700

К) и, в большей степени, с высокой (10000 К), напротив, физиологически активен, так как приводит к изменениям спектральной мощности  $\alpha$ -,  $\theta$ - и  $\delta$ -ритмов ЭЭГ.

- Существуют два основных типа действия света при определённом алгоритме изменения  $T_u$  – релаксирующее и активирующее. Полученные данные позволяют оптимизировать освещение для различных условий труда или отдыха, а также использовать управляемые СД ИС для индивидуальной коррекции психофизиологического состояния человека в сторону активации и концентрации внимания или расслабления и отдыха.

Одним из очевидных возможных применений динамического освещения является имитация в помещениях естественного, отвечающего биологическим циклам, света с плавным изменением  $T_u$  в течение дня от 1800–2500 К (рассвет) к 4000–6000 К (середина дня) и снова к 2500–1800 К (закат). Практическая реализация этого может быть выполнена достаточно просто: с задающим датчиком цветности, помещённым снаружи или по соответствующей программе [62]. О положительном влиянии на выздоровление пациентов кардиологического отделения освещения, прибли-

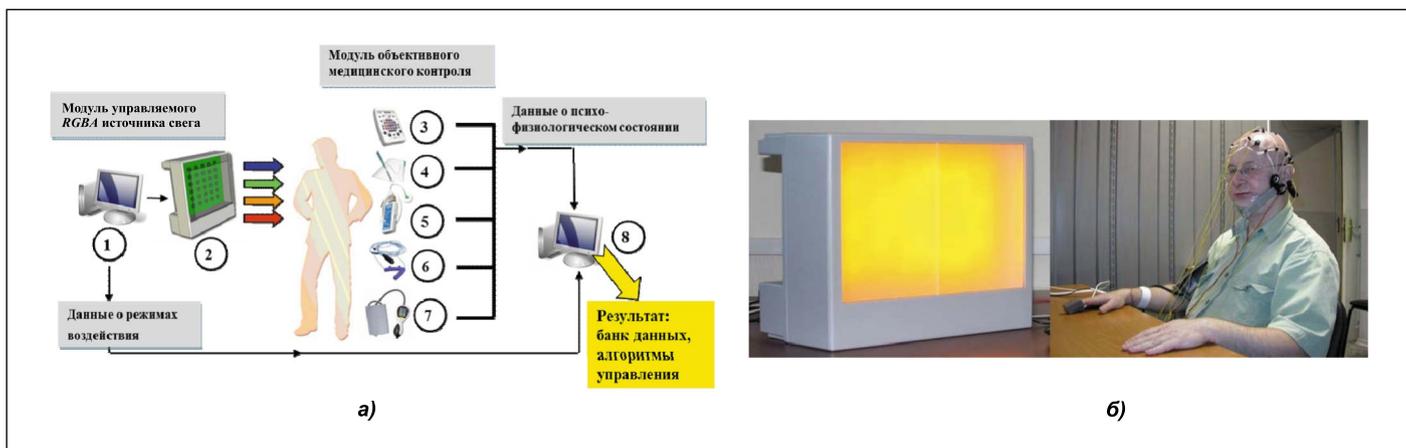


Рис. 5. Блок-схема аппаратно-программного комплекса по исследованию и коррекции психофизиологического состояния человека с помощью интеллектуального света (а) и текущий момент эксперимента – исследуемый человек-оператор при освещении «восход солнца» (б): 1, 8 – компьютеры управления и обработки данных, 2 – СД-источник света для цветодинамического освещения, 3 – электроэнцефалограф, 4 – психологические тесты, 5 – электрокардиограф, 6 – датчик частоты дыхания, 7 – датчик артериального давления

жённому к естественному, недавно сообщалось в публикации [63]. С другой стороны, иногда бывает полезно сдвигать спектр искусственного освещения утром в голубую (дневную) область для ускоренного «просыпания» студентов и активизации их внимания [64]. В общем, интеллектуальные осветительные установки с СД открывают широкие возможности персонализации освещения с учётом личных предпочтений, возраста, рода занятий человека и т. д., что подтверждается ростом числа работ на эту тему [65–67]. Специально подобранные условия освещения могут значительно улучшать общее самочувствие людей в течение всего дня, стабилизировать естественную циркадную ритмику «сон–бодрствование», улучшать познавательный и психоментальный статусы<sup>9</sup>.

