

Полупроводниковое освещение — уже реальность

Александр ПОЛИЩУК
a.polishuk@prosoft.ru

В статье рассмотрены характеристики нового поколения полупроводниковых ламп компании Cree и перспективы их использования в системах общего освещения.

Введение

Вот уже несколько последних лет ведутся дискуссии о применении мощных светодиодов (светодиодных ламп) в различных системах общего освещения, начиная от внутреннего (офисы, торговые центры, подземные парковки и гаражи) и заканчивая уличным. Однако все попытки разработки и внедрения полупроводниковых светильников, предпринимаемые многими ведущими компаниями мира, так и не привели к массовому их внедрению. Причин этому несколько.

Во-первых, с 2003 по 2006 годы эффективность мощных светодиодных ламп увеличилась хоть и значительно (с 20 до 47 лм/Вт), но недостаточно для конкуренции с традиционными эффективными источниками света, применяемыми в общем освещении. Это лишило их основного потенциального преимущества для конечного потребителя — экономичности.

Во-вторых, стоимость одного люмена такого источника оставалась слишком высокой, что не могло окупить первоначальные расходы при широком внедрении полупроводниковых светильников из-за отсутствия выигрыша в энергопотреблении. Снижение же эксплуатационных расходов за счет высокого ресурса было не очевидным, поскольку этот самый ресурс не был подтвержден реальным временем эксплуатации.

В-третьих, почти все производители не стремились разрабатывать полупроводниковые лампы, специально адаптированные к жестким условиям эксплуатации в системах уличного освещения, поэтому разработчики светотехнических устройств сталкивались с дополнительными проблемами, связанными с низкой эксплуатационной надежностью полупроводниковых светильников.

Несмотря на это, многие ведущие производители, крупнейшими из которых являются Nichia Corporation, Cree и Lumileds Lighting (Philips), продолжают исследования, направленные на увеличение эффективности и надежности полупроводниковых источников света. В данной статье мы расскажем о вкладе компании Cree в решение обозначенных проблем, позволившем приблизить начало

массового перехода в системах уличного освещения от традиционных источников света к полупроводниковым.

Полупроводниковые источники света компании Cree

Компания Cree, основанная в 1987 году как производитель полупроводниковых материалов на основе карбида кремния (SiC), начала активные исследования в области разработки светоизлучающих структур нитридов галлия на SiC-подложках в начале 90-х годов прошлого века. С 2005 года две компании — Nichia Corporation и Cree — обеспечивают более 80% мирового производства кристаллов синего и зеленого цвета свечения. При этом Cree традиционно использует технологию эпитаксии GaN на SiC-подложках, а Nichia Corporation — на сапфире. Технология InGaN на SiC обладает рядом принципиальных преимуществ перед InGaN на сапфире. Во-первых, карбид кремния обладает на порядок более высокой теплопроводностью (3,8 Вт/см·К у SiC против 0,3 Вт/см·К у сапфира). Это позволяет упростить решения проблемы отвода тепла от *p-n*-перехода, являющейся ключевой для кристаллов с токами более 100 мА. Во-вторых, кристаллическая решетка 6H-SiC обладает лучшим, по сравнению с сапфиром, сродством с GaN, что позволяет достичь снижения концентрации дефектов структур GaN и повысить квантовый выход кристаллов светодиодов.

До 2003 года компания Cree производила исключительно кристаллы светодиодов, номенклатура которых включала в себя типоразмеры от 200×200 мкм (20 мА) до 900×900 мкм (ХВ900, 350–700 мА). В 2003 году в лабораториях Cree был разработан принципиально новый тип кристаллов, на которых была продемонстрирована эффективность более 100 лм/Вт (белый свет, цветовая температура около 6000 К). Это заставило компанию пересмотреть свою рыночную стратегию производства исключительно материалов и кристаллов и анонсировать начало разработки корпусированных мощных светодиодных ламп. Около года потребовалось специалистам Cree для разработки полупроводниковых ламп и тех-



Рис. 1. Первая светодиодная лампа Cree XL7090

нологических процессов производства, селекции и контроля параметров. С июля 2004 года началось массовое производство двух первых семейств — XL7090 (кристалл ХВ900, типовая эффективность в белом свете 47 лм/Вт при токе 350 мА) и XL4550 (кристалл ХВ500, основные цвета в диапазоне длин волн от 455 до 635 нм).

Главной особенностью приборов Cree стал корпус (рис. 1). В отличие от остальных производителей, Cree впервые для массового продукта применила металлокерамический корпус с так называемой «плавающей» линзой из кварцевого стекла. Это позволило потребителям получить сразу несколько важных преимуществ.

Во-первых, электрически изолированное теплоотводящее основание упрощает конструирование кластеров светодиодных ламп.

Во-вторых, эвтектическая посадка кристалла на металлизированную керамическую подложку снимает проблему механических напряжений, возникающих за счет большой разницы в температурных коэффициентах объемного расширения подкристалльной платы и материала основания корпуса прибора в процессе его эксплуатации при отрицательных температурах. Эта проблема хорошо известна для корпусов приборов типа Luxeon I, III (Lumileds Lighting), в которых кристалл установлен на медном основании. Включение такого прибора при температуре ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ сопровождается большими механическими напряжениями на кристалл, способными вывести его из строя.



Рис. 2. Светодиодная лампа Cree семейства XR7090

В-третьих, корпус не содержит никаких пластмассовых деталей, не требует предварительного приклеивания, что позволяет использовать для монтажа стандартные автоматизированные линии, значительно снижая себестоимость конечных изделий. Линза из кварцевого стекла устойчива к воздействию УФ-излучения, что гарантирует длительный срок эксплуатации в условиях освещения прямым солнечным светом. Подвижность линзы не только защищает от напряжений контактную систему, но и позволяет сохранять фокусировку в широком температурном диапазоне.

Дальнейшее совершенствование корпуса в семействе XR7090 (рис. 2) происходило, в основном, в направлении изменения конструкции рефлектора и, самое главное, снижения теплового сопротивления между *p-n*-переходом и теплоотводящим основанием до 8 °C/Вт.

В настоящее время Cree производит несколько семейств полупроводниковых ламп (табл. 1). Семейство XL4550 предназначено для создания систем подсветки ЖК-панелей мониторов больших площадей и интерьерной подсветки. Семейство XR7090 предназначено для приложений, в которых упор делается на

Таблица 1. Стандартная номенклатура светодиодных ламп Cree

Цвет	Типовая эффективность, Лм/Вт, при токе			
	XL4550 (125 мА)	XR7090 (350 мА)	XR-C7090 (350 мА)	XR-E7090 (350 мА)
Глубокий голубой (455–465 нм)	8	15	–	400 мВт/Вт
Голубой (465–475 нм)	9	17	–	39
Бирюзовый (500–510 нм)	–	38	–	–
Зеленый (520–535 нм)	36	44	–	–
Янтарный (585–595 нм)	29	60	–	–
Красно-оранжевый (610–620 нм)	–	70	–	–
Красный (620–635 нм)	40	57	–	–
Белый холодный (5000–10 000 К)	–	47	54	100
Белый естественный (3500–5000 К)	–	39	46	70
Белый теплый (2600–3500 К)	–	29	37	63

цвет: архитектурное освещение, дорожные светофоры, системы световой сигнализации, RGB-решения и т. п. Полупроводниковые лампы нового семейства XR-C7090 используют кристалл серии EZ700 (700×700 мкм). Эффективность при токе 350 мА соответствует приблизительно приборам семейства XR7090 с кристаллом предыдущего поколения XB900. Однако благодаря меньшей площади кристалла стоимость его в массовом производстве намного ниже, соответственно, ниже стоимость ламп на его основе. Поэтому XR-C7090 позиционируется производителем как эффективное решение для бюджетных приложений, когда фактор цены является определяющим: его цена ниже на 35% даже по сравнению с XR7090.

И, наконец, остановимся более подробно на полупроводниковых лампах для систем общего освещения XR-E7090.

Семейство полупроводниковых ламп XR-E7090 для систем общего освещения

Семейства полупроводниковых ламп XR-E7090 и XR-C7090 базируются на новых кристаллах типа EZBright — EZ1000 (рис. 3) и EZ700 соответственно. Это семейство кри-

сталлов Cree разрабатывала с 2004 года, а для их массового производства потребовалось строительство новой фабрики, а также переход на SiC-подложки диаметром 100 мм со сверхнизкой плотностью дефектов, разработка новых технологических процессов. В результате удалось добиться рекордных показателей эффективности. Так, кристаллы типа EZR260 обеспечивают квантовый выход 55–75%, а самые большие кристаллы EZ1000 имеют типовой квантовый выход 40–55%. Кроме того, удалось получить прямое падение напряжения на номинальном токе на 20% ниже, чем у семейства XB900 и кристаллов других производителей.

Семейство EZBright имеет ряд принципиальных технологических отличий. Как и раньше, используется эпитаксия на SiC-подложке толщиной 100 мкм. Однако после формирования светодиодной структуры SiC-подложка стравливается через маску до 35 мкм с образованием линзовой системы. Последняя обеспечивает сборку светового потока с поверхности структуры и формирует стандартное (ламбертовское) распределение. Это позволяет упростить решение проблемы плотности распределения люминофора при его нанесении на кристалл, поскольку деградация *p-n*-перехода не приводит к изменению плотности распределения светового потока на выходе кристалла.

Второе важное отличие заключается в применении новой контактной системы в кристаллах EZ1000. Контактная система имеет две точки приварки проводников и выполнена таким образом, чтобы минимизировать площадь контактов на поверхности кристалла. Это позволило увеличить площадь поверхности излучения до 90%, а параллельное соединение перемычек контактов катода дополнительно вдвое снизило потери проводимости при токах свыше 350 мА.

Как известно, в белых светодиодах помимо кристалла важнейшее влияние на качественные и эксплуатационные характеристики оказывает люминофор. В предыдущих семействах Cree использовались высококачественные люминофоры компании Nichia Corporation. Однако после предварительных испытаний образцов семейства XR-E7090 стало понятно, что имеющиеся люминофоры уже не удовлетворяют требованиям к приборам для

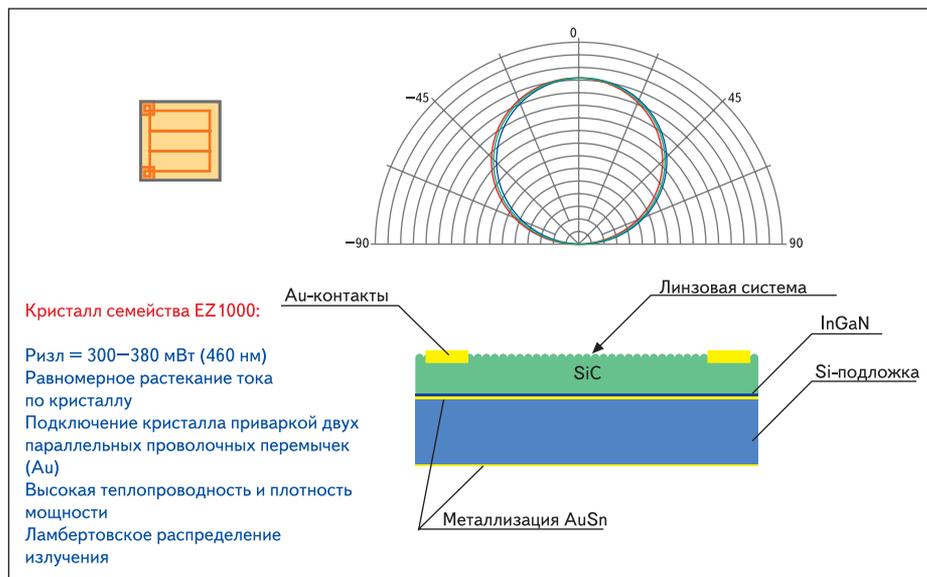


Рис. 3. Кристалл семейства типа EZBright™, EZ1000

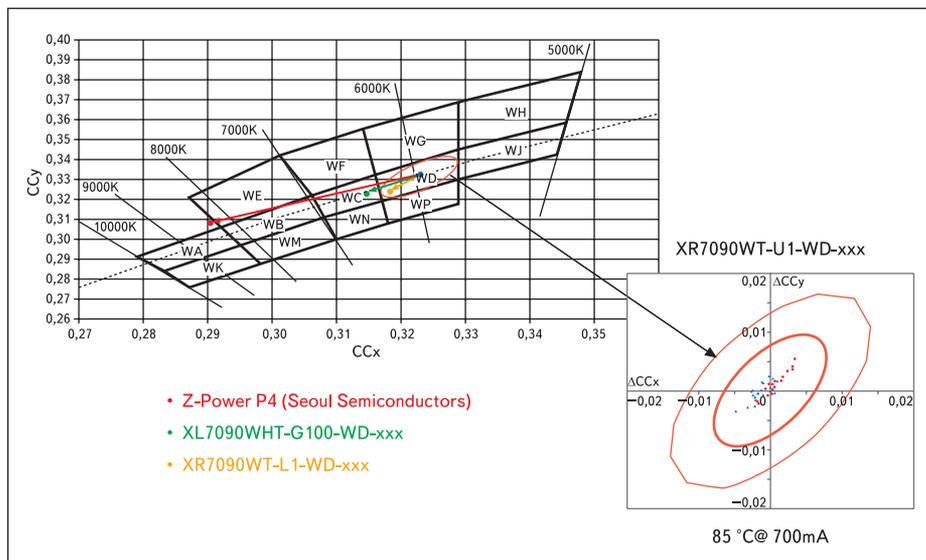


Рис. 4. Изменение координат цветности при деградации люминофора (+85 °С, 1000 часов)

общего освещения. Основные проблемы — низкая эффективность и высокая скорость деградации. Последнее особенно важно, поскольку изменение координат цветности приводит к изменению визуального восприятия света, а в случае применения кластеров приводит к разбросу цветности (свет становится «разноцветным» с оттенками от синего до красного).

Для решения этих проблем Cree стала разрабатывать собственные люминофоры. В результате были получены уникальные люминофоры, защищенные международными патентами. Иллюстрация поведения люминофоров различных поколений приведена на рис. 4. Испытания проводились в течение 1000 часов при температуре окружающей среды +85 °С (температура кристалла +125 °С). Как видно из рис. 4, люминофор первого поколения (типовой для всех производителей) при ускоренной деградации не обеспечивает нахождения координаты цветности в области селекции. Несколько лучше ситуация с люминофором в семействе

XR7090: координата цветности хоть и смещается, но все же остается в требуемой области. Для примера приведены испытания светодиода компании Seoul Semiconductors Z-Power P4. В нем использован кристалл Cree EZ1000, но применен дешевый люминофор с низкими потерями. Как можно видеть, цветовая температура через 1000 часов изменяется с 6000 до 8000 К (визуально светодиод «синет»). Очевидно, что подобный прибор не может быть использован в системах освещения, где предполагается длительная непрерывная работа и высокая стабильность световых характеристик.

Что касается нового поколения XR-E7090, то среднестатистический дрейф координат цветности не превысил значений $\Delta X = 0,003$, $\Delta Y = 0,003$. Столь высокие показатели стабильности цветных характеристик позволяют гарантировать высокое качество света в течение всего срока службы светильника.

Претерпела изменение и технология нанесения люминофора. В предыдущих семействах XL7090 и XR7090 взвесью люминофора



Рис. 5. Светодиодная лампа Cree нового семейства XR-E7090

в геле заполнялся весь объем внутри рефлектора между кристаллом и первичной линзой (рис. 2). Это упростило технологический процесс, но при этом обнаружались два серьезных недостатка. Во-первых, наблюдалась существенная цветовая неоднородность спектра, а во-вторых, практически отсутствовала возможность создания вторичной оптики приемлемых геометрических размеров с углами рассеивания менее $\pm 10^\circ$ из-за слишком большой площади излучения. В новых семействах люминофор наносится непосредственно на кристалл (рис. 5), что позволяет практически полностью устранить указанные недостатки.

В результате Cree удалось получить массовое изделие с уникальными эксплуатационными характеристиками, обеспечивающее типовую эффективность 80–100 лм/Вт при токе 350 мА (в диапазоне цветových температур 5500–6500 К) и потребляемую мощность 1,07 Вт. Селективные приборы обеспечивают световой поток до 114 лм при токе 350 мА и 180 лм при 700 мА (электрическая мощность 2,3 Вт).

Сравнение эффективности приборов семейства XR-E7090 с аналогичными продуктами других крупнейших производителей приведено на рис. 6. До появления XR-E7090

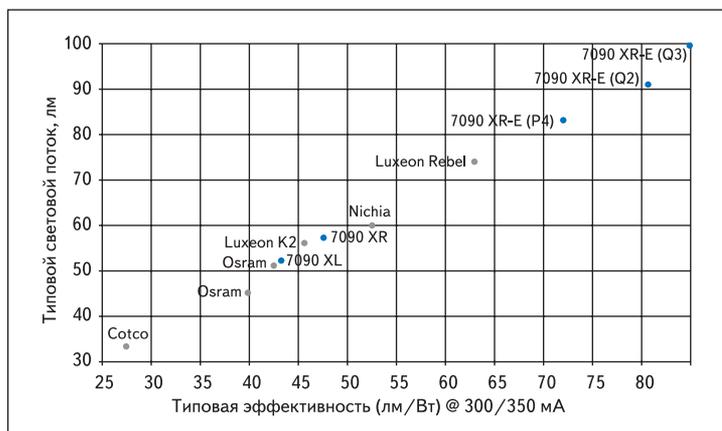


Рис. 6. Эффективность светодиодных ламп различных производителей (по состоянию на II квартал 2007 г.)

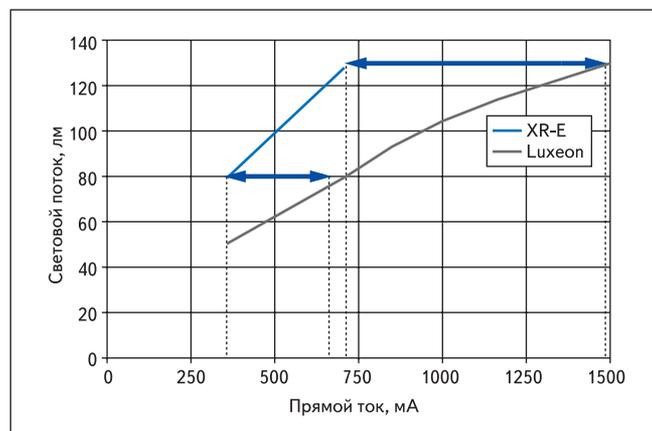


Рис. 7. Зависимость светового потока от прямого тока светодиодов Cree XR-E7090 и Luxeon K2



Рис. 8. Подземный паркинг в г. Роли (Северная Каролина, США)



Рис. 10. Светодиодные уличные светильники

Таблица 2. Сравнительные характеристики различных источников света и светодиодных ламп Cree

Тип источника	Эффективность, лм/Вт	Реальная эффективность, лм/Вт	Наработка, час
Лампы накаливания	8–13	6–10	1000
Галогенные лампы	16–22	12–20	2000
Cree XLamp 7090 XR	47	47	>50 000
Компактные люминесцентные лампы	50–70	35–50	10 000
Металлогалогенные	60–100	<40	6000–15 000
Cree XLamp 7090 XR-E	100	100	>50 000
Люминесцентные	60–100	55–70	15 000
Натриевые лампы высокого давления	90–130	<50	15 000

наибольший световой поток обеспечивал новый мощный светодиод Luxeon K2 компании Lumileds Lighting, способный работать при токе до 1,5 А. Как видно из рис. 7, Luxeon K2



Рис. 9. Офисные светильники на светодиодах

обеспечивает при токе 1500 мА тот же световой поток, что и XR-E7090 при токе 700 мА, потребляя при этом в три раза большую мощность. В этом нет ничего удивительного: ведь с ростом тока эффективность кристалла падает, поэтому достижение больших значений светового потока за счет увеличения рабочих токов является тупиковым путем.

Достиженные компанией Cree показатели эффективности впервые позволили говорить о конкуренции полупроводниковых источников света с большинством традиционных ламп. В таблице 2 приведены сравнительные характеристики большинства традиционных источников света с двумя семействами светодиодных ламп — XR7090 (представитель предыдущих поколений светодиодов) и XR-E7090. Под «реальной» эффективностью в таблице 2 понимается та часть светового потока источника, которая остается после рассеивания и потерь в реальных светильниках. Нетрудно видеть, что XR-E7090 не только конкурирует, но и превосходит многие из традиционных источников света.

Полупроводниковое освещение

Применение полупроводниковых источников света в системах общего освещения пока не носит массового характера. Из открытых источников можно составить лишь приблизительную картину об областях внедрения светодиодов в осветительные приборы за рубежом. Так, около 60% проектов составляют системы освещения торговых площадей и ресторанов, 30% — частных подземных гаражей (рис. 8), 7% — внутреннее освещение офисов (рис. 9) и лишь около 3% — единичные проекты в уличном освещении (рис. 10).

В 2007 году прогнозируется начало серьезных проектов по применению полупроводниковых источников света в уличном освещении. Так, в феврале 2007 года был анонсирован совместный проект компаний Cree,

Lighting Science Group Corporation и правительства штата Северная Каролина под названием LED City («Светодиодный город»). Проект предусматривает перевод муниципального освещения столицы штата г. Роли на полупроводниковое, включая уличное освещение, освещение подземных гаражей, пешеходных переходов, парков, архитектурной и акцентной подсветки. Экономические расчеты, проведенные по заказу муниципалитета г. Роли, показали, что экономия электроэнергии после реализации этого масштабного проекта составит около 40%, а срок окупаемости первоначальных затрат составит около 3 лет. Проект будет выполнен полностью на светодиодах Cree XR-E7090 (в приборах общего освещения) и XR7090 (в приборах для архитектурного и акцентного освещения). Помимо замены традиционных светильников на полупроводниковые, будет применена система интеллектуального управления освещением ODL (Optimized Digital Lighting), позволяющая управлять потреблением электроэнергии в зависимости от изменения внешних условий (уровня освещенности, наличия людей в зоне освещения и т. п.). Уже в течение последующих 18 месяцев планируется полностью переоборудовать систему освещения делового центра с населением более 350 000 человек.

В нашей стране попытки внедрения полупроводниковых источников света в общее освещение предпринимаются только отдельными энтузиастами и не имеют пока ни одной масштабной реализации. Однако в последнее время ряд российских производителей традиционных осветительных приборов обращает пристальное внимание на светодиоды, как возможность вывести свою продукцию на новый технологический уровень и тем самым получить значительное конкурентное преимущество на рынке. Это вселяет надежду на изменение ситуации с инновациями в нашей стране в области светотехники. ■