

Термический анализ радиаторов и кристаллов мощных светодиодных модулей при разных материалах теплового интерфейса¹

Д. РАУЛ, К. ГХОШ

Джадавпурский университет, Колката, Индия
E-mail: debashis.raul@gmail.com, kamalikhosh4@gmail.com

Аннотация

Оптические характеристики и надёжность светодиодов (СД) напрямую зависят от их самонагрева. Важное значение имеет рассеяние в окружающее пространство тепла, которое вырабатывается СД, и обеспечение таких же, как заявленные производителями, характеристик СД источников света. Тепловые интерфейсы размещают между радиатором и источником света для уменьшения контактного сопротивления на границе между подложкой и радиатором СД модуля. В данной работе проведена оценка материалов тепловых интерфейсов (МТИ). При этом рассмотрены как характеристики применяемых на практике МТИ, так и связанные с их использованием проблемы. Это исследование позволит рассчитывать распределение температуры радиатора при использовании МТИ разных типов с разными значениями теплопроводности, определять возможности радиатора в части рассеяния тепла и соответствующим образом конструировать радиатор. Кроме того, при помощи моделирующего пакета программ COMSOL применительно к СД матрицам с бескорпусным монтажом кристаллов на печатной плате (CoB СДМ) проведено исследование имеющих разную толщину МТИ при разных значениях входного тока. Полученные результаты говорят о том, что при увеличении входного тока и толщины слоя МТИ имеет место увеличение температуры $p-n$ -перехода и уменьшение срока службы СДМ.

Ключевые слова: способность к рассеянию тепловой энергии, радиатор, температура $p-n$ -перехода, световой поток, материал теплового интерфейса, тепловая прокладка.

1. Введение

В современном мире твердотельные осветительные устройства, такие как светодиоды (СД), имеют преимущество перед всеми традиционными источниками света, что обусловлено их низким энергопотреблением, большими сроками службы, экологической безопасностью и мгновенным зажиганием. В настоящее время реальные световые потоки СД устройств не соответствуют заявленным производителями. При этом многие производители перегружают СД для увеличения их световых потоков. Это послужило причиной проведения экспериментальных исследований зависимости фотометрических характеристик СД от времени при разных значениях питающего тока [1]. Опыт практического применения СД показал, что ненадлежащее рассеяние тепла приводит к отказам СД. Поэтому для светильников с СД большое значение имеет управление их тепловым режимом [2, 3], так как увеличение температуры $p-n$ -перехода приводит к уменьшению светового потока, световой отдаче и, конечно, надёжности этих светильников [4–7].

При увеличении тока питания СД увеличивается, конечно, и его световой поток [8], но при этом увеличиваются и выделение тепла, энергопотребление и т.д. А при увеличении температуры $p-n$ -перехода световой поток СД уменьшается. В [9] описан метод определения температуры $p-n$ -перехода на основе генерируемого в устройстве фототока. В [10] предложена динамическая система измерения температуры $p-n$ -перехода СД, калибровка которой включает в себя калибровку самого прибора и калибровку k -фактора. При этом в рамках динамического исследования температуры $p-n$ -перехода было проанализировано влияние быстрого переключения и определены погрешности измерений, обусловленные задержкой

выборки (*sampling delay*). Кроме того, в [10] был проведён сравнительный эксперимент, направленный на подтверждение точности этой системы, продемонстрировавший хорошее соответствие между экспериментальными данными и опорными значениями. В [11] для измерения температуры $p-n$ -перехода СД был изготовлен гибкий температурный микродатчик сопротивления, которым определение температуры производилось исходя из линейной зависимости между температурой и сопротивлением. В [12] реализована основанная на термосопротивлении аналитическая модель мощных СД матриц (СДМ) с бескорпусным монтажом кристаллов на печатной плате (CoB СДМ) и подложкой для силовых электронных приборов; правильность этой модели была подтверждена посредством сравнения с результатами анализа, проведённого методом конечных элементов. Эта модель позволила понять влияние конструктивных параметров (например, свойств материалов, расстояния между СД, толщины подложки и т.д.) на тепловое сопротивление СД. В [13] рассмотрено влияние сжатия тока на тепловое сопротивление СД и его изменение при изменении питающего тока. В этой работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование растекания тока в мощных СД с перевёрнутыми кристаллами и его влияние на тепловое сопротивление. В [14] различные токи использовались для определения температуры $p-n$ -перехода мощных СД при равной 1 МГц частоте опроса.