#### 4. Освещение светодиодами и качество зрительного восприятия

Обратимся в заключительной части обзора к основному назначению ОС СД – обеспечению комфортной

зрительной работы и адекватного восприятия освещаемых объектов. Прежде всего это означает получение белого света с широким диапазоном  $T_c$  при высоких индексах цветопередачи: как общего  $R_a$ , так и частных  $R_1$ – $R_{15}$  (8 основных и 7 дополнительных для насыщенных тонов и оттенков цвета насыщенных тонов и оттенков цвета кожи). В силу сравнительной узости спектров электролюминесценции полупроводниковых излучателей, а также многих люминофоров, эта проблема для белых СД достаточно остра и являлась предметом всесторонних исследований с начала 2000-х гг. Как известно, первые и сейчас широко распространённые двухполосные белые люминофорные СД имеют невысокий  $R_a$  (около 70–80), что ограничивает сферу их применения. В своё время потерпела неудачу казавшаяся перспективной попытка использования СД для освещения операционных [69]. Они были отвергнуты хирургами, поскольку не обеспечивали хорошую цветопередачу биологических тканей и их контрастное восприятие. К настоящему времени в повышении  $R_a$  люминофорных СД достигнут значительный прогресс как из-за расширения номенклатуры люминофоров и их комбинирования [70, 71], так и – коррекции спектров дополнительных линиями излучения полупроводниковых кристаллов [72, 73]. Лучшие образцы промышленных люминофорных СД (фирма *Bridgelux*) имеют  $R_a=97$ , при этом важные для воспроизведения оттенков кожи  $R_9$  и  $R_{15}$  достигают 98 [74].

Для другого типа белых СД – мульткристалльных (условное название,

подразумевающее смешение любого количества цветов) главный вопрос состоит в том, сколько и каких исходных цветов необходимо для смешения, чтобы получить лучшее по качеству и экономичности освещение. Вопрос не имеет однозначного решения и упирается в фундаментальное противоречие между количественными и качественными характеристиками белого света: люмен-эквивалентом (ЛЭ) и  $R_a$ . В предельном случае белый свет может быть получен смешением всего двух монохроматических линий: 450 (сине-голубая) и 572 (жёлто-зелёная) нм. При этом достигается наивысший ЛЭ, 430 лм/Вт, но  $R_a$  будет близок к нулю. Основные результаты по оптимизации цветосмешения с учётом компромисса между ЛЭ и  $R_a$  для различных комбинаций СД ( $\lambda_{max}$  и полуширина спектра  $\Delta\lambda_{0,5}$  при гауссовской аппроксимации формы спектра) впервые были получены А. Жукаускасом с сотр. [75–77], а в дальнейшем уточнены и расширены в ряде работ [6, 78–81]. В качестве иллюстрации на рис. 6, а [76] приведены зависимости ЛЭ от  $R_a$ , демонстрирующие предельные значения  $R_a$  или ЛЭ, достижимые для 2-, 3-, 4- и 5-цветных СД-систем, и поле возможного компромисса между этими параметрами. Как видим, в случае типичных спектров СД, оптимальной является 4-цветная система с выходом на значения  $R_a$  до 95. Добавление 5-й составляющей уже избыточно. Взаимосвязь ЛЭ и  $R_a$  в наглядной форме контурных диаграмм (рис. 6, б) была получена Е.Ф. Шубертом с сотр. [78, 79]. Из них видно, что для 4-цветной

<sup>9</sup> Объективности ради, упомянем и о возможности использования излучения СД в антигуманных целях – в качестве оружия. Так, узконаправленный СД-фонарь – «световой клинок» с излучением, модулированным по цвету и частоте специальным образом в течение нескольких секунд, может парализовать человека, подобно электрошокеру, вызвав состояние, близкое к эпилептическому припадку [68].

Тип светодиодной системы	$T_u, K$							
	2870		3200		5500		10000	
	$R_a$	$\eta_v, \text{лм/Вт}$	$R_a$	$\eta_v, \text{лм/Вт}$	$R_a$	$\eta_v, \text{лм/Вт}$	$R_a$	$\eta_v, \text{лм/Вт}$
RGB	43,8	55,6	46,9	54,7	53,9	52,8	55,5	45,4
RGBW <sub>n</sub>	75,8	88	75,9	87	91,9	88	90,8	78
RGBA	78,8	67,8	79,1	68,2	92,9	62,8	92,3	56,7
RGBW <sub>c</sub>	56,9	98,0	65,1	96	91,7	97	90,7	86

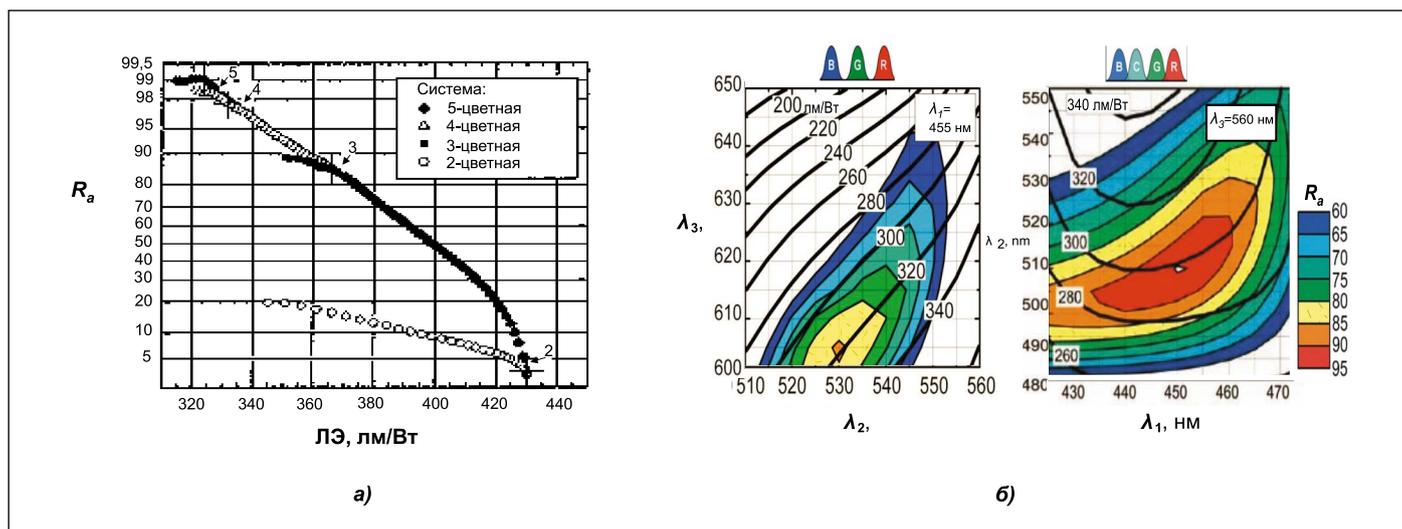


Рис. 6. Зависимости значений  $R_a$  и ЛЭ от спектров излучения СД, входящих в многокристальный источник белого света: а – предельные значения для 2-, 3-, 4- и 5-компонентных источников белого света с  $T_u = 4870 \text{ K}$ ; б – контурные диаграммы, демонстрирующие достижимые значения  $R_a$  и ЛЭ при разных комбинациях длин волн излучения СД, входящих в состав источника белого света

системы (в отличие, от 3-цветной) существует достаточно широкая область комбинаций цветов, для которых  $R_a = 95$ , при ЛЭ порядка 300 лм/Вт. Однако во всех вариантах комбинирования цветов оптимальное сочетание не может исключать глубокий зелёный диапазон 540–560 нм, пока труднодоступный для СД. Поэтому реальные значения  $R_a$  и ЛЭ оказываются ниже расчётных.

Для экспериментальной оценки возможностей синтеза белого света с помощью промышленно выпускаемых мульткристальных полноцветных (полихромных) СД [82–84], нами исследовались несколько вариантов сложения:  $RGB$ ,  $RGBA$ ,  $RGBW_c$  и  $RGBW_n$ , где  $R$  соответствует спектральный диапазон 620–640 нм,  $G$  – 510–530 нм,  $B$  – 450–470 нм,  $A$  – 590–595 нм,  $W_c$  и  $W_n$  – люминофорные СД холодно-белого ( $T_u \approx 6500 \text{ K}$ ) и нейтрально-белого ( $T_u \approx 4000 \text{ K}$ ) света. На рис. 7 для примера показаны спектральные распределения и диаграммы индексов цветопередачи для

трёх вариантов синтеза белого света, соответствующего ИС с  $T_u = 5500 \text{ K}$ . Детальный анализ всех индексов цветопередачи показывает, что 3-цветная ( $RGB$ ) версия на практике мало приемлема для получения полноценного белого света. При этом, помимо низкого значения  $R_a$  (около 50), наблюдается провал частных индексов в красно-пурпурной, красной и зелёной областях спектра ( $R_8$ ,  $R_9$  и  $R_{11}$ ) вплоть до отрицательных значений. Вполне удовлетворительные результаты обеспечивают 4-цветные версии:  $RGBA$  или  $RGBW$ . Обобщённые данные, включающие  $R_a$  и  $\eta_v$  СД ИС на такой основе, сведены в табл. 4 [47, 85]

В последнее время оценка качества цветопередачи для ОС СД подвергается тщательному анализу, а объективность системы индексов цветопередачи вызывает сомнения. Ряд исследований указывает на то, что значение  $R_a$  в недостаточной степени отражает правильность цветовых ощущений, особенно когда речь идёт об излуча-

телях с узкими спектральными компонентами, отвечающими насыщенным цветам. Оценка качества освещения является комплексной задачей и должна, помимо точности воспроизведения цветов, учитывать критерии цветового контраста, т. е. максимального цветового различия объектов [86–88]. Последнее особенно важно в хирургии, медицинской диагностике, при контроле качества продукции и т. д. В Национальном институте стандартов и технологии США ( $NIST$ ) создана специальная установка для проведения подобных исследований, содержащая 22 регулируемых цветовых канала, охватывающих спектральный диапазон 440–640 нм, а значения  $T_u$  синтезируемого белого света могут меняться от 2000 до 10000 K [89]. С помощью этой установки, в частности, идёт отработка, предложенного сотрудниками  $NIST$  В. Дэвисоном и Й. Оно нового метода оценки качества цветопередачи [90–92]. Это модификация метода индексов цветопередачи – метод

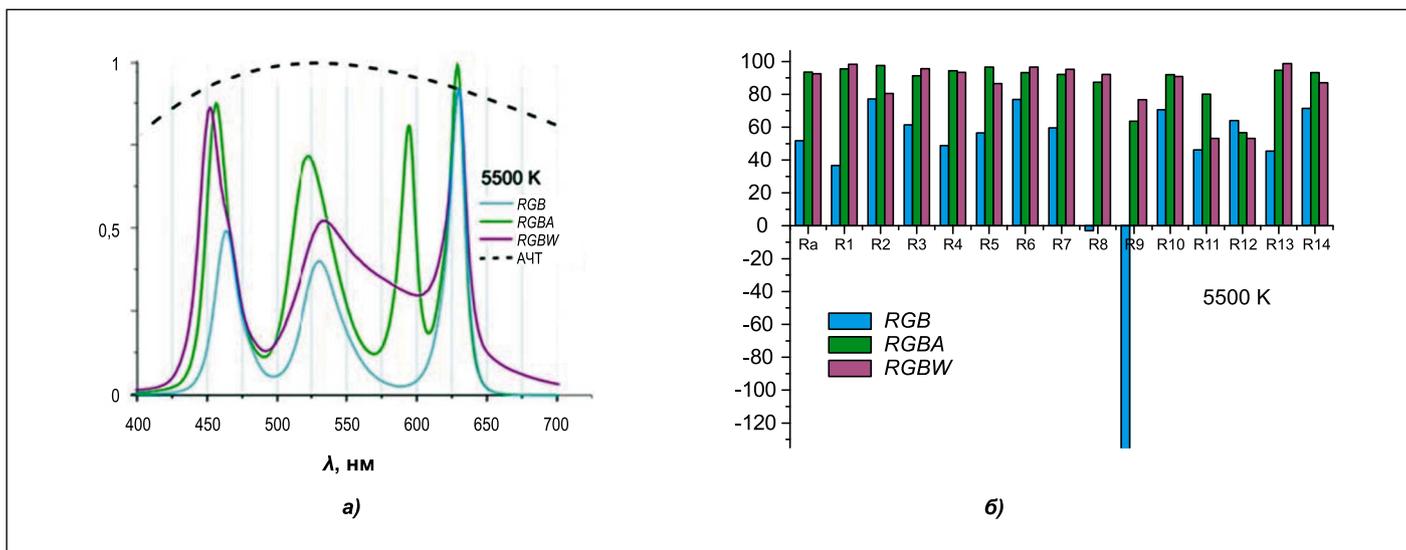


Рис. 7. Относительные спектры излучения для RGB-, RGBA- и RGBW-версий синтеза белого света с  $T_u = 5500$  К на фоне относительного спектра АЧТ (а) и значения  $R_a$ ,  $R_i$  для этих версий (б)

шкалы качества цвета (*Colour Quality Scale – CQS*), который МКО (ТК 1–69) подготавливает как новый стандарт.

Одни из наиболее жёстких требований к качеству искусственного света предъявляет музейное освещение. Его назначение – обеспечивать наилучшее воспроизведение всей цветовой палитры живописи и создавать комфортную световую среду для восприятия предметов искусства (соответствующий эмоциональный настрой). Другой аспект музейного освещения – предотвращение повреждения экспонатов ИК и УФ составляющими излучения СД обеспечивается автоматически. В последнее время ИС на основе люминофорных СД, обычно с сочетанием холодных и тёплых оттенков и достижением высокого  $R_a$ , активно «завоевывают» музейную территорию, включая Лувр, Лондонскую национальную галерею и Амстердамский государственный музей [93–95]. Но полноценное восприятие зрителями всей цветовой гаммы картин требует от ИС не только  $R_a > 95$ , но и соответствующей  $T_u$ . Так, ЛН ( $T_u \approx 2800$  К), хотя и имеют  $R_a \approx 100$ , не позволяют различать тёмно-синие тона просто в силу дефицита соответствующих составляющих спектра излучения. Можно сказать, что в идеале каждая картина должна подсвечиваться тем же светом, при котором она писалась художником. Проще говоря, скажем, не стоит рассматривать при желтоватом свете ЛН лазурный неаполитанский залив, написанный при полуденном солнце. В этом смысле

уникальные возможности открывает ОС СД, но не на люминофорном, а на RGB-принципе с индивидуальной настройкой  $T_u$  для каждой картины. Как уже упоминалось, многокомпонентные RGBA- и RGBW-системы позволяют получать высокие  $R_a$  и легко менять  $T_u$ , которая может подбираться под цветовые особенности освещаемого объекта. Применительно к музеям это означает, что один и тот же СД ИС при освещении разных полотен может перестраиваться ну ту или иную  $T_u$ , обеспечивая «индивидуальное» освещение для наилучшего восприятия красок картины. Кроме того, СД ИС допускают удобную настройку интенсивности и пространственного распределения излучения с возможностью создания специального акцентирующего, контрастного освещения и т.п. Один из примеров конкретной реализации описанного подхода к освещению произведений живописи приведён в [96].

Помимо музейного освещения, актуальным направлением использования управляемых полноцветных (RGB) СД ИС является медицина: диагностика, эндоскопия, микроскопические исследования, освещение операционных и другие области, где требуется максимально контрастная визуализация биологических тканей. Это особенно важно при проведении «ювелирных» хирургических операций на мелких объектах, где требуется точное определение границ здоровой и пораженной тканей или границ между разными биоструктурами, та-

кими как кровеносные сосуды, нервы, мышечная и жировая ткани, а также уверенная дифференциация разных видов нормальных и патологических тканей. Возможность чётко визуализировать доброкачественные, злокачественные и нормальные ткани *in vivo* позволяет значительно увеличить эффективность уже имеющихся методов лечения, а также повысить выявляемость заболеваний на ранних стадиях.

На сегодня в практической медицине применяются ОП с ЛН, ГЛН и ксеноновыми РЛВД. Как правило, они дают белый свет высокого качества ( $R_a > 90$ ,  $T_u \approx 3000$ – $6000$  К), однако в силу физических причин исключена возможность даже минимальной цветовой настройки освещения. В то же время высокого контраста между патологическими и нормальными участками изучаемых тканей можно добиться при использовании избирательного излучения, имея возможность настраивать (подбирать) спектральный состав используемого света. Физическая основа такого подхода заключается в том, что интенсивность отражённого от объекта сигнала определяется интегралом перекрытия функций спектрального распределения энергии излучения ИС и спектрального коэффициента отражения освещаемого предмета. Приводя в соответствие оба параметра, можно добиться максимальной яркости предмета, и, наоборот, путём их рассогласования можно затемнить, сделать изображение практически чёрным. Следовательно, варьируя спектраль-

ный состав освещения, можно получить контрастное изображение одной из тканей на фоне других. Принцип построения управляемого хирургического осветителя, его оптические характеристики и некоторые результаты применения в хирургии приведены в [84].

Кроме рассмотренных выше применений в качестве ИС, динамически управляемый, «умный», свет перспективен и в ряде других областей. Например, в агротехнике изменяемые по специальному алгоритму условия освещения могут стимулировать рост растений, накопление полезных элементов, повышать устойчивость к заболеваниям, т. е. в целом повышать урожайность и скорость созревания плодов. В транспортной сигнализации (светофоры, бортовые огни автомобилей, дорожные знаки и указатели) визуальное восприятие может быть дополнено ВЧ-модулированным световым сигналом, несущим информацию для электронных датчиков, установленных на автомобилях и в системах управления движением. При запрещающем сигнале светофора автомобиль начнёт торможение, даже если невнимательный или лихой водитель не предпримет адекватных действий. Аналогично, в домах силовые электрические сети смогут стать одновременно и каналами передачи информации (телефон, Интернет, телевидение) благодаря ВЧ-модуляции излучения СД ИС (например, СДЛ), воспринимаемой фотоприёмниками соответствующих приборов.

## 5. Заключение

За последнее десятилетие технология ОС СД вышла из детского возраста и достигла определённой зрелости. Об этом свидетельствуют соответствующие значительно возросшие технические параметры, число проводимых НИР и ОКР, масштабы производства и применения. Пройденный путь и достигнутый уровень позволяют сегодня более точно оценивать тенденции развития ОС СД на ближайшее будущее. По-видимому, эпоха «бури и натиска», характерная для предыдущего этапа «светодиодной революции» заканчивается. Основные научные идеи и прорывные технологии реализованы. В дальнейшем стоит ожидать плавного повышения параметров светотехнических приборов с СД

до уровня, приближающегося к теоретическим пределам, и ускоренной (в условиях жёсткой конкуренции) модернизации производственных процессов. Яркими примерами последнего являются рост размеров подложек для изготовления СД-структур от 50,8 до 152,4 мм, переход от дорогих сапфира и карбида кремния к кремнию, повышение производительности эпитаксиальных ростовых машин, в которых за один процесс обеспечивается выпуск миллионов излучающих кристаллов и т. д. Для СД, как приборов микроэлектроники, получаемых по интегрально-групповым технологиям, рост объёмов производства всегда сопровождается быстрым снижением стоимости. В целом, прогнозируемые сегодня на 10–20 лет вперёд технико-экономические параметры СД ИС, процитированные в данном обзоре, с высокой степенью вероятности будут реализованы.

Большая неопределённость существует в отношении социальных и биологических последствий ОС СД. Уникальное отличие СД систем – динамически управляемый свет может кардинально изменить концепцию искусственного освещения, сделав свет, как один из компонентов окружающей среды, максимально благоприятным для работы и отдыха, способствующим психическому и физическому здоровью человека. В этом отношении поиск оптимальных алгоритмов освещения для разных видов деятельности, а также оценка потенциальных угроз и создание абсолютно безопасных систем искусственного освещения, требуют проведения широкого круга медико-биологических исследований.



**Закгейм Александр Львович**, кандидат техн. наук. Окончил в 1972 г. Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина). Заместитель

директора по научной работе ФГБУН «Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН»

Csi

Отчёты Центра  
промышленных  
исследований

(Centre for Industrial Studies – CSIL), Милан, Италия<sup>1</sup>  
[Название (код)/ год  
выпуска/ цена, €, без НДС]

Process of lighting fixtures purchasing in Italy (IT14)/ 2001/ 1000

The lighting fixtures market in Australia (S36)/ 2006/ 1600

The distribution of residential lighting fixtures in Italy (IT34)/ 2007/ 2500

The lighting fixtures market in Turkey (S45)/ 2009/ 1600

The lighting fixtures market in Latin America (S58)/ 2010/ 1800

The lighting fixtures market in Russia (S28)/ 2011/1600

The lighting fixtures market in the Middle East and North Africa (S38)/ 2011/ 1600

The lighting fixtures market in Japan (S37)/ 2011/ 1600

The lighting fixtures market in the United States (S15)/ 2011/ 1600

The world market for outdoor lighting fixtures (W19)/ 2011/ 2000

World trade of lighting fixtures (W15)/ 2011/ 2000

The lighting fixtures market in China (S27)/ 2011/ 1600

The lighting fixtures market in India (S33)/ 2011/ 1600

LEDs and the lighting fixtures worldwide market (S52)/ 2012/ 2000

The European market for lighting fixtures, Part I (EU6)/ 2012/ 2900

The European market for lighting fixtures, Part II (S39)/ 2012/ 1600

<sup>1</sup> CSIL – независимый научно-исследовательский институт, специализирующийся на прикладной экономике, особенно на промышленной конкурентоспособности, малом бизнесе, анализе рынков, оценках и исследованиях регионального развития.