



Андрей Туркин

Светодиодные источники света на основе технологии удалённого люминофора: теория и реальность

В статье описывается методика получения белого цвета светодиодного источника по технологии удалённого нанесения люминофора, анализируются её преимущества и особенности. Дается краткий обзор основных тенденций развития направления применения ламп-ретрофитов и перспектив использования технологии удалённого люминофора для создания светодиодных ламп, имеющих форм-фактор ламп накаливания и способных стать их полноценной заменой.

ВВЕДЕНИЕ

С древнейших времён человек сталкивался с различными источниками света. Самым старым и распространённым из них является огонь. Люди на протяжении долгого времени использовали его не только для освещения, но и для обогрева, а также для передачи и отображения информации [1]. Кроме огня пламени, люди видели молнии и полярные сияния, являющиеся свечением электрического разряда в газе, светящиеся точки светлячков и свечение некоторых видов микроорганизмов в южных морях — иначе говоря, наблюдали явление хемилюминесценции [2]. Но всё это были природные явления, то есть естественные источники света, а единственным искусственным источником света до конца XIX века оставался огонь в различных его проявлениях: факелы и свечи, керосиновые лампы и газовые фонари [2].

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

С конца XIX века началось бурное развитие совершенно новых источников света — электрических [2]. Это произошло во многом благодаря работам А.Н. Лодыгина, П.Н. Яблочкова и

Т.А. Эдисона. За 130 лет существования электрические источники света в развитых странах практически полностью вытеснили свет огня — свечи и керосиновые лампы теперь используются для освещения лишь изредка, в основном при аварийном отключении электричества. Правда, стоит сказать, что в некоторых старых европейских городах, особенно в их центральных исторических частях, в последнее время снова стали использовать газовые фонари, но это делается для придания таким местам атмосферы старины.

Развитие электрических источников света сразу шло по двум направлениям: использование теплового свечения нагретого твёрдого тела («лодыгинское») и использование свечения электрического разряда, возникающего между двумя электродами («яблочковское») [2]. Первое направление привело к появлению тепловых источников света, самыми распространёнными среди них являются различные лампы накаливания, второе — к возникновению разрядных источников света, где самыми распро-

странёнными являются люминесцентные, ртутные и металлогалогенные лампы. Именно эти два типа до недавнего времени охватывали всё многообразие электрических источников света — от миниатюрных ламп накаливания до мощных ртутных, натриевых и ксеноновых ламп.

В последние годы, кроме двух данных типов, появился и начал активно применяться третий тип электрических источников света — полупроводниковый. По многочисленным прогнозам специалистов, сделанным в течение нескольких последних лет, именно этим источникам света принадлежит будущее [2–5]. Уже сейчас наблюдается растущее применение



Рис. 1. Светодиодная лампа-ретрофит с форм-фактором лампы накаливания

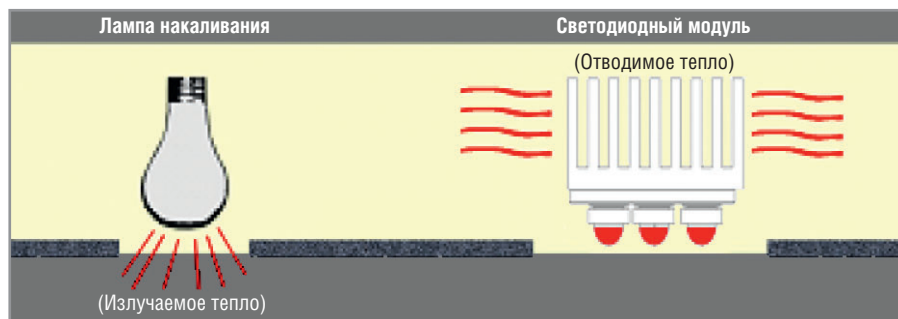


Рис. 2. Схема отвода тепла от разных источников света: лампы накаливания и светодиодного модуля

полупроводниковых источников света — светодиодов — для общего освещения [4–6], а не только для световой сигнализации, где они уже с середины 90-х годов XX века составляют серьезную конкуренцию лампам накаливания [7, 8].

Светодиоды, используемые до недавнего времени в основном для индикации в электронных приборах [4, 5, 9], сейчас успешно применяются в светофорах и дорожных знаках, бегущих строках и информационных экранах. Следует особо выделить их широкое использование в автомобильной промышленности, где они стали применяться в габаритных фонарях, сигналах торможения и поворота, а в последние год-два — в ходовых огнях и даже фарах ближнего света [4, 5, 9]. Достаточно быстрыми темпами идёт проникновение светодиодов и в системы освещения, хотя их применение пока остаётся для этой области относительно новым направлением, рассматриваемым многими как пусть недалёкую, но всё-таки перспективу.

Светодиоды в светотехнических устройствах

Необходимо отметить, что пока не сложилось чёткое понимание возможностей применения светодиодов, поэтому движение на рынке светодиодных решений скорее напоминает хаотическое (броуновское), чем поступательное. Связано это в основном с тем, что светодиод является новым источником света, который принципиально отличается от традиционно используемых ламп — разрядных и (в ещё большей степени) накаливания.

Технические трудности использования светодиодов в осветительных приборах заключаются в том, что необходимо решить задачу правильного распределения света в нужном направлении [4]. Светильники с традиционны-

ми лампами десятилетиями приобретали своё нынешнее конструкторское решение, основываясь на конструкции и характеристиках других источников света — ламп, преодолевая при этом соответствующие технические трудности. Поэтому путь, заключавшийся в использовании для светодиодных светильников существующей арматуры ламповых светильников, по которому до недавнего времени следовало большинство производителей, является не совсем верным. Такое использование возможно лишь в ограниченном ряде случаев, в большинстве же других для светодиодных источников света необходимы собственные новые корпуса.

Тем не менее, право на существование имеют и светильники, где осуществляется прямая замена традиционных ламп на светодиодные аналоги с практически идентичным форм-фактором. Такие светильники получили название светильники-ретрофиты, а источники света для них — лампы-ретрофиты (retrofit lamps). Для примера на рис. 1 показана светодиодная лампа-ретрофит с форм-фактором лампы накаливания и цоколем E27. Появление таких изделий во многом объясняется технико-экономической выгодой, определяемой простотой замены ламп старого образца на новые современные аналоги.

Но и здесь часто возникают проблемы, связанные с различием кривой распределения излучаемого света ламп и светодиодов. В последние пару лет рынок практически заполнился лампами на основе светодиодов с форм-факторами линейных и компактных люминесцентных ламп, а также ламп накаливания. Если с первыми двумя проблему распределения света удалось в общих чертах решить и остался только вопрос эффективности таких ламп, то с лампами накаливания проблема оказалась намного более сложной: принципиаль-

ное отличие геометрии светодиодного кристалла от нити накала лампы не позволяет создать с помощью светодиодов пространственное распределение, хоть сколько-нибудь похожее на распределение света от лампы накаливания. Кроме того, у традиционных ламп и светодиодных источников света по-разному выделяется тепло на излучающем элементе, из-за чего происходит нагрев разных частей конструкций, а значит, необходимы принципиально разные решения проблемы отвода тепла (рис. 2). Так что прямое замещение ламп накаливания светодиодными источниками оправданно только в отдельных частных случаях, как правило, тогда, когда от лампы требуется направленный свет.

Данные особенности, безусловно, негативно сказываются на перспективах применения светодиодов в лампах-ретрофитах, которые планируется использовать как замену лампам накаливания. Тем не менее, выход можно найти. И заключается он в получении белого цвета по технологии удалённого нанесения люминофора (remote phosphor technology).

Технология удалённого люминофора

Однородность цвета и эффективность источников белого света сильно зависят от пространственного расположения люминофора. Существует два варианта расположения люминофора внутри источника: ближнее и удалённое [9–11]. При ближнем расположении люминофор размещается в непосредственной близости от полупроводникового кристалла или на его поверхности. Схематично это представлено на рис. 3а и 3б соответственно. При удалённом расположении люминофор пространственно отделён от кристалла полупроводника некоторым расстоянием, что схематично представлено на рис. 3в.

Технологию ближнего расположения люминофора иллюстрирует рис. 4а. Эта технология разрабатывалась компанией Nichia Corporation [4, 5, 9] в 90-х годах XX века. Частицы люминофора смешиваются с эпоксидной смолой или оптическим гелем на полимерной основе. Затем данной композицией заполняется чашка отражателя, в которую помещён полупроводниковый кристалл. На частицы люминофора действуют сила тяжести, сила Архимеда (выталкивающая сила) и сила трения, которые определяют пространственное

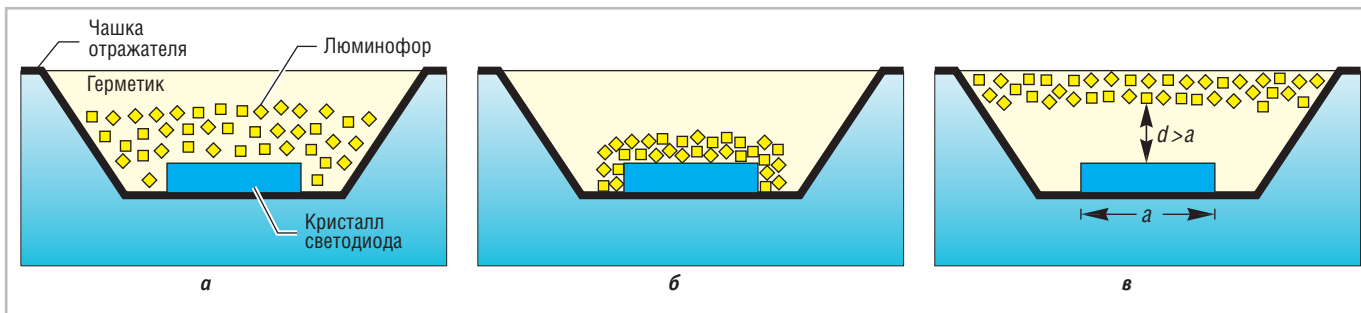


Рис. 3. Схематичное представление расположения люминофора внутри источника света: *а* – ближнее расположение люминофора; *б* – ближнее конформное расположение люминофора; *в* – удалённое расположение люминофора

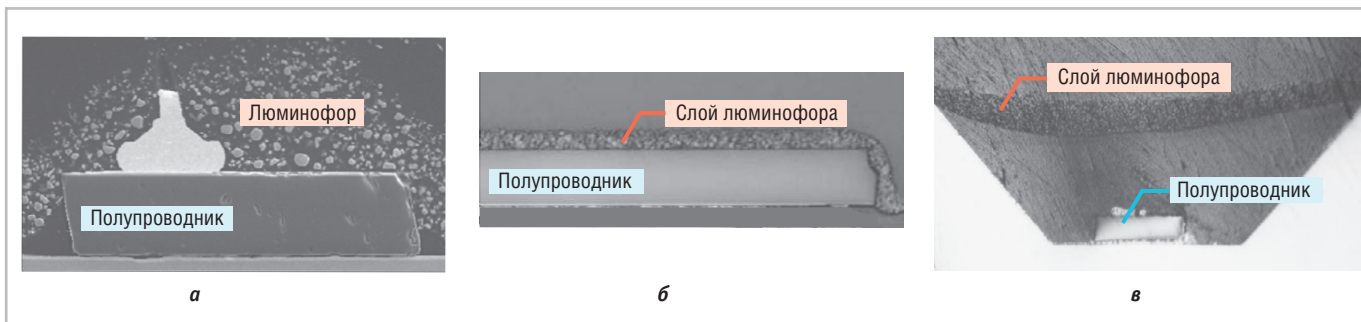


Рис. 4. Фотографии, иллюстрирующие разные варианты распределения люминофора внутри светодиодных источников белого цвета: *а* – ближнее расположение люминофора; *б* – ближнее конформное расположение люминофора; *в* – удалённое расположение люминофора

распределение люминофора. В результате действия этих сил ближе к поверхности кристалла оказываются более тяжёлые частицы люминофора [9, 12].

На рис. 4*б* показан ещё один вариант ближнего расположения люминофора – конформное расположение. Источники света с конформным расположением люминофора характеризуются малой площадью излучения и высокой яркостью, что делает их пригодными для использования в различных оптических системах. Кроме того, такое нанесение люминофора можно производить в процессе формирования полупроводниковой структуры, а не сборки светодиода, что позволит снизить затраты на изготовление источников света, а как следствие, и себестоимость изделия.

Основным недостатком источников света с ближним расположением люминофора является поглощение его излучения кристаллом полупроводника. Излучение люминофора, направленное в сторону полупроводникового кристалла, может быть поглощено, поскольку ни кристалл, ни контакты, как правило, не имеют высокого коэффициента отражения.

В случае удалённого расположения люминофора (рис. 4*в*) существенно снижается вероятность попадания излучения на полупроводниковый кристалл с низкой отражающей способностью. Это объясняется тем, что в такой системе

первичный источник (полупроводниковый кристалл) пространственно удалён от вторичного источника (люминофора). Если расстояние между кристаллом и люминофором d превышает поперечные размеры кристалла a , то есть $d > a$, как показано на рис. 3*в*, то вероятность попадания излучения люминофора на поверхность полупроводника значительно снижается. В результате значительно повышается эффективность источника. Моделирование хода лучей источника света, созданного с помощью синего светодиода с кристаллом на основе InGaN и люминофора, пространственно удалённого от него, и эксперименты с таким источником действительно показали увеличение интенсивности излучения люминофора на 75% и 27% соответственно [9, 13, 14].

Существует достаточно большое количество ламп накаливания, колбы которых имеют матовое покрытие. При прохождении сигнала, излучаемого нитью накала, через такое покрытие происходит его рассеяние, и источником света (вторичным источником)

становится уже непосредственно колба лампы. Аналогичный эффект можно получить, если нанести на колбу лампы люминофор, а в колбе, примерно на месте нити накала, расположить светодиодный кристалл или светодиод (рис. 5). В таком случае (рис. 5*а*) синий сигнал кристалла частично пройдёт сквозь слой люминофора, испытав рассеяние, частично поглотится люминофором, вызвав его возбуждение и свечение в длинноволновой (зелёно-жёлто-красной) области, и источником света (вторичным источником) в данном случае также выступит колба лампы (рис. 5*б*). В результате должно получиться распределение света, с большой точностью соответствующее распре-



Рис. 5. Конструкция лампы-ретрофита, сделанной по технологии удалённого люминофора, с форм-фактором лампы накаливания

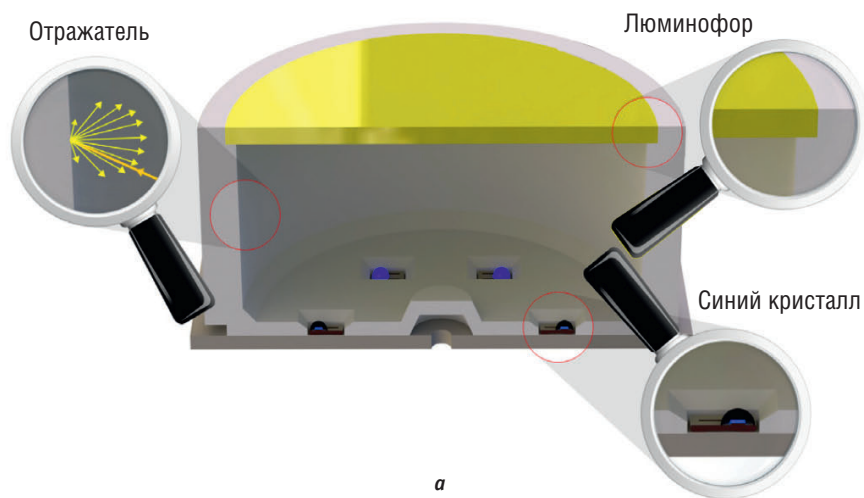


Рис. 6. Работа источника света на основе технологии удалённого люминофора: а – схема, иллюстрирующая метод получения белого света; б – полученное излучение белого света

лению излучения матовой лампы накаливания (рис. 7).

Перспективы применения светодиодных ламп-ретрофитов, сделанных по технологии удалённого люминофора

Как можно заключить из приведённых материалов, разработка светодиодной лампы по технологии удалённого люминофора позволит получить источник света, практически аналогичный лампе накаливания. Учитывая те факты, что лампа накаливания до сих пор остаётся самым распространённым источником света для светотехнических изделий и подавляющее большинство светотехнической арматуры, используемой в настоящее время во всем мире, адаптировано именно к ней, можно сделать прогноз, что появление её светодиодного аналога приведёт к существенному росту применения светодиодов в освещении. Причём в таком случае возможна именно прямая замена ламп накаливания на светодиодные аналоги в подавляющем большинстве изделий. С учётом более чем пятикратного превосходства светодиодов над лампами накаливания по световой отдаче можно приблизительно оценить, что такая замена может позволить снизить потребление электроэнергии минимум в три раза.

Необходимо отметить ещё одну особенность таких ламп – возможность управления их интенсивностью свечения. Вообще возможность управлять интенсивностью светодиодов с помощью современных средств управления является очень важным преимуществом светодиодов для использования их в

промышленном, уличном освещении и освещении внутри зданий.

При применении таких ламп становится возможным использовать в осветительной системе подсистему управления, на которую могут быть возложены относительно несложные функции контроля внешних условий и состояния светильников, обеспечения режимов управления включением/выключением и/или регулирования интенсивности свечения в зависимости от сезона, времени суток, конфигурации задействованных площадей и даже требуемого оттенка белого света. Такие подсистемы могут быть как автономными, так и входящими в состав централизованных систем автоматизации/диспетчеризации здания/объекта/предприятия. Как показывает анализ подобных решений, здесь преобладают автономные подсистемы, построенные на базе сравнительно простых и недорогих контроллеров, таких как FASTWEL I/O CPM70xx, ADAM (Advantech), WAGO I/O, LOGO! (Siemens) и др. [15, 16].

Явно доминируют модульные контроллеры с программируемой логикой (ПЛК), позволяющие гибко формировать требуемую функциональность и структуру с привлечением необходимых модулей и реализовывать адаптивное управление на основе программной обработки показаний подключённых датчиков, на что практически не способны узкоспеци-

ализированные контроллеры. При этом модульные ПЛК для систем освещения должны иметь в своём арсенале средств расширения довольно специфические модули реле, токовых преобразователей, формирователей сигналов и т.п., чем может «похвастаться» далеко не каждый контроллер.

Следует подчеркнуть, что применение подсистемы управления в составе системы освещения оказывается более эффективным именно в случае использования светодиодных источников света и светильников, которые в силу своей физической природы предоставляют большие возможности по регулированию и установке параметров. Такая подсистема может реализовывать многофакторное и многопараметрическое управление, максимально адаптируя режим работы системы освещения к изменяющимся условиям (времени суток, количеству людей в помещении, типу проводимого мероприятия и т.д.) и оптимизируя его по заданному критерию. Как правило, в качестве основного кри-



Рис. 7. Лампы-ретрофиты, имеющие форм-фактор лампы накаливания и выполненные на основе технологии удалённого люминофора, в осветительных приборах

терия рассматривается снижение потребления электроэнергии (между прочим, начальная экономия состоит в том, что лампе накаливания мощностью 75 Вт соответствует светодиодный ретрофит мощностью от 14,5 до 17 Вт в зависимости от компании-производителя). Адаптивное к складывающимся условиям управление режимами работы системы освещения с целью минимизации потребления электроэнергии ведёт к более эффективному расходу электроэнергии и дополнительной экономии.

Естественно, что адаптация режима и оптимизация потребления предполагают неизбывность параметров освещения, установленных для разных условий и видов деятельности человека. В последнее время много говорят даже о комфорте освещения. Этому понятию пока трудно дать чёткое научное или техническое определение. Однако понять его можно как показатель того, насколько удобно и комфортно чувствует себя человек, когда находится в помещении, освещённом источниками света данного типа. По выводам физиологов, для человека в разное время суток комфортными могут быть разные оттенки белого цвета. Это также учитывается производителями ламп-ретрофитов на основе удалённого люминофора. Например, серия ретрофитов компании Philips имеет возможность изменять цветовую температуру при помощи диммера [17] в диапазоне от 2700 К вплоть до 2200 К – так называемого «тёплого настроения», характерного для света свечи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, можно сказать, что лампы-ретрофиты – светодиодные источники света, внешне мало отличающиеся от традиционных ламп, в настоящее время являются достаточно динамично развивающимся направлением на рынке светодиодного освещения. Они стали одним из акцентов прошедшей в г. Франкфурте-на-Майне выставки Light+Building 2012 [17]. Подобные лампы были представлены в очень большом количестве, что, по мнению специалистов, отражает растущий спрос на них во всём мире.

Глубокое изучение предпочтений потребителей маркетологами в разных странах показало, что внешнее сходство с классическими лампами накаливания является существенным фактором, влияющим на спрос со стороны массо-

вого покупателя [17]. Отсюда появление большого числа ретрофитов с гладкими корпусами без дополнительных рёбер. Производители идут на это не слишком охотно, так как этот корпус не способствует лучшему теплоотводу, а значит, наносит ущерб эффективности охлаждения и, как следствие, сокращает срок жизни источников света. Здесь положительным фактором является то, что при привычной форме лампы и стандартном цоколе (E14 и E27) более очевидными становятся преимущества ретрофитов – экономия электроэнергии и долговечность.

Однако, как было показано в данной статье, такое сходство достигается, прежде всего, за счёт наличия у этих новинок стандартных для ламп накаливания цоколей, но отличная от ламп накаливания кривая светораспределения сильно ограничивает их использование. Применение описанной в данной статье технологии удалённого люминофора позволит решить данную проблему и сделает использование ламп-ретрофитов более широким.

Ретрофиты должны появиться на рынке довольно скоро. На выставке Light+Building 2012 многие производители обещали, что уже летом 2012 года в европейские магазины поступят первые доступные по цене ретрофиты их производства с мощностью 50 Вт. Согласно прогнозу специалистов в этой сфере, число проданных ретрофитов должно утроиться в течение ближайших 5 лет. ●

Автор – сотрудник фирмы ПРОСОФТ и физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
Телефон: (495) 234-0636
E-mail: info@prosoft.ru

ЛИТЕРАТУРА

1. Наний О.Е., Туркин А.Н. Оптические методы в информатике : учеб. пособие. – М.: Издательство Московского университета, 2010.
2. Варфоломеев Л.П. Элементарная светотехника / под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Знак, 2008.
3. Гужов С., Полишук А., Туркин А. Концепция применения светильников со светодиодами совместно с традиционными источниками света // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 1. – С. 14–18.
4. Туркин А. Применение светодиодов в светотехнических решениях: история, реальность и перспективы // Современные тех-

нологии автоматизации. – 2011. – № 2. – С. 6–21.

5. Туркин А.Н. Полупроводниковые светодиоды: история, факты, перспективы // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 5. – С. 28–33.
6. Киптик М.И. Светодиоды в наружном освещении // Светотехника. – 2009. – № 3. – С. 32.
7. Тринчук Б.Ф. Светосигнальная аппаратура на светодиодах // Светотехника. – 1997. – № 5. – С. 6–11.
8. Туркин А.Н. Светодиоды Lumileds: прошлое, настоящее, будущее // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – № 2. – С. 6–9.
9. Шуберт Ф.Е. Светодиоды : пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008.
10. Goetz W. White lighting (illumination) with LEDs // Proceedings of the 5th International Conference on Nitride Semiconductors, 25–30 May 2003.
11. Holcomb M.O., Mueller-Mach R., Mueller G.O., et al. The LED light bulb: Are we there yet? Progress and challenges for solid-state illumination // Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 1–6 June 2003.
12. Гальчина Н.А., Коган Л.М., Сошин Н.П. и др. Спектры электролюминесценции ультрафиолетовых светодиодов на основе p-n гетероструктур типа InGaN/AlGaIn/GaN, покрытых люминофорами // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41. – Вып. 9. – С. 1143–1148.
13. Kim J.K., Luo H., Schubert E.F., et al. Strongly enhanced phosphor efficiency in GaInN white light-emitting diodes using remote phosphor configuration and diffuse reflector cup // Japanese Journal of Applied Physics. – 2005. – Vol. 44. – No. 21. – Pp. L649–L651.
14. Luo H., Kim J.K., Schubert E.F., et al. Analysis of high-power packages for phosphor-based white-light-emitting diodes // Applied Physics Letters. – 2005. – Vol. 86. – No. 24.
15. Петров Д. Применение в учебном процессе современных средств разработки систем реального времени // Современные технологии автоматизации. – 2009. – № 4. – С. 80–84.
16. Бахарев И., Прокофьев А., Туркин А., Яковлев А. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц: реальность и перспективы // Современные технологии автоматизации. – 2010. – № 2. – С. 76–82.
17. Обзор новинок биеннале Light+Building 2012 // Lumen&Expertunion. – 2012. – № 1. – С. 79–87.