В [15] исследование распределения температуры устройства с СДМ было проведено при помощи числовых моделей переноса тепла и соединения терморезисторов, а также трёхмерной вспомогательной модели этого устройства, позволяющей проводить расчёты методом конечных элементов. Это обеспечило возможность прогнозировать температуры кристалла и всей системы в целом и облегчило расчёт влияния на работу устройства с СДМ таких параметров, как плотность компоновки СДМ и плотность энерговыделения, а также позволило провести сравнение активных и пассивных способов охлаждения. Прямое измерение температуры $p-n$ -перехода СД очень затруднительно, поэтому был разработан альтернативный метод, основанный на вольт-ампер-

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

Характеристики СДМ

СДМ	Мощность, Вт	Входной ток (постоянный), мА	Входное напряжение (постоянного тока), В	КЦТ, К	Размеры (диаметр x высота), мм	Материал радиатора
CoB СДМ холодно-белого света	5	300	18	6500	75×22	Алюминиевый сплав
SMD СДМ холодно-белого света	3	300	18	6500	90×55	Алюминиевый сплав

ных характеристиках мощных серийно выпускаемых СД. Этот метод был использован для измерения шести различных температур в диапазоне от 295 до 400 К [16]. Было проведено сравнение тепловых характеристик различных предназначенных для мощных СД подложек, таких как стандартная стеклотекстолитовая подложка (*FR4*) и изолированная металлическая подложка (*IMS*), и при этом основное внимание было обращено на стоимость и размеры [17]. Более полное понимание теплового режима работы СДМ можно обеспечить посредством проведения углублённого анализа переноса тепла при работе устройства [18]. Причины отказа СД являются одной из важнейших проблем, которые необходимо решить. Главные виды отказов, такие как дефекты клеевых соединений, некачественное закрепление кристаллов и иные дефекты, связанные с плохим корпусированием, были проанализированы на примере целого ряда отказов [19]. Мощные СДМ, корпусированные с линзами разной формы и разных размеров, были исследованы после испытания на тепловое старение как экспериментальными, так и численными методами [20].

Хотя заявленные сроки службы СД очень велики, в тропических странах они оказываются очень малыми. Поэтому были проведены экспериментальные исследования температуры основных элементов имеющихся в продаже мощных СДМ, таких как кристалл и радиатор [21, 22]. В качестве ускоряющих процессы факторов рассматривались влажность и высокая температура окружающей среды, особенно при исследованиях механизмов отказов, связанных с оптической деградацией [23, 24]. В [23, 24] эксперименты проводились с использованием имеющих различные теплопроводности материалов тепловых интерфейсов (МТИ) трёх типов. Основное назначение МТИ состоит в устранении воз-

Рис. 1. Выбранные СДМ с внешними устройствами управления



душных зазоров или объёмов (которые действуют как теплоизоляторы) из области интерфейса для максимизации передачи тепла. Температура дальней поверхности радиатора измерялась с интервалом до 1 ч, и полученные результаты были проанализированы. Ещё одно моделирование было проведено применительно к СДМ с бескорпусным монтажом кристаллов на печатной плате (*CoB* СДМ) при разных значениях входного тока и толщины слоя МТИ, и результаты моделирования были проанализированы.

В данной работе описана методика проведения эксперимента, проведён анализ полученных экспериментальных данных (температура дальней поверхности радиатора) и выведена новая формула для расчёта температуры *p-n*-перехода СД, которую нельзя измерить непосредственно. Была также выведена эмпирическая формула, позволяющая оценить или рассчитать температуру поверхности радиатора по истечении разного времени работы СД. В рамках данной работы увеличивали питающий ток СД и толщину слоя МТИ, что приводит к увеличению температуры *p-n*-перехода СДМ и уменьшению её срока службы.

2. Выбор СДМ и материала теплового интерфейса

В данной работе использовались по десять выпускаемых одним производителем и имеющих одинаковую структуру светящихся вниз (даунлайт)

серийных СДМ с бескорпусным (*CoB*) и поверхностным (*SMD*) монтажом кристаллов на печатной плате (рис. 1). МТИ двух типов были приобретены, а не предоставлены производителем. Характеристики СДМ и материалов приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Радиатор из алюминиевого сплава окружает корпус СДМ сзади. Типичные устройства управления расположены вне СДМ.

3. Методика проведения экспериментов

3.1. Измерение световых потоков СДМ и температуры радиатора

В рамках этой методики выбранные серийные светильники с *CoB* СДМ и с *SMD* СДМ, которые были предоставлены производителем, один за другим помещались в интегрирующую сферу для измерения их фотометрических и электрических характеристик. Температура в окрестности расположенного внутри интегрирующей сферы СДМ поддерживалась равной 25 °С. СДМ выдерживались при этой температуре до достижения термического равновесия, что занимало примерно 45 мин, после чего их включали в номинальный режим работы. Время стабилизации параметров работающего в интегрирующей сфере СДМ во всех случаях составляло 30 мин. Затем в соответствии с индийским стандартом *IS:16106,2012* из-

Характеристики МТИ

Наименование материала	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Типичная толщина, мм
Тип 1: термопаста	0,50	0,0825
Тип 2: несиликоновая термопаста	0,72	0,0825
Тип 3: термопрокладка	0,90	0,3–0,32

