О светодиодных лампах прямой замены

С.И. ЛИШИК, А.А. ПАУТИНО, В.С. ПОСЕДЬКО, Ю.В. ТРОФИМОВ [1], В.И. ЦВИРКО

РНПУП «ЦСОТ НАН Беларуси» и УП «ЦКБ» НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

Аннотация

Рассмотрен современный уровень развития светодиодных ламп прямой замены ламп накаливания. Проанализированы основные научно-технические проблемы, связанные с созданием этих ламп: отвод тепла, светораспределение, электрическое питание и др. Указано наиболее перспективное направление их развития.

Ключевые слова: светодиодная лампа, лампа прямой замены, световая отдача, форм-фактор лампы.

В последние годы, по мере совершенствования светодиодов (СД), появляется всё больше и больше светодиодных ламп, предназначенных для прямой замены ламп накаливания (ЛН), галогенных ЛН, люминесцентных (ЛЛ) и компактных ЛЛ разных форм-факторов [2]. Их английские названия – «LED replacement lamps» или «LED retrofit lamps», что переводится как «светодиодные лампы прямой замены» (СД-ЛПЗ).

В данном сообщении мы рассмотрим лишь состояние и тенденции развития СД-ЛПЗ в форм-факторах осветительных ЛН с напряжением питания 120–230 В (50 Гц).

Итак, рассматриваемые современные СД-ЛПЗ по форм-фактору уже во многом соответствуют заменяемым осветительным ЛН (рис. 1), прежде всего мощностью до 100 Вт.

Примеры заявленных характеристик таких СД-ЛПЗ приведены в табл. 1.

Между тем Минэнерго США вот уже в течение трёх лет силами ряда независимых лабораторий осуществляет программу CALiPER [3] по испытаниям коммерческой светодиодной продукции и публичному освещению их результатов. А последние показывают, в частности, что энергоэкономичность СД-ЛПЗ заметно ниже, чем у одиночных светодиодов, и средняя световая отдача этих ламп, по состоянию на октябрь 2009 г., равнялась 46 лм/Вт [1].

В Республиканском научно-производственном унитарном предприятии «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси» (РНПУП «ЦСОТ НАН Беларуси») были проведены аналогичные испытания ряда образцов СД-ЛПЗ различных производителей (рис. 2). При этом для измерения светового потока ламп использовался сканирующий спектрорадиометр Spectro320 R5 (Instrument Systems, Германия), снабжённый интегрирующей сферой диаметром 500 мм. Результаты этих измерений представлены в табл. 2, из которой следует, что средняя световая отдача указанных образцов 44,7 лм/Вт. Это согласуется с данными Минэнерго США, дополнительно свидетельствуя, что световая отдача коммерческих СД-ЛПЗ их производителями завышается (и, тем самым, завышается мощность заменяемых ЛН, на которую ориентируют потребителей). Если такое положение сохранится и дальше, то скорое достижение крупномасштабного использования СД-ЛПЗ проблематично. Это делает актуальным достижение световой отдачи СД-ЛПЗ в 60 лм/Вт и более.

В этой связи, световая отдача СД-ЛПЗ может быть представлена как

$$\eta_{lamp} = \eta_{LED}\eta_{el}\eta_{op}\eta_{th},$$

где η_{LED} – световая отдача одиночного светодиода при заданной температуре корпуса T_c; η_{el} и η_{op} – коэффициенты эффективности электрической и оптической подсистем СД-ЛПЗ; η_{th} –коэффициент эффективности теплоотвода, который характеризует уменьшение светового потока при повышении температуры корпуса светодиода от T_c до температуры корпуса светодиода внутри работающей лампы. В зависимости от применяемых конструктивных решений три последних коэффициента в этом выражении могут принимать различные значения (табл. 3).

Таким образом, если в СД-ЛПЗ используются светодиоды со световой отдачей 100 лм/Вт, то световая отдача такой лампы может составлять от 32 до 74 лм/Вт, а в среднем – около 53 лм/Вт. Далее рассмотрим каждую подсистему СД-ЛПЗ подробнее.

Известно, что создание СД-ЛПЗ

Рис. 1. Внешний вид светодиодных ламп прямой замены ламп накаливания форм-фактора А: а – Parathom Classic A40 (Osram); б –Master LED NR63 (Philips)

---

[1] По материалам доклада на 3-м Московском международном Форуме «Светодиоды в светотехнике» 11 ноября 2009 г., Москва
E-mail: trofimov@inel.bas-net.by

[2] Форм-фактор (form factor) – стандарт технического изделия, описывающий некоторую совокупность его технических параметров, например форму, размеры, расположение и типы цоколей, требования к напряжениям, токам, световому потоку и прочих параметров. Термин чаще всего употребляется в отношении сложных технических изделий (корпусов компьютеров, сотовых телефонов, ламп и др.).
При этом говорят: «ЛЛ форм-фактора Т8», «ЛН форм-фактора G», «ЛН форм-фактора «миньон», «светодиодная лампа в форм-факторе ЛН G с цоколем Е27», «светодиодная лампа в форм-факторе ЛЛ Т5» и т.д. – Прим. ред.

[3] Commercialy Available LED Product Evaluation and Reporting

требует обеспечения отвода тепла от светодиодов и ЭПРА для них в окружающую среду, что при ограниченности размеров корпуса СД-ЛПЗ предполагает наличие в ней подходящего радиатора в районе цоколя. На последний подаётся небезопасное для пользователя напряжение, и потому необходима изолирующая деталь между радиатором и цоколем, в свою очередь влияющая на габариты СД-ЛПЗ. (Причём низкая потребляемая мощность не оправдывает отсутствия радиатора, т.к. даже индикаторные светодиоды выделяют тепло. На рис. 3 показаны декоративные СД-ЛПЗ, не содержащие радиатор. Срок службы их не превышает 1000 ч.)

Другой подобный пример – СД-ЛПЗ по рис. 2, *а*. Вначале она показала хорошее соответствие между заявленным и измеренным световыми потоками. Однако через 30 мин работы световой поток снизился на 14 %, а пиковая длина волны заметно сместилась вправо (рис. 4). Последнее соответствует росту температуры кристалла на 64 °С [2]. Средняя температура теплорассеивающего элемента лампы после 30 мин работы составила 68,2 °С при температуре окружающего воздуха 24,6 °С.

Проблема отвода тепла особо обостряется при создании мощных СД-ЛПЗ. Так, укрупнение радиатора лампы увеличивает её размеры и массу [4], а его миниатюризация – к перегреву светодиодов со всеми отрицательными последствиями. Поэтому разработка СД-ЛПЗ мощностью более 10 Вт при нынешней энергоэффективности светодиодов и традиционных методах отвода тепла неперспективна.

Срок службы СД-ЛПЗ определяется также температурным режимом работы ЭПРА. Из-за нехватки места его обычно помещают как бы внутрь радиатора. Поэтому коэффициент эффективности электрической подсистемы η_{el} следует оценивать при реальных рабочих температурах в СД-ЛПЗ.

Требование высокого уровня защиты от поражения электрическим током (минимум класса II) дополнительно усложняет конструкцию и снижает функциональность ЭПРА. Как уже

Рис. 2. Внешний вид светодиодных ламп по табл. 2

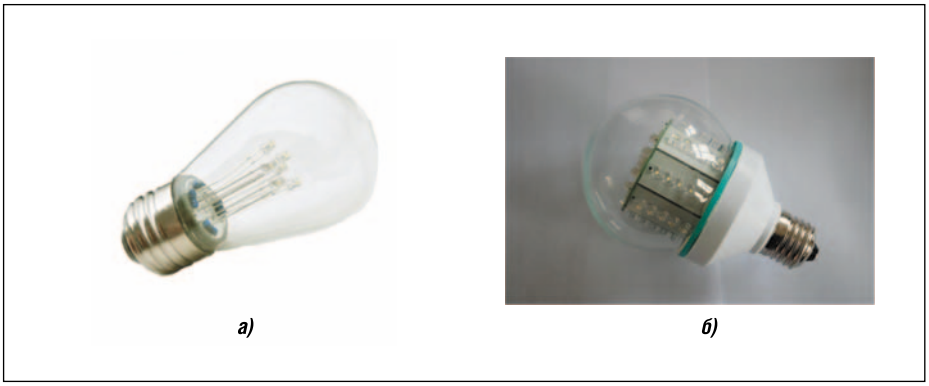


Рис. 3. Примеры неэффективных конструкций светодиодных ламп прямой замены ламп накаливания форм-факторов A (а) и G (б) с точки зрения обеспечения теплоотвода

[4] Например, масса СД-ЛПЗ мощностью 10 Вт по рис. 2, *г* составляет 409 г, а 11-ваттной КЛЛ W1511 (Megaman) с тем же световым потоком – не более 60 г.

Таблица 1

Заявленные характеристики светодиодных ламп прямой замены ламп накаливания разных форм-факторов с цоколем E27

Производитель	Наименование лампы	Световой поток, лм	Мощ-ность, Вт	Расчётная световая отдача, лм/Вт	Коррелиро-ванная цветовая температура, К (Общий индекс цветопередачи)	Срок службы, тыс. ч.
Lemnis Lighting (Нидерланды)	Pharox LED bulb	230	4	57,5	2800 (>85)	50
Luums (Нидерланды)	Bulb 5W[1]	305	5	61	2000-6500	50
ATG Electronic (Тайвань)	eLucent E60X[2]	230	5	46	3000-8000 (>75)	50
	eLucent™ E70X[3]	760	10	76	3000-7000	50
Philips[4] (Нидерланды)	Master LED 230V A55 1CT	230	7	33	4200 (70)	45
	Master LED 230V NR63 25D 1CT	155	7	22	3100 (85)	
		220		31	4200 (70)	
Osram (Германия)	A40 (Parathom Classic)[5]	345	8	45	–	25
BBE (КНР)	SP70, SP80B, SP80 (E27)[6]	250-750	5-15	50	5000-7000	50
GlacialLight (Тайвань)	BR30, BR40[7]	360-840	7,2-17,4	48-50	6000 (>75)	35
		270-675		38-39	3000 (>80)	
Norman lamps[8] (США)	A19, A23 (120 VAC)	480, 1200	6, 15	80	3000	50
Kepsun[9] (КНР)	KS-LB-90702809B	350	6	58	5000-7000	50
	KS-LB-90702809A	250		42	2700-5000	
EarthLED (США)	Zetalux[10]	450	7	64	6000 (75)	50
		350		50	3000 (80)	
7 brother (КНР)	BB371003[11]	130/100	3	43/33	3000-6500	-
Ningbo Jingke Opto-electronic (КНР)	LED PAR38 Light[12]	1200	20	60	3000-6000	50
Ledzworld (Малайзия)	Bulb 7W Cree	280	7	40	2800 (85)	35

1 http://www.luums.com/index.php/en/bulb-serie/bulb-5w . дата обращения: 30.11.2009.
2 http://www.atgelectronics.com/lighting/Illumination/LEDLamps/E60X-XPower-LED-Globe-Bulbs.html
3 http://www.atgelectronics.com/lighting/Illumination/LEDLamps/E70X-XPower-LED-Globe-Bulbs.html
4 http://www.lighting.philips.com
5 http://www.ledsmagazine.com/products/19415
6 http://www.bbeled.com/high_power_led_bulb.htm
7 http://www.glaciallight.com/products/BR40.htm
8 http://www.normanlamps.com/product_info.php/cPath/728/products_id/9672
9 http://www.kepsun.com/ks-led-bulb-90702809.html
10 http://www.earthled.com/zetalux-led-light-bulb.html
11 http://www.7-brother.com/productzs/20093317401294538.jpg
12 http://jingkeled.en.made-in-china.com/product/cqhJAZWdkIVN/China-LED-PAR-Light.html

Таблица 2

Светотехнические характеристики ламп по табл. 1, полученные авторами, после стабилизации температуры корпуса (спустя около 30 мин после включения)

Производитель	Форм-фактор лампы, (тип цоколя)	Световой поток, лм	Мощность, Вт	Световая отдача, лм/Вт	Коррелиро-ванная цветовая температура, К (Общий индекс цветопередачи)	Рисунок
Ledzworld (Малайзия)	Bulb 7W Cree (E27)	245	7	35	2832 (83)	2, *а*
	MR16	173	3.8	46	3022 (81)	2, *б*
Yusing (КНР)	PAR (GU10)	72	3.5	21	7724 (80)	-
ATG Electronic	eLucent E60X, eLucent E70X (E27)	214	5	43	5409 (69)	2, *в*
		600	10	60	5985 (73)	2, *г*
	PAR (GU4)	191	3	64	6244 (74)	-
BBE	SP70 (E27), A/R	176	5	35	5532 (70)	2, *д*
	SP80 (E27), R	528	15	35	5841 (70)	2, *е*
No name (КНР)	CLH60 A (E27)	175	3,3	53	6807 (78)	2, *ж*
	CLH37 B (E27)	110	2	55	6578 (79)	2, *з*

отмечалось, радиатор СД-ЛПЗ располагают рядом с цоколем, и поэтому ЭПРА должен иметь гальваническую развязку. А если дополнительно предусмотрено светорегулирование лампы, то для исключения возможности поражения электрическим током канал этого регулирования должен быть оптически развязан. Но используемый для этого оптрон также подвержен деградации, т.к. содержит светодиод. Поэтому надёжность этого элемента может играть ключевую роль в вопросе срока службы светорегулируемых СД-ЛПЗ [3].

Кроме того, ЭПРА должен содержать элементы коррекции коэффициента мощности. Несмотря на низкую мощность, это требование оправдано, так как количество световых точек достигает сотен миллионов. Согласно результатам независимых исследований, коэффициент мощности современных СД-ЛПЗ лежит в пределах от 0,32 до 0,48 [4] или от 0,3 до 0,95 [5], в зависимости от конструкции применяемого ЭПРА. Это, например, означает, что замена ЛН (световая отдача 10 лм/Вт) на СД-ЛПЗ (32 лм/Вт) с коэффициентом мощности 0,32 к «освобождению генерируемых электрических мощностей» не приведёт, так как световая отдача такой СД-ЛПЗ «по полной мощности» равна 10,2 лм/вар (32 лм/Вт·0,32 Вт/вар). При этом по проекту требований программы Energy Star Минэнерго США для СД-ЛПЗ коэффициент мощности должен быть не менее 0,7 [6].

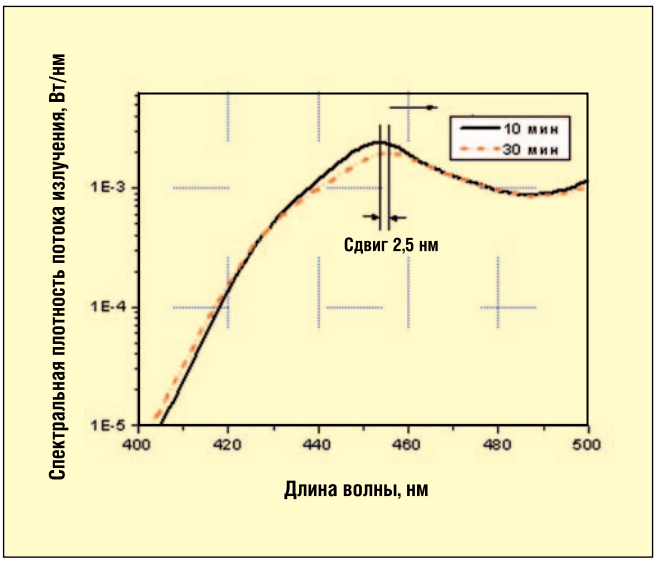


Рис. 4. Часть спектра излучения лампы по рис. 2, а через 10 и 30 мин после включения

Наибольшему числу требований должна отвечать оптическая подсистема СД-ЛПЗ: давать малые световые потери при заданных форм-факторе, габаритных размерах (с учётом радиатора) и кривой силы света. Так как светодиоды излучают в одну полусферу, то создание СД-ЛПЗ в форм-факторах A, B, G или др., для которых кривая силы света близка к равномерной, требует применения специальной рассеивающей оптики либо конструкции, при которой отвод тепла от светодиодов затруднён (см., напр., рис. 3, *б*).

Производители СД-ЛПЗ в поисках компромиссного решения выпустили модели ламп, напоминающие по форме традиционные ЛН форм-фактора A, излучение которых тем не менее направлено преимущественно в одну полусферу (рис. 1 и рис. 2, *а* и *в*). Несоответствие по светораспределению с ЛН обусловлено необходимостью в наличии радиатора. В этом смысле, очевидно, более целесообразны СД-ЛПЗ, выполненные в форм-факторах R, PAR, MR16 и т. п. (с излучением в одну полусферу) (рис. 5).

Таблица 3

Ориентировочные граничные значения коэффициентов эффективности светодиодных ламп прямой замены

η_{th}	η_{el}	η_{op}
0,85–0,98	0,75–0,80	0,5–0,95

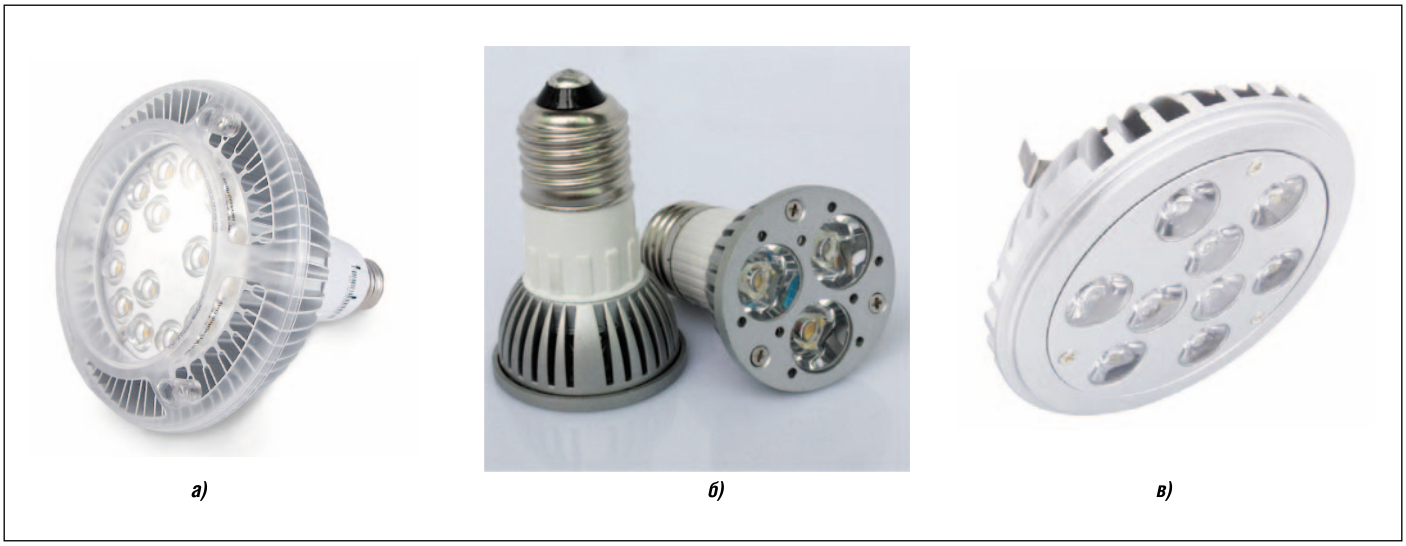


Рис. 5. Перспективные образцы светодиодных ламп прямой замены ламп накаливания: форм-факторов R (а), PAR с цоколем E27 (б), PAR с цоколем G53

С точки зрения реализации СД-ЛПЗ должны бы иметь ряд потребительских качеств, свойственных заменяемым ЛН (рис. 6).

Удовлетворение требований к каждой характеристике налагает на конструкцию СД-ЛПЗ жёсткие ограничения, требующие поиска новых для светотехники инженерных решений.

Предстоит также решение ряда задач по повышению эргономичности и фотобиологической безопасности СД-ЛПЗ.

При существующей энергоэффективности светодиодов, устройств их питания и пассивных оптических элементов современный уровень развития СД-ЛПЗ приблизительно обозначен на рис. 6 [1]. Это говорит о том, что большинство коммерческих СД-ЛПЗ пока не может полностью заменять ЛН. Только лучшие СД-ЛПЗ направленного освещения уже заменяют рефлекторные ЛН мощностью до 50 Вт. При этом линейка рефлекторных ЛН сравнительно невелика (мощности от 30 до 150 Вт) и световая отдача их ниже, чем у ЛН общего назначения. Поэтому наиболее перспективно пока развитие СД-ЛПЗ в форм-факторах R и PAR.

Далее нами экспериментально оценены максимальные светотехнические характеристики макетов СД-ЛПЗ мощностью не более 10 Вт в форм-факторах R и PAR. Для оценки эффективности оптических систем с разными углами излучения ($2\Theta_{0,5}$) измерялись кривые силы света белых светодиодов NS6W083BT (Nichia, Япония) как таковых и в комбинации с различной вторичной линзовой оптикой (табл. 4, рис. 7). Измерения проводились с помощью гониофотометра LEDGON (Instrument Systems). Осевая сила света и световой поток светодиода были 29,1 кд и 89,7 лм, соответственно.

Характеристики питания светодиода при этом: ток 0,30 А, падение прямого напряжения 3,18 В, потребляемая мощность 0,95 Вт. Измерение потока излучения светодиода методом интегрирующей сферы дало значение 0,27 Вт (28,3 % от потребляемой мощности). Следовательно, выделял он 0,68 Вт тепловой мощности.

СД-ЛПЗ с 7 светодиодами NS6W083BT и, соответственно, 7 линзами NIS83-M обладала бы в дальней зоне осевой силой света около 1490 кд (29,1 кд·7,3·7). С учётом коэффициента эффективности теплоотвода η_{th} (ориентировочно 0,9) осевая сила света составила бы примерно 1340 кд, чего, например, достаточно для замены ЛН форм-фактора PAR38 мощностью 60 Вт с углом излучения 30°, либо ЛН форм-фактора R95 мощностью 100 Вт с углом излучения 35°. При этом СД-ЛПЗ потребляла бы приблизительно не более 8,3 Вт (0,95 Вт·7/0,80 [5]), а её световая отдача была бы порядка 66,4 лм/Вт [89,7 лм/0,95 Вт/(0,80·0,879) [6]], что и подтверждает определённую перспективность развития этого вида СД-ЛПЗ.

В заключение добавим, что поскольку практически в каждом ЭПРА и стороннем устройстве управления СД-ЛДП присутствует микроконтроллер, регулирующий ток светодиодных цепочек или температуру радиатора, то не составит большого труда ввести в СД-ЛПЗ новые функции: автоматическую регулировку светового потока и цветовой температуры в зависимости от уровня естественного освещения и времени суток, а также дистанционное управление по ИК- и радиоканалам. Дополнительно может быть реализована электронная настройка кривой силы света.

В связи с этим, например, фирма Sharp Corporation предложила дистанционно управляемую СД-ЛПЗ DL-L60AV, управляемую по светово-

[5] Считая КПД ЭПРА, равным 80%.

[6] Считая, что КПД ЭПРА составляет 80%, а полный коэффициент поглощения линзы-насадки 12,1 %.

Таблица 4

Характеристики использованных авторами линз-насадок (вторичная оптика)

Наименование линзы (Ledil,Финляндия)	Угол излучения ($2\Theta_{0,5}$), градусы		Полный коэффициент поглощения, %	Коэффициент увеличения осевой силы света светодиода
	заявленный	измеренный		
NIS83-RS	6	14,9	17,9	25,3
NIS83-SS	14	16,5	13,5	23,1
NIS83-M	30	31,2	12,1	7,3
NIS83-W	48	34,9	18,7	4,4

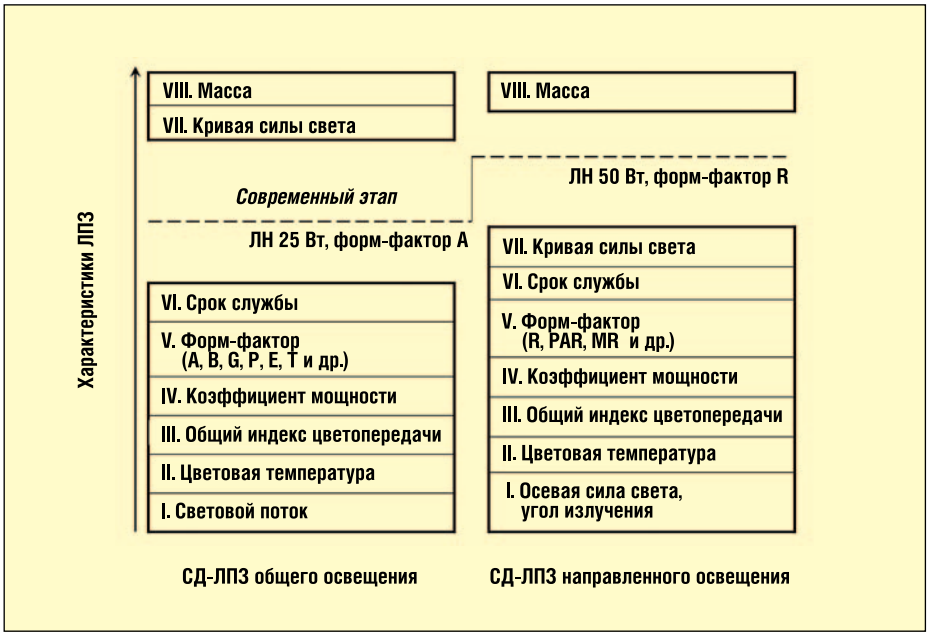


Рис. 6. Требуемые характеристики ламп прямой замены (ЛПЗ) и современный уровень развития светодиодных ЛПЗ, характеризуемый уровнем мощности заменяемых ламп накаливания (ЛН) соответствующего форм-фактора, при удовлетворительном обеспечении всех характеристик, названия которых приведены ниже пунктирной линии

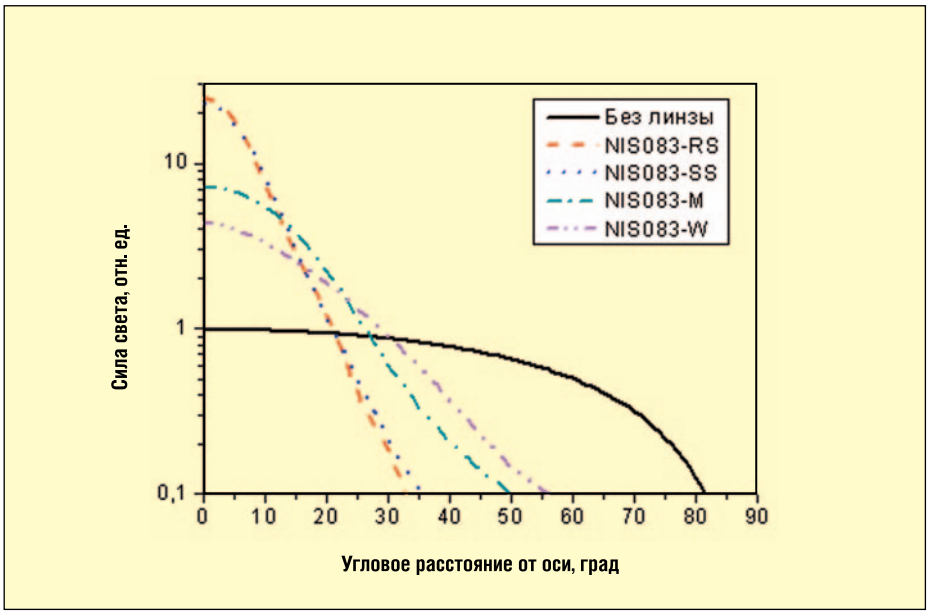


Рис. 7. Относительные кривые силы света светодиода NS6W083BT (Nichia) и его комбинаций с каждой из указанных 4-х линз-насадок

му потоку и коррелированной цветовой температуре (2650–5400 K) [7]. Возможно также создание СД-ЛПЗ, программируемых дистанционно или через контакты цоколя по сети питания [8]. Достаточно интересно и решение по созданию СД-ЛПЗ с звуковым управлением [9].

В данном сообщении мы практически не касались экономических и коммерческих деталей, но следует отметить, что 1 Вт потребляемой мощности и 1 лм светового потока СД-ЛПЗ высокого уровня ориентировочно «обходятся» в $7 и $0,1 соответственно, что дополнительно сдерживает экспансию этих ламп..

Занять СД-ЛПЗ существенную долю рынка позволит лишь удешевление стоимости их светового потока, например, до $0,02/лм при сроке службы ламп не менее 25 тыс. ч и наличии ряда дополнительных, в частности указанных выше, функциональных возможностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DOE Solid-State Lighting CALiPER Program. Summary of Results: Round 9 of Product Testing// U.S. Department of Energy. [Electronic resource]. – October, 2009. – 33 p. URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/caliper_round_9_summary.pdf (дата обращения: 15.11.2009).

2. *Chhajed, S., Xi Y., Gessmann, Th., Xi J.-Q., Shah, J. M., Kim, J. K., Schubert, E. F.* Junction temperature in light-emitting diodes assessed by different methods// SPIE Photonics West. – 2005. – P. 9.

3. *Grabner-Meyer, A.* Optocouples – A Critical Design Element in LED Bulbs// LED professional Review. – 2009. – № 15. – P. 17.

4 *Luger, S., Grabner-Meyer, A., Gorbach, L.* Electrical Considerations of LED Bulbs// LED professional Review. 2009, № 15. – P. 14.

5. DOE Solid-State Lighting CALiPER Program. Summary of Results: Round 8 of

Product Testing // U.S. Department of Energy. [Electronic resource]. – July, 2009. – 28 p. URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/caliper_round_8_summary_final.pdf (дата обращения: 15.07.2009).

6. ENERGY STAR Program Requirements for Integral LED Lamps. DRAFT 1–16–09 // U.S. Environmental Protection Agency. [Electronic resource]. – January, 2009. – 6 p. URL: http://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/new_specs/downloads/integral_leds/ESIntegralLampsCriteria_Draft1.pdf (дата обращения: 30.11.2009).

7. URL: http://www.sharp-world.com/corporate/news/090611_2.html (дата обращения: 13.11.2009).

8. URL: http://www.glassonelectronics.co.uk/html/body_dfs3000.html (дата обращения: 20.11.2009).

9. URL: http://www.sourcingmap.com/220 v-sound-light-control-activated-led-light-lamp-e27-base-p-49652.html (дата обращения: 27.11.2009).

Лишик Сергей Иванович, *кандидат техн. наук. В 1999 г. окончил физический факультет Белорусского государственного университета. Старший научный сортрудник РНПУП «ЦСОТ НАН Беларуси»*

Поседько Валерий Сергеевич, *кандидат техн. наук. В 1981 г. окончил факультет радиофизики и электроники Белорусского государственного университета. Ведущий научный сотрудник РНПУП «ЦСОТ НАН Беларуси»*

Цвирко Виталий Иванович, *инженер. В 2000 г. окончил факультет радиофизики и электроники Белорусского государственного университета Научный сотрудник УП «ЦКБ» НАН Беларуси.*

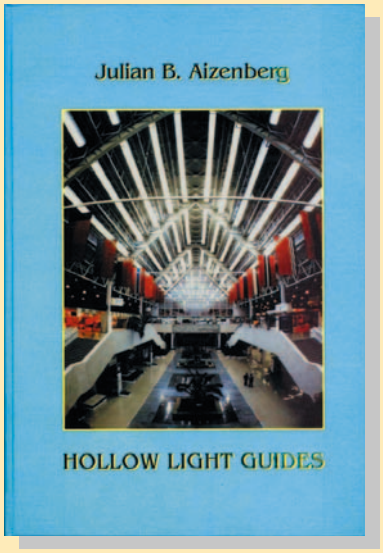
Паутино Александр Александрович, *инженер. В 2004 г. окончил машиностроительный факультет Белорусского национальный технического университета. Научный сотрудник УП «ЦКБ» НАН Беларуси*

Трофимов Юрий Васильевич, *кандидат техн. наук. В 1972 г. окончил химический Белорусского государственного университета. Директор РНПУП «ЦСОТ НАН Беларуси»*

НОВЫЕ КНИГИ

«ПОЛЫЕ СВЕТОВОДЫ»

Ю.Б. Айзенберг, профессор, доктор технических наук



Книга на английском языке содержит 208 страниц с цветными иллюстрациями.

Содержание:

- Основные понятия, термины и определения;
- Краткая история полых световодов;
- Классификация и области применения осветительных установок с полыми световодами;
- Методы измерения фотометрических характеристик полых световодов;
- Фотометрические характеристики полых световодов и проектирование осветительных установок;
- Принципы проектирования осветительных установок с полыми световодами;
- Примеры осветительных установок с полыми световодами;
- Некоторые невоплощённые концепции оптических систем и осветительных установок с полыми световодами.

Книга рассчитана на широкий круг светотехников, архитекторов, проектировщиков и студентов вузов.

Заказать книгу можно в ЗАО «МК-Периодика»: 111524, Россия, Москва, Электродная ул., 10.

Тел.: (495) 672–72-34, факс (495) 306–37–57

E-mail: korneva@periodicals.ru (с копией в ЗАО «Фирма «Знак», тел./факс (495) 361–93–77)

Профессор, доктор технических наук Ю.Б. Айзенберг известен светотехникам многих стран как исследователь-новатор полых световодов, автор почти 30 патентов и 100 журнальных статей, по световодам, популяризатор эффективного использования полых световодов, организатор их производства и инициатор соответствующей работы в рамках Международной комиссии по освещению. Он – главный редактор журналов «Светотехника» и Light & Engineering.