

# Использование дисплейных технологий для освещения

В.В. БЕЛЯЕВ<sup>1, 2</sup>, К.Д. НЕССЕМОН<sup>1</sup>, А.А. БЕЛЯЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский университет дружбы народов (РУДН), <sup>2</sup>Московский государственный областной университет (МГОУ), Москва  
E-mail: vic\_belyaev@mail.ru

## Аннотация

Обзорно рассмотрен современный уровень развития ряда дисплейных технологий, которые используются или могут использоваться для создания новых перспективных светотехнических решений. Особое внимание уделено технологиям на основе органических светодиодов и жидких кристаллов. Приведены примеры их применения в автостроении и архитектуре с учётом разных экономических показателей и ограничений медико-гигиенического и эргономического характера.

**Ключевые слова:** светотехника, оптоэлектроника, светотехнические характеристики, твердотельные и органические светодиоды, дисплейные технологии, нанотехнология.

Развитию светотехники сегодня значительно способствует появление новых разработок в разных областях техники, прежде всего в оптоэлектронике и оптике. Это приводит к появлению новых рыночных ниш приборов с улучшенными светотехническими характеристиками или функциональными возможностями. Классическим примером стали светодиоды (СД) и светильники с СД. Их использование более безопасно, экологично и эргономично с разных точек зрения, чем других осветительных устройств [1].

Значительные перспективы для светотехники несёт в себе такая область науки и техники, как средства отображения информации или дисплеи. Некоторые дисплейные технологические разработки, в том числе органические светодиоды (ОСД), изначально предназначались для формирования плоского изображения без использования заднего освещения, но оказались перспективны и для создания плоских и очень тонких источников света (ИС) [2]. Другой важной плоскопанельной дисплейной технологией является жидкокристаллическая (ЖК).

Поскольку в ЖК дисплеях (ЖКД) заднее освещение необходимо, развитие этой технологии потребовало разработки многих видов комплектов для формирования и управления световым пучком – ЛЛ, СД, световодных пластин и других элементов.

Развитие нанотехнологий привело к появлению материалов, влияющих на световую отдачу и спектральный состав уже существующих ИС или оптических элементов. Одним из самых известных таких материалов, уже промышленно выпускаемых, являются квантовые точки.

Развитие дисплейных технологий требует разных эргономических исследований – тщательного изучения зрительной системы человека и влияния на неё ИС с разным спектральным составом и возможностью светорегулирования во времени. Одно из быстро развивающихся направлений – автомобильные дисплеи, дисплеи для промышленного и военного применения и др., в котором важной частью является управление светом.

В настоящем обзоре кратко рассмотрен современный уровень разных дисплейных технологий, которые используются или могут использоваться для создания новых перспективных светотехнических решений.

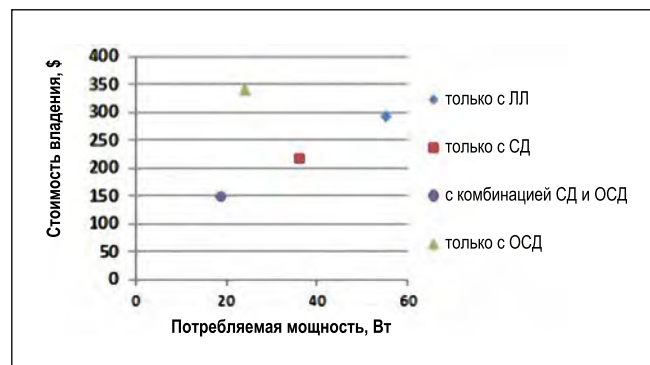
Ведущие мировые компании *Konica Minolta*, *LG Chem*, *AcuityBrands*, *OLEDWorks*, *BMW*, *Audi* и др. разрабатывают и производят разные виды осветительных приборов (ОП) с ОСД,

имеющие новые функциональные возможности по сравнению с традиционными [2]. ОП с ОСД могут быть плоскими и, одновременно, гибкими и очень тонкими, и способными накладываться на поверхности практически любой формы и кривизны. Большим достоинством является возможность варьирования их спектров излучения в пространстве и времени. Современные ОСД технологии позволяют создавать ОП с достаточно большими яркостью и световой отдачей, адаптированные к применению в экстремальных внешних условиях, например в автомобилях, некоторые части которых испытывают большие механические и температурные нагрузки.

В нише полупроводниковых осветительных технологий доминирует всё более дешёвое освещение СД ИС, но быстро развивается и коммерциализируется освещение ОСД ИС, дополняющее по характеристикам и возможностям первое. На основе ОСД можно создавать ИС большой площади с диффузным излучением и отличным качеством цветопередачи. При этом использование пластмассовых подложек позволяет изготавливать ОП любой формы, кривизны, очень тонкие и лёгкие. В отличие от большинства ОП традиционного типа ОП на основе ОСД не вызывают ослепления, и их цену значительно снижает исключение таких компонентов, как рассеиватели, что, кстати, благоприятно сказывается и на световой отдаче ОП.

Сегодня многие компании в мире производят осветительные панели на основе ОСД для ряда применений, включая одно из главных – освещение автомобилей. Такие компании, как *Audi*, *BMW* и др., показали, что специальные ОП на основе ОСД дают большую свободу конструирования, чем другие, прежде всего, благодаря ОСД панелям произвольной формы

Рис. 1. Оценки стоимости владения потолочных светильников с ЛЛ, СД, ОСД и комбинацией СД и ОСД для офисного пространства (на 2020 г.)



## Перспективные характеристики белых ОСД источников света

Характеристика	Цель и практический предел
Световая эффективность излучения	350 лм/Вт
Внутренняя квантовая эффективность	95 %
Световая отдача пикселя	180 лм/Вт при яркости 3000 кд/м <sup>2</sup>

Рис. 2. Количество СД для внутреннего освещения одного автомобиля премиум-класса (по данным компании ВМВ)

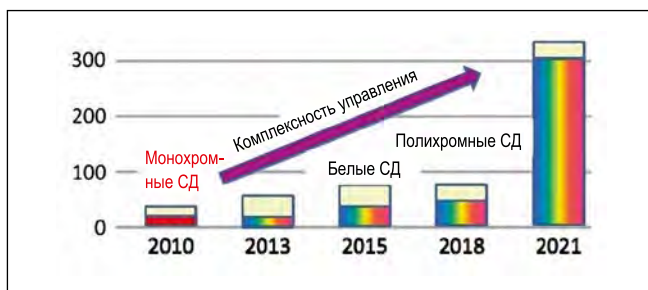
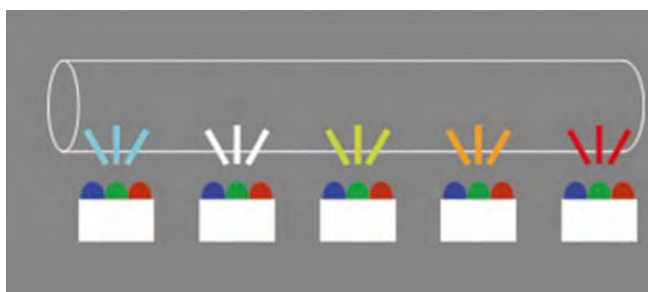


Рис. 3. Цветное освещение интерьера автомобиля моно- или полихромными СД с использованием световода и устройства цветорегулирования



с чрезвычайно однородным свечением [3]. Кроме того, представляет интерес использование пластмассовых ОП с ОСД в интерьерах самолётов.

Целевые и перспективные показатели ОП на основе белых ОСД приведены в табл. 1 [3].

Что касается экономичности этих ОП, то, по оценке Минэнерго США [4], по сравнению с традиционными потолочными светильниками плоские светильники на основе ОСД, например, при использовании в коридорах снижают энергопотребление на 73 %, что на уровне 2020 г. позволит сэкономить до \$1,7 млрд в год. Приведённые на рис. 1 прогнозы на 2020 г. по стоимости владения 4-х видов потолочных светильников при одинаковом уровне освещения ими офисного пространства площадью 6 м<sup>2</sup> за 10 лет (точнее, с учётом нерабочего времени офиса, 20800 ч горения) явно показывают «лидерство» светильника с комбинацией СД и ОСД и «аутсайдерство» светильника только с ОСД. Последний уступает здесь не только светильнику с СД, но даже светильнику с ЛЛ.

Предполагается, что на уровне 2020 г. стоимость 1000 лм составит \$30 для светильников с ЛЛ, \$24 для светильников с СД и \$100 для светильников с ОСД.

Минэнерго США составило дорожные карты до 2025 г. по световой отдаче и стоимости производства ОСД панелей (табл. 2 и 3). При этом считается, что общий индекс цветопередачи  $R_a$  будет выше 80, а коррелированная цветовая температура  $T_{ки}$  составляет 3000 К. В течение десятилетия световая отдача должна возрасти в 2,5 раза за счёт улучшения эффективности материалов и управляющих устройств (УУ). Это должно быть достигнуто многократным увеличением капитальных затрат на создание производства ОСД панелей, по техническим и экономическим характеристикам сравнимых с ЖК панелями. При этом должна существенно снизиться стоимость всех материалов и производственных операций. И в результате стоимость производства 1 м<sup>2</sup> ОСД панелей за 10 лет должна снизиться в 33 раза.

В работе [5] рассмотрены возможности формирования адаптируемых к разным внешним условиям комфортных вариантов освещения. Стратегия энергетически эффективного освещения направлена на обеспечение нужного уровня и спектрального состава света в нужном месте и в нужное время. При этом соответствующий адаптивный светильник должен содержать яркий источник белого света и неяркий янтарного света, интегрированные с датчиками освещённости и присутствия. Сигнал датчика освещённости используется для выключения обоих ИС днём и включения ночью. Сигнал другого датчика используется для включения яркого белого света во время присутствия человека и выключения во время отсутствия.

Сегодня автопроизводители продолжают требовать всё большей «функциональности» СД для поддержки инновационных дополнений к автомобилям и улучшения разглядывания или считывания информации с соответствующих устройств с СД в дневное время. Если в 2010 г. типичный автомобиль, поступающий в продажу, содержал 50 СД, то к 2021 г. их количество должно возрасти до более, чем 300 (рис. 2) [6]. Этот прирост происходит, в основном, за счёт использования СД трёх основных цветов (красный, зелёный и синий), связанных в единый ИС. В этом случае нужно разрабатывать соответствующие УУ с широтно-импульсной модуляцией для получения определённых цветов, что добавляет нежелательную усложнённую по сравнению с системами, использующими платформы с белыми и монохромными СД, доминировавшими на рынке ещё несколько лет назад.

Из рис. 3 видно, что интересные возможности автомобильного освещения разного спектрального состава и интенсивности даёт использование световодов с торцевым или боковым расположением моно- или полихромных СД.

ОСД ИС гибки, легки и тонки, но, несмотря на такую уникальность, в развитии рынка этих изделий есть серьёзные проблемы. Для расширения рынка компания *Konica Minolta* предложила для гибких ОСД концепцию «истинной ценности» («TRUE VALUE») [4]. Главной ценностью в ней считается «излучаемый поверхностью однородный свет в чрезвычай-

Дорожная карта до 2025 г. по ОП с ОСД

Характеристика	2015	2017	2020	2025	Цель
Световая отдача (панели), лм/Вт	60	100	125	160	190
Оптическая эффективность, %	100			90	
КПД УУ, %	85			90	95
КПД ОП, %				81	86
Световая отдача ОП, лм/Вт	51	85	106	130	162

но тонком установочном пространстве». Эту ценность повышают три основных движителя: «уменьшение веса», «управление светом «*Twilight*» и «возможность касаться ОП, не обжигаясь»; в случае прозрачных ОП может быть ещё один движитель – «невидимое волшебство».

В результате разные гибкие ОСД ИС могут встраиваться в обычные предметы: зонтики, веера, одежду, подвесные движущиеся конструкции (мобили) и т.п.

Помимо «классических» квантовых точек в люминесцентных материалах широко применяются перовскитные наночастицы. В частности, есть сообщение [7] о недавнем изобретении органических и неорганических гибридных перовскитов (ОНГП), вводимых в состав композитных полимерных плёнок, с большой эффективностью фотолюминесценции, высокой монохромностью (полуширина спектральной линии < 20 нм), беспрецедентной стойкостью к воде и нагреву, применимостью в заднем освещении в ЖК дисплеях, а также в датчиках и светотерапии. С использованием квантовых точек и ОНГП уже созданы и производятся СД с квантовыми точками (QLED), способные превзойти ОСД по цветовой гамме, энергоэффективности и стоимости (рис. 4). Ожидается, что световая эффективность излучения соответствующих ИС на основе QLED превысит 359 лм/Вт, а  $R_a$  составит не менее 91.

Правда, пока время жизни таких приборов не дотягивает до 30000 ч, требуемых для применения в ОП. Сейчас оно составляет 2000 ч при яркости 500 кд/м<sup>2</sup> и 7000 ч при яркости 100 кд/м<sup>2</sup> [8].

Компания *OLEDWorks LLC* разработала второе поколение высокоэффективных ОСД панелей янтарно-

го света для здравоохранения [9]. По сравнению с панелями первого поколения световая отдача их поднята до 60 лм/Вт за счёт использования фосфоресцентных материалов. Кроме того, слоистая конструкция обеспечивает увеличение срока службы и однородности свечения.

Компания *Pixelligent Technologies LLC* разработала технологию производства материала «*PixClear*»<sup>®</sup> на основе дисперсий и нанокompозитов с нанокристаллами  $ZrO_2$ , который по-

зволяет сделать коэффициент извлечения света в ОСД ИС больше 100 % [10]. В этих материалах значительно увеличен показатель преломления мономеров и полимеров при содержании наночастиц  $ZrO_2$  до 90 %. При этом прозрачность материала в видимом диапазоне высокая.

Обычно ЖК устройства используются для формирования или обработки изображений. Но в последние годы интенсивно развивается создание ЖК приборов для применений, например,

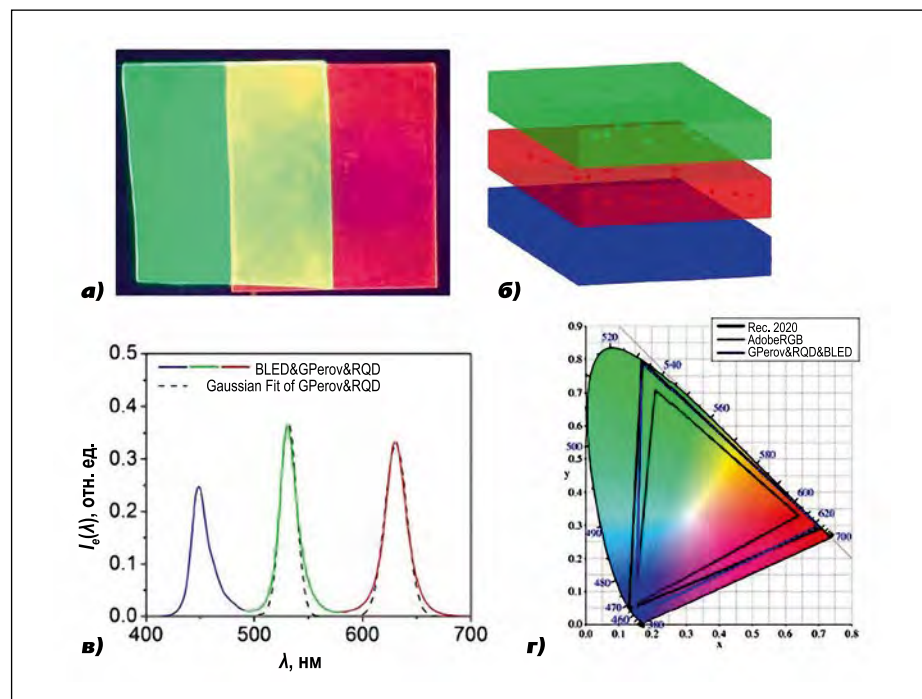


Рис. 4. Применение специальной композитной плёнки в качестве светопреобразователя в заднем освещении дисплея с широкой цветовой гаммой: а – изображение композитной плёнки с красными квантовыми точками и полистиролом, а также с зелёным метилминброматом свинца ( $MAPbBr_3$ ) и полистиролом (под действием УФ облучения); б – схема генерации белого света путём интеграции плёнок, указанных выше, с синим СД; в – спектр белого излучения системы с вышеуказанными плёнками (зелёной и красной), используемыми в качестве преобразователей излучения синего СД. Пунктирные линии – гауссовские аппроксимации зелёной и красной составляющих спектра; г – диаграммы цветности для белой светодиодной системы (синяя линия), для системы с RGB спектром «Adobe» (серая линия) и для системы, соответствующей рекомендации МКО на 2020 г. (чёрная линия) в сравнении с диаграммой цветности МКО 1931

Дорожная карта до 2025 г. по стоимости производства ОСД панелей

Параметр	2015	2016	2018	2020	2025
Площадь подложки, м <sup>2</sup>	0,17	0,17	1,38	2,7	5,5
Капитальные затраты, \$ млн	75	75	200	300	400
Длительность производственного цикла, мин	3	2	1,5	1	1
Производительность, тыс. м <sup>2</sup> / год	14	25	300	1000	2400
Амортизационные издержки, \$/м <sup>2</sup>	1050	600	125	60	35
Стоимость органических материалов, \$/м <sup>2</sup>	200	150	100	35	15
Стоимость неорганических материалов, \$/м <sup>2</sup>	200	200	120	50	30
Стоимость работы, \$/м <sup>2</sup>	150	100	20	10	5
Другие фиксированные затраты, \$/м <sup>2</sup>	75	50	15	10	5
Полная стоимость без учёта выхода годной продукции, \$/м <sup>2</sup>	1675	1.100	355	160	90
Выход годной продукции, %	50	60	70	80	90
Полная стоимость, \$/м <sup>2</sup>	3350	1850	550	200	100

в автофарах или в наружном архитектурном освещении. ЖК материалы для таких применений должны обладать дополнительной устойчивостью к экстремальным внешним условиям, а также к очень яркому свету. Для достижения нужных оптических характеристик при использовании в архи-

тектурном освещении у ЖК должно быть очень высокое двулучепреломление при высокой устойчивости к воздействию света. В немецкой компании *Merck* такие ЖК смеси разработали, а в компании *Hella KGaA Hueck & Co* [11, 12] создали конструкцию светильника с использованием этих

ЖК для работы в суровых условиях (рис. 5). Новая монохромная конструкция отличается наличием двойной поляризации света (вертикальной и горизонтальной), и её эффективность преобразования обычного света в поляризованный составляет 76 %. ИС представляет собой ЖК матричную панель с относительно низким разрешением.

На рынке становятся предпочтительными конструкции, которые позволяют потребителям приспосабливать их к персональным нуждам. Одним из способов решения этого вопроса – добавление в них светорегулятора. Хорошо известный пример в этом отношении – серия «умных» светотехнических изделий «*Hue*» компании *Philips Lighting*. А недавно компания *LensVector* разработала способы изменения формы светового пятна при местном освещении. В них могут использоваться ЖК элементы для управления направлением света или его фокусировки (рис. 6) [13].

В исследовании, выполненном в Национальном университете Цинхуа (Синьчжу, Тайвань), показано, что для получения «хорошего» для пользователя освещения не надо гнаться лишь за показателями световой отдачи и энергосбережения [14]. Учёные исследовали процесс подавления се-

Рис. 5. Схематическая конструкция светильника направленного действия с ЖК источником света

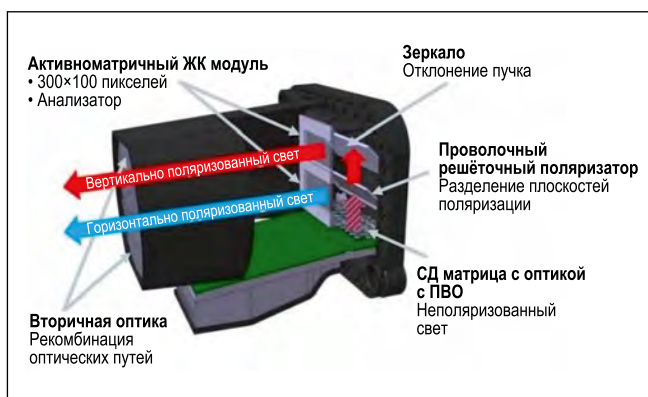


Рис. 6. Две концепции световодов для архитектурного применения: фокусировка или изменение формы и регулировка направленности

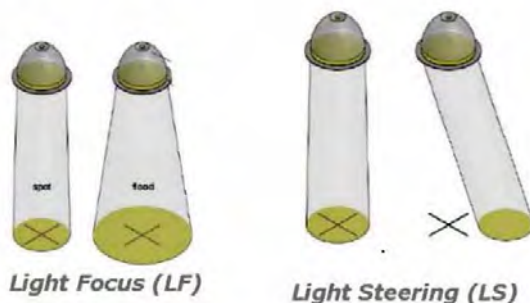


Таблица 4

Влияние изменения  $T_{ки}$  на предельно допустимое время облучения сетчатки  $t$  при освещённости 500 лк.

$T_{ки}, K$	Чёрное тело	СД	ОСД
	$t, c$		
2000	407	370	369
3000	146	155	153
5000	63	74	70
8000	40	50	47



Рис. 7. Пример использования самосветящейся дисплейной панели для создания циркадно эффективного (синего) или циркадно неэффективного (красного) света в зависимости от времени суток

креции мелатонина под действием ИС трёх видов (чёрного тела, СД и ОСД) при значениях  $T_{ки}$  от 2000 до 8000 К. В табл. 4 приведены максимально допустимые по фотобиологической безопасности [14] времена облучения сетчатки для трёх этих ИС.

При этом обычно считается, что белый свет при  $T_{ки}$  порядка 6000 К эргономически больше подходит для дисплеев телевизоров, мониторов и сотовых телефонов, чем свет при  $T_{ки}$  7000 К (относительно большей синевы).

Сочетание «хорошего» света с энергосберегающими технологиями позволяет избежать нарушений сна и риска повреждений или заболеваний сетчатки.

В Центре светотехнических исследований при Политехническом институте Ренсселера (США) проведено исследование по синхронизации циркадных ритмов с местным временем с разными группами людей, в том числе страдающими некоторыми неврологическими заболеваниями [15]. Частью исследования было изу-

чение потенциально полезного влияния светоизлучающих дисплейных панелей на сон и настроение. В пилотных экспериментах использовалась 70-дюймовая дисплейная панель японской компании Sharp, тип которой (плазменная или ЖК) в публикации не указан. В эксперименте, длившемся одну неделю, больные болезнью Альцгеймера в течение светового дня с 7 утра до 6 вечера сидели за столом, представлявшим собой светящуюся дисплейную панель. В назначенное время они принимали пищу за этим столом. Стол можно было использовать и как сенсорный экран для игр и развлечений. В результате наблюдалось существенное улучшение сна, уменьшение депрессии и возбудимости. В зависимости от времени дня свечение панели было синим или красным как, например, на рис. 7, что позволяло регулировать циркадные ритмы. Кроме того, в помещениях вешали дисплейные панели в вертикальном положении, чтобы свет от них достигал дна сетчатки. Это не

всегда получается при потолочном расположении ИС.

### Заключение

Приведён краткий обзор современных безопасных, экологических и эргономичных технологий осветительных устройств на основе СД и ОСД и использования некоторых новых композитных материалов. Рассмотрены новые области применения таких устройств с учётом экономических перспектив; отмечена возможность использования таких технологий в медицине.

### Благодарности

Работа выполнена по проекту № 17–47–500752 Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Московской области (при частичной поддержке).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юнович А.Э. Светодиоды и их применение для освещения / Под ред. проф. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Знак, 2011.
2. Усов Н.Н. Перспективы применения органических светодиодов для отображения информации и освещения // Светотехника.– 2011.– № 5. – С. 4–14.
3. Hack M., Weaver M.S., Brown J.J. Status and Opportunities for Phosphorescent OLED Lighting / SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017. – P. 187–190.
4. Nagata A., Mitsui S., Iwamatsu N., Suzuki A., Kubota R., Hiraga A., Yamamoto N., Takemoto N., Tsujimura T. The «TRUE VALUE» of Flexible OLED – One and Only Design and Experience / Там же. – P. 691–694.
5. Papamichael K. Adaptive Lighting for Energy-Efficient Comfort and Wellbeing / Там же. – P. 306–309.
6. Automotive Interior Lighting Control Redefined. URL: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/interior-automotive-lighting-control-redefined>, 28.12.2017 (дата обращения: 21.08.2018).
7. Dong Y. Solution Processable Luminescent Nanomaterials for Display, Lighting and Beyond / SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017. – P. 272–275.
8. Dong Y. et al. / Там же. – P. 270–273.
9. Lee D., Spindler J., Kondakova M., Pletten A., Boroson M. Amber OLED Lighting Technology Development and Application / Там же. – P. 91–94.
10. Guschl P.C., Wang X., Weinstein M.A. Ink-Jet Printing of High-Index Zirconia Nanocomposite Materials / Там же. – P. 942–944.

11. Reinert-Weiss C.J., Baur H., Nusayer S.A.A., Duhme D., Fruehauf N. Development of active matrix LCD for use in high-resolution adaptive headlight // Journal of the SID. – 2017. – Vol. 25, No. 2.

12. BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung Germany), Announcement of the project «Volladaptive Lichtverteilung für eine intelligente, effiziente und sichere Fahrzeugbeleuchtung (VoLiFa 2020)». URL: <http://www.photonikforschung.de/forschungsfelder/beleuchtungled/intelligente-beleuchtung/> (дата обращения: 01.06.2018).

13. Jou J.-H., Singh M., He Z.-K., Su Y.-T. Definition and Design of a Good Light / SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017. – P. 1812–1813.

14. ГОСТ Р МЭК 62471-2013 «Лампы и ламповые системы. Светобиологическая безопасность».

15. Figueiro M.G. Biological Effects of Light: Can Self-luminous Displays Play a Role? // Information Display. – 2018. – Vol. 34, No. 1. – P. 6–9.

## Лу Бедокс (*Lou Bedocs*) (1942–2019)



В феврале этого года скончался после тяжёлой болезни на 77 году жизни выдающийся специалист-светотехник, крупнейший деятель международной стандартизации в области светотехника бывший технический руководитель фирмы *Thorn Lighting Limited, United* (Англия), постоянный активный член международной редколлегии нашего журнала «*Light & Engineering*» (с 1993 года) и объединённой редколлегии журнала «Светотехника / *Light & Engineering*».

Лу (его настоящие имя Laios) родился в Венгрии и после долгих перипетий послевоенного времени оказался в Англии, где окончил среднюю школу.

Благодаря исключительной энергии, неистощимому оптимизму и огромной любознательности нашёл работу в ведущих светотехнических фирмах «*Thorn Lighting Industries*», а затем и в «*Atlas*». С тех пор он увлёкся светотехникой, которая и стала делом его жизни, 60 лет из которой Лои отдал успешной работе на фирме *Thorn*.

Лу Бедокс творчески и активно сотрудничал с многими международными организациями (*ISO, CEN, BSI, CIE, CLL, Lux-Europa*), награждён целым рядом Золотых и Серебряных медалей. Возглавлял работу по подготовке ряда важнейших Европейских стандартов.

Ушёл от нас не только великолепный специалист и общественный деятель, ушёл чудесный, открытый и добрый человек, память о котором навсегда останется в наших сердцах и душах.

**Члены редколлегии журнала «Светотехника / *Light & Engineering*», в том числе хорошо знавшие покойного и много лет сотрудничавшие с ним Ю.Б. Айзенберг и Р.И. Столяревская**



**Белиев Виктор Васильевич**, доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1974 г. МФТИ по специальности «Автоматика и электроника». Зав. кафедрой теоретической физики МГОУ

и профессор департамента механики и механики Инженерной академии РУДН. Член (Fellow) Международного общества информационных дисплеев (SID)



**Нессемон Кемонекле Донатиен**, переводчик в сфере профессиональной коммуникации (французский и русский языки). Окончил в 2012 г. Институт иностранных языков РУДН



**Белиев Андрей Андреевич**, эколог. Окончил в 2015 г. МГОУ по специальности «Геоэкология». Инженер учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии МГОУ