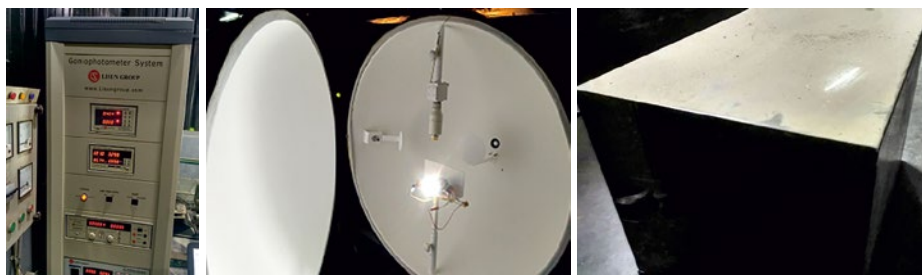


Рис. 2. Экспериментальная установка

меряли фотометрические характеристики, т.е. световой поток, СДМ. Измерения фотометрических и электрических характеристик СДМ осуществлялись в соответствии с рекомендациями *IESNA LM-79* в части измерений фотометрических и электрических характеристик изделий с СД. Следующим шагом было измерение температуры поверхности радиатора. Для этого использовалась изготовленная из фанеры камера размером 350×350×350 мм, температура внутри которой в соответствии с требованиями Объединённого инженерного совета по электронным устройствам (*JEDEC*) [25] поддерживалась равной 25–27 °С. Каждый из СДМ устанавливался горизонтально в геометрическом центре камеры, после чего на расстоянии полфута (16 см) от дальней поверхности радиатора помещался тепловизор *Ti400* производства компании *Fluke*. Температуру дальней поверхности радиатора регистрировали сразу же после включения СДМ, а затем через каждые 5 мин в течение часа. При этом МТИ был тем же, что и используемый производителем при изготовлении СДМ, а именно, термопаста (тип 1, коэффициент теплопроводности 0,50 Вт/(м·К)). Во время проведения тепловизионных измерений относительная влажность в камере составляла 45 %.

Затем используемый производителем МТИ удалялся, после чего между подложкой и радиатором размещали другой МТИ, а именно, несиликоно-

вую термопасту (тип 2) с более высокой теплопроводностью, равной 0,72 Вт/(м·К), и описанные выше измерения проводили применительно ко всем СДМ, после чего этот имеющий более высокую теплопроводность несиликоновый МТИ также удаляли и заменяли на термопрокладку (тип 3). Затем вновь проводили описанные выше измерения фотометрических и электрических характеристик.

В каждом случае описанные выше измерения проводились по десять раз, и полученные средние результаты использовались при проведении расчётов и построении приведённых ниже графиков.

Фотометрические характеристики (световой поток) СДМ обоих типов (и *CoB*, и *SMD*) измеряли при помощи фотометрического шара диаметром 1,0 м. В качестве фотоприёмника использовался хроматр *CL 200A* компании *Konica Minolta*. При проведении измерений температура в окрестности СДМ поддерживалась равной примерно 25 °С. Для этого в интегрирующую сферу был помещён дополнительный термометр. Температура поверхности радиатора измерялась при помощи тепловизора *Ti400* производства компании *Fluke*. *Ti400* имеет температурную чувствительность ≤ 0,05 °С при 30 °С. Выходные напряжение постоянного тока и ток устройства управления измерялись в точках подключения этого устройства к СДМ. В данной работе все СДМ работали

3.2. Модель *CoB* СДМ

Для проведения исследований был выбран *CoB* СДМ мощностью 5 Вт. Диаметр и высота алюминиевого радиатора были равны, соответственно, 75 и 22 мм. При моделировании тепловых процессов в роли источника тепла выступает кристалл, диаметр и высота которого составляли, соответственно, 2 и 0,1 мм. Трёхмерная модель СДМ была сформирована при помощи пакета программ *COMSOL*. СДМ соединялся с радиатором при помощи МТИ типа 1 (обычно используемая производителем термопаста с коэффициентом теплопроводности 0,50 Вт/(м·К)), типа 2 (предлагаемая термопаста с коэффициентом теплопроводности 0,72 Вт/(м·К)) и типа 3 (предлагаемая термопрокладка с коэффициентом теплопроводности 0,90 Вт/(м·К)). Начальная толщина МТИ типов 1 и 2 была равна 0,0825 мм,² тогда как МТИ типа 3 имел толщину 0,1 мм. В модели *CoB* СДМ для всех вариантов МТИ была сформирована сетка. Токи питания СДМ были выбраны равными 80, 130, 180, 230 и 300 мА, а входное напряжение СДМ было равно 18 В постоянного тока. При указанных значениях тока питания потребляемая СДМ мощность была равна, соответственно, 1,44, 2,34, 3,24, 4,14 и 5,4 Вт. Что касается эффективности СДМ, то считалось, что 80 % потребляемой СДМ мощности рассеивалось в виде тепла. Так что в сформированной при помощи *COMSOL* модели тепловыделение было задано равным 0,92·10⁹, 1,49·10⁹, 2·10⁹, 2,63·10⁹ и 3,4·10⁹ Вт/м³ соответственно. Применительно к этому моделированию граничные условия на всех поверхностях рассматриваемого СД модуля устанавливались в соответствии с равной 25 °С (300 К) температурой окружающей среды.

Для последующего моделирования были выбраны МТИ типов 2 и 3. Толщина каждого из МТИ выбиралась вдвое большей (0,165 мм в случае МТИ типа 2 и 0,2 мм в случае МТИ типа 3). После этого сформированная в *COMSOL* модель оставалась такой же, как и ранее, и использовалась для получения значений требуемых параметров.

² Потрясающая точность! – Прим. пер.

Световые потоки при использовании разных МТИ между подложкой СДМ и радиатором

МТИ →	Тип 1: термопаста	Тип 2: термопаста	Тип 3: термопрокладка
Теплопроводность, Вт/(м·К) →	0,50	0,72	0,90
Типы СДМ ↓	Средний световой поток, лм		
CoB СДМ мощностью 5 Вт	493,90	513,70	521,25
SMD СДМ мощностью 5 Вт	392,00	412,40	435,76

Температура поверхности радиатора при использовании трёх типов МТИ

Тип СДМ	CoB СДМ мощностью 5 Вт			SMD СДМ мощностью 5 Вт			
	МТИ	Тип 1: термопаста	Тип 2: термопаста	Тип 3: термопрокладка	Тип 1: термопаста	Тип 2: термопаста	Тип 3: термопрокладка
Теплопроводность, Вт/(м·К)		0,50	0,72	0,90	0,50	0,72	0,90
Время, мин ↓		Средняя температура, °С			Средняя температура, °С		
Начальный момент		38,4	39,2	39,8	37,1	39,3	39,7
1		39,6	43,3	47,3	37,3	39,6	44,8
5		40,7	45,4	49,0	39,8	40,2	54,6
10		41,7	46,8	50,6	39,2	45,2	59,2
15		41,6	47,1	51,5	38,4	44,8	59,4
20		42,3	47,5	51,3	39,6	46,7	61,6
25		42,8	47,7	51,5	39,3	46,8	66,4
30		42,5	47,2	51,9	40,3	46,7	70,7
35		42,7	47,2	51,8	41,8	48,0	70,8
40		43,1	47,3	52,0	40,5	48,9	69,8
45		43,8	47,6	51,8	41,9	48,6	68,8
50		44,0	47,3	51,7	42,6	47,0	69,4
55		44,9	47,4	51,8	43,5	48,6	70,3
60		45,2	47,8	51,7	43,3	49,0	69,7

4. Результаты и анализ

4.1. Распределение температуры по поверхностям радиаторов СДМ при использовании МТИ разных типов

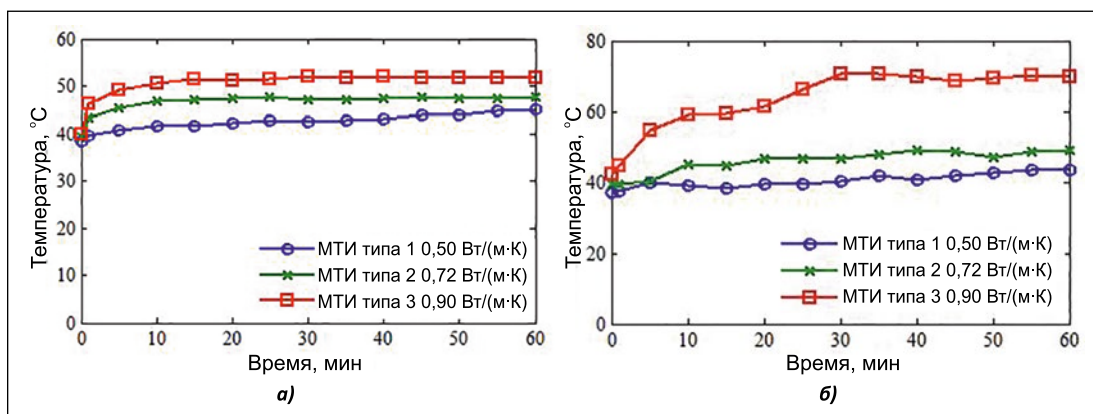
Оптические параметры измеряли применительно к СДМ двух типов при помещении различных МТИ между подложкой и радиатором. В данной работе использовали МТИ трёх типов, имеющие разные теплопроводности (табл. 2). В каждом рассмотренном случае измеряли световой поток СДМ. Эти оптические параметры измерялись десять раз, и средние результаты измерений приведены в табл. 3.

Номинальный световой поток *CoB* СДМ мощностью 5 Вт больше номинального светового потока *SMD* СДМ мощностью 5 Вт. В данной работе ясно показано, что на световой поток непосредственно влияет теплопроводность МТИ, который используется с СДМ. При увеличении теплопроводности увеличивается и световой поток СДМ. Из-за низкой теплопроводности термопасты тепло накапливается на границе между подложкой СДМ и радиатором, что приводит к увеличению температуры кристаллов СДМ и достижению ею высокого уровня, а это приводит к ухудшению генерации фотонов и, как следствие, к уменьшению светового потока. Так что рассеяние

тепла кристаллами СДМ является одним из важных факторов, влияющих на возможность обеспечения номинального светового потока СДМ рассматриваемых типов, которую можно улучшать за счёт использования МТИ с более высокой теплопроводностью.

Температуру поверхности радиатора измеряли при работе СДМ обоих типов. Её измеряли сразу же после включения СДМ, а затем через каждые 5 мин в течение часа. В табл. 4 приведены зависимости средней температуры поверхности радиатора для СДМ обоих типов и всех трёх имеющих разную теплопроводность МТИ. Экспериментальные результаты, приведённые на рис. 3, демонстрируют за-

Рис. 3. Зависимость температуры поверхности радиатора от времени для CoB СДМ мощностью 5 Вт (а) и SMD СДМ мощностью 5 Вт (б) при равной 25 °С температуре окружающей среды и использовании трёх типов МТИ



висимости температуры поверхности радиатора от продолжительности работы СДМ для всех трёх типов МТИ.

Связь между температурой поверхности радиатора (T) и продолжительностью работы СДМ (t) можно описать при помощи следующего уравнения:

$$P = C \cdot \rho \cdot V \cdot (dT/dt) + \alpha \cdot S \cdot (T - T_{amb}), \quad (1)$$

где P – мощность СДМ, C – удельная теплоёмкость материала радиатора (алюминия), ρ – плотность материала радиатора (алюминия), V – объём радиатора, α – коэффициент теплоотдачи, S – площадь поверхности радиатора, T_{amb} – температура окружающей среды.

Решив уравнение (1), получаем:

$$T = T_{amb} + (P/(\alpha \cdot S)) \times \{1 - \exp[-\alpha \cdot S/(C \cdot \rho \cdot V) \cdot t]\}, \quad (2)$$

или

$$T = T_{amb} + a_1 \cdot [1 - \exp(-a_2 \cdot t)], \quad (3)$$

где $a_1 = P/(\alpha \cdot S)$, $a_2 = \alpha \cdot S/(C \cdot \rho \cdot V)$. Уравнение (3) позволяет аппроксимировать измеренные зависимости температуры поверхности радиатора от продолжительности работы СДМ.

Температура в зоне p - n -перехода работающего СДМ в процессе измерений обычно увеличивалась, и в конце концов тепло отводилось от кристаллов СДМ и рассеивалось поверхностью радиатора. Рассеяние тепла обычно зависит от теплопроводности материалов, используемых при корпусировании СДМ. Вследствие низкой теплопроводности МТИ отвод тепла в окружающую среду затруднён. Как видно на рис. 3, как в случае CoB СДМ, так и в случае SMD СДМ рассеяние тепла с поверхности радиатора

ра возрастает при использовании МТИ с высокой теплопроводностью. При этом тепло, вырабатываемое в зоне p - n -перехода, лучше отводится к радиатору, что приводит к уменьшению избыточного нагрева кристаллов. Это очень полезно для СДМ, так как позволяет поддерживать должный световой поток и увеличивает надёжность СДМ.

Использование ИК датчика или термомпары для измерения температуры p - n -переходов СД в нормальных условиях очень затруднительно и не позволяет получить точные результаты. В свет преобразуется только 20–30 % подаваемой на СД электрической мощности, тогда как остальная мощность преобразуется в тепло, которое повреждает СД. Поэтому большое значение имеет отвод тепла, выделяющегося в области p - n -перехода, в окружающее СД пространство. Имеющиеся в настоящее время на рынке СДМ обычно работают не в лучшем температурном режиме, что связано с недостатком информации о температуре p - n -перехода кристаллов СД. Так что производители нуждаются в простом методе прогнозирования температуры p - n -перехода СДМ, позволяющем оценить эту температуру и сконструировать светильники с СД, имеющие прекрасную систему рассеяния тепла.

В настоящее время значения параметра ψ_{JH} , характеризующего теплоотдачу (*thermal characterization parameter*), производители СДМ получают от производителей СД кристаллов. В то же время разработчики СДМ имеют возможность измерять температуру на дальнем конце радиатора, позволяющую определять температуру p - n -перехода на основе формулы для расчёта ψ_{JH} , приведённой JEDEC применительно к передаче тепла от p - n -перехода к радиатору:

$$\psi_{JH} = (T_j - T_H)/P_d, \quad (4)$$

$$T_j = P_d \cdot \psi_{JH} + T_H, \quad (5)$$

где T_j и T_H – температура p - n -перехода и радиатора соответственно, P_d – приложенная мощность. ψ_{JH} измеряется в °C/Вт.

4.2. Результаты, полученные при моделировании СДМ

Моделирование позволяет рассчитывать распределение температуры объекта и протекающие в нём тепловые потоки. На рис. 4 показан СДМ, включающий в себя кристалл, монтажную площадку, МТИ (термопасту типов 1 или 2 или термопрокладку (тип 3)) и алюминиевый радиатор.

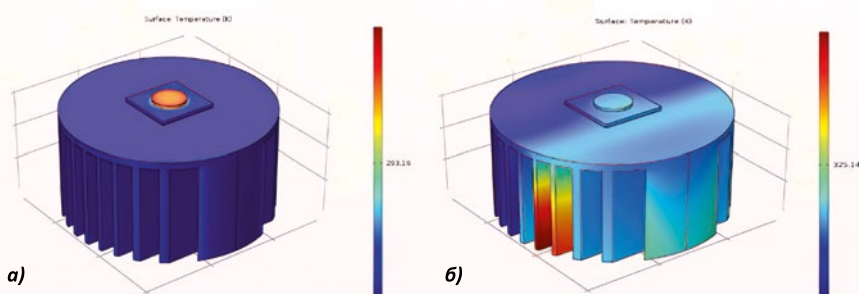


Рис. 4. Рассчитанное при помощи пакета программ COMSOL распределение температуры в случае CoB СДМ: а – в начальный момент времени, б – по истечении 1 ч

**Зависимость температуры поверхности радиатора от времени
в случае CoB СДМ**

Время горения, мин	Измеренная температура, °С*	Расчётная температура, °С
Начальный момент	39,8	27,1
1	47,3	28,2
5	49,0	33,5
10	50,6	39,0
15	51,5	47,3
20	51,3	49,5
25	51,5	49,5
30	51,9	49,7
35	51,8	50,5
40	52,0	50,9
45	51,8	51,8
50	51,7	52,1
55	51,8	52,5
60	51,7	53,1

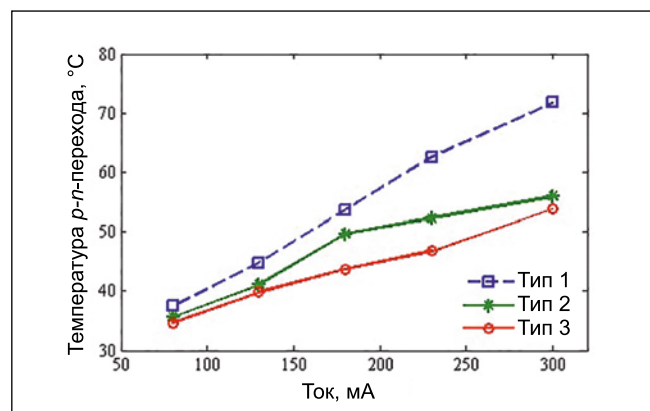
Для расчёта изменения температуры во времени при помощи пакета программ *COMSOL* было произведено моделирование переходных процессов методом конечных элементов. Считалось, что тепло передаётся от источника тепла (СД кристаллов) к радиатору, а затем посредством конвекции оно рассеивается в окружающем воздухе. Значения теплового потока, протекающего через нижнюю/наружную поверхность радиатора, а также температура *p-n*-перехода, были получены в результате теплового анализа модели СДМ. В этой модели перенос тепла осуществляется посредством теплопроводности. Результаты моделирования регистрировались для промежутка времени, равного 1 ч.

4.2.1. Распределение температуры в случае, когда с CoB СДМ в качестве МТИ используется термопрокладка

Измеренные и рассчитанные посредством моделирования изменения температуры радиатора во времени (когда в качестве МТИ используется термопрокладка) приведены в табл. 5. Измерения температуры поверхности радиатора производились при включённом устройстве. Начальная температура измерялась при помощи тепловизора. Под начальным понимается момент, соответствующий минимальному промежутку времени после включения устройства, которое требуется для измерения температуры, причём к этому моменту температура, конечно, уже начинает увеличиваться. Применительно к моделированию, начальным является момент, в точности совпадающий с моментом включения устройства. Так что при моделировании начальный результат был почти идеальным, т.е. соответствующим температуре окружающего воздуха, и поэтому измеренное начальное значение температуры оказалось выше расчётного. Во время проведения измерений температура окружающего воздуха поддерживалась равной 27 °С. Выделяемое кристаллом тепло отводится к радиатору, а затем рассеивается в окружающий воздух, так что увеличение температуры СДМ не может быть слишком большим. Типичное расчётное распределение температуры радиатора, которое продемонстрировано на рис. 4, похоже на имеющее место в действительности.

* Данные, приведённые в этом столбце и в табл. 4, вызывают недоумение. Действительно, как сказано выше, радиатор имеет диаметр 7,7 см и высоту 2,2 см, то есть его объём V равен примерно 97 см³. Даже если пренебречь отводом тепла от радиатора, для его нагрева до температуры, скажем, $T_1 = 47,3$ °С (которая согласно табл. 5 имела место по истечении 1 мин работы СДМ) требуется энергия $E_1 \leq C \cdot \rho \cdot V \cdot (T_1 - T_{amb})$. А так как радиатор изготовлен из алюминия, то $E_1 \leq 0,9 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot \text{К}) \cdot 2,7 \text{ г}/\text{см}^3 \cdot 97 \text{ см}^3 \cdot (47,3 - 27) \text{ К} \approx 4785 \text{ Дж}$, и даже если вся потребляемая СДМ мощность $P = 5$ Вт будет расходоваться на нагрев радиатора, то на нагрев радиатора до приведённой в табл. 5 температуры 47,3 °С потребуется время t_1 , не меньшее, чем $E_1/P \leq 4785/5 = 957 \text{ с} \approx 16 \text{ мин}$, а не 1 мин, как это следует из табл. 5. – Прим. перев.

Рис. 5. Зависимость температуры *p-n*-перехода от входного тока в случае CoB СДМ при использовании трёх типов МТИ



4.2.2. Анализ зависимости результатов моделирования от толщины МТИ и питающего тока в случае CoB СДМ

Моделирование проводилось двояким способом. Вначале для всех трёх МТИ рассчитывали зависимости температуры *p-n*-перехода CoB СДМ от

питающего тока при неизменной толщине МТИ (рис. 5), а затем рассчитывали зависимости температуры *p-n*-перехода как от толщины МТИ, так и от питающего тока (рис. 6). Как видно на рис. 5, при увеличении тока СДМ температура *p-n*-перехода увеличивается (почти) линейно. Наибольшее значение температуры *p-n*-перехода (по-

Рис. 6. Зависимость температуры p - n -перехода от входного тока при разной толщине МТИ типов 2 (а) и 3 (б)

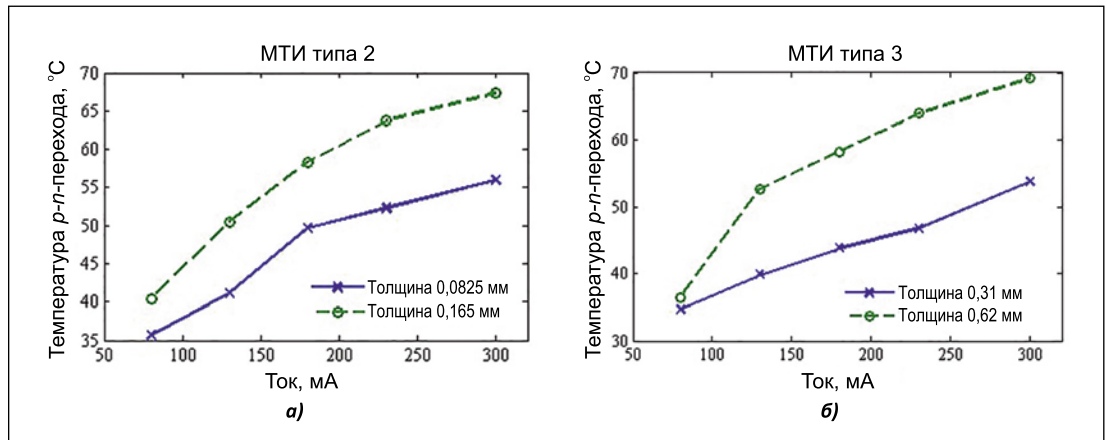
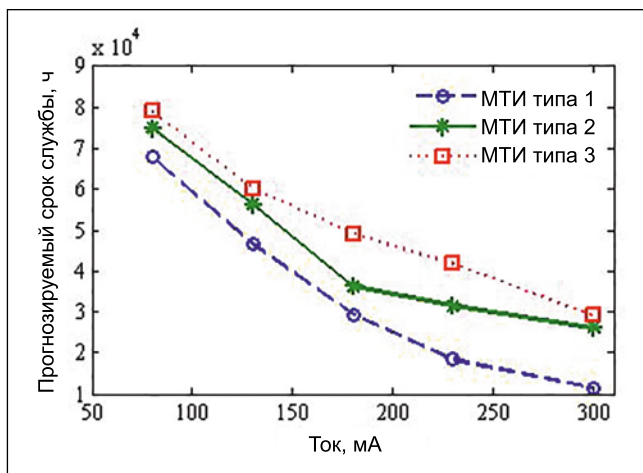


Рис. 7. Зависимость прогнозируемого срока службы от тока при использовании разных МТИ



что 72 °C) наблюдалось в случае СДМ с МТИ типа 1 при равном 300 мА значении питающего тока. В случае МТИ типа 3 температура p - n -перехода была ниже, чем при использовании МТИ других типов, и при токе 300 мА она оказалась равной 53,83 °C.

Так что можно сделать вывод, что передача тепла от p - n -перехода к радиатору или окружающему воздуху зависит от теплопроводности МТИ и прочих материалов. В данном случае теплопроводность МТИ типа 3 выше, чем у МТИ остальных двух типов.

Температура p - n -перехода СДМ меняется при изменении толщины слоя МТИ. Это видно на рис. 6, где увеличение толщины МТИ приводит к увеличению температуры p - n -перехода, причём при большей толщине МТИ зависимость температуры p - n -перехода от тока оказывается более крутой, чем при меньшей толщине МТИ,

и при токе 300 мА температура p - n -перехода оказалась равной 67,33 °C в случае МТИ типа 2 и 69,11 °C в случае МТИ типа 3.

Так что температура p - n -перехода СДМ возрастает не только при увеличении питающего тока, но и при увеличении толщины слоя МТИ.

Для производителей СД очень большое значение имеет прогнозирование сроков службы. В данной работе для прогнозирования срока службы СДМ используется экспоненциальная функция [26]:

$$L = A_{T_j} \times e^{(-n \times T_j)}, \quad (6)$$

где $A_{T_j} = 477337^3$, $n = 0,052$, а T_j – температура p - n -перехода рассматриваемого СДМ [26]⁴. Рассчитанные при помощи уравнения (6) зависимость сроков службы СДМ от питающего тока приведены на рис. 7, из которо-

го следует, что срок службы СДМ тем больше, чем меньше его ток. В данном случае срок службы СДМ с МТИ типа 3 оказался наибольшим при всех значениях питающего тока.

Аналогичным образом, для СДМ с имеющими разную толщину МТИ типов 2 и 3 были рассчитаны зависимости прогнозируемых сроков службы от питающего тока (рис. 8). Как показано на рис. 8, при увеличении толщины слоя МТИ срок службы СДМ уменьшается. При увеличении толщины слоя МТИ имеет место уменьшение отвода тепла, в результате чего возрастает температура p - n -перехода. Так что толщина слоя МТИ имеет большое значение для разработчиков и производителей СДМ.

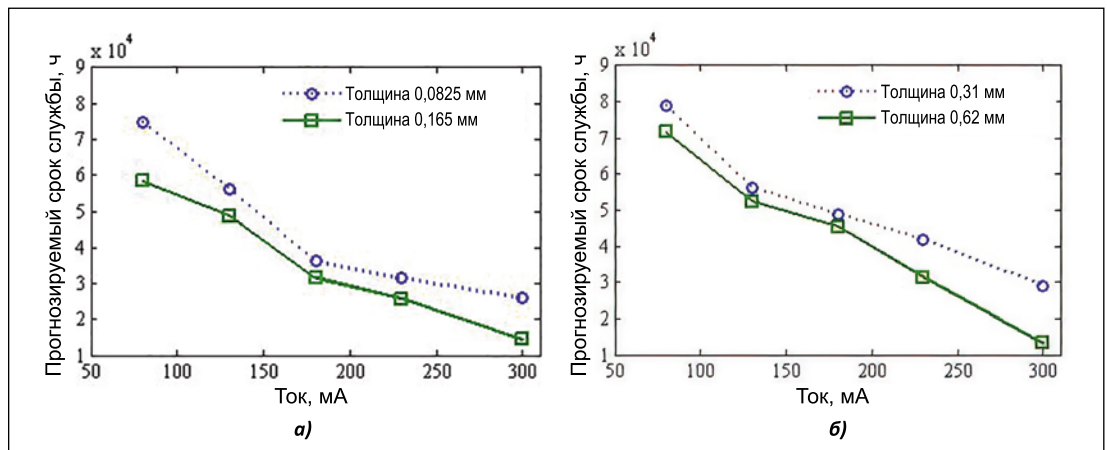
5. Заключение

Оптические и тепловые характеристики СДМ двух упомянутых типов с имеющими разные теплопроводности МТИ трёх типов были измерены в лабораторных условиях при одних и тех же значениях входных токов и мощности. В работе проведено сравнение уровней отвода тепла от СДМ с МТИ трёх типов, и результаты измерений показали, что термопрокладка обеспечивает лучшие по сравнению с двумя другими МТИ рассеяние тепла и световой поток. Установлена связь между температурой поверхности радиатора и временем работы СДМ, а также между температурой p - n -перехода и температурой радиатора СДМ. Правильный выбор теплового режима компонентов СДМ позволяет улучшить надёжность СДМ. Результаты проведённых исследований показали, что, несмотря на технический прогресс, управление тепловым режимом всё ещё остаётся

³ См. примечание 2. – Прим. пер.

⁴ 1) В статье не указаны единицы измерения параметров L и T_j , и при этом авторы настаивают на том, что постоянные A_{T_j} и n – безразмерные. 2) Если считать, что A_{T_j} и n измеряются, соответственно, в часах и 1/°C, и подставить в формулу (6) вполне приемлемую для СД температуру p - n -перехода, равную 80 °C, то получаем срок службы 7450 ч, что несколько маловато. – Прим. пер.

Рис. 8. Зависимость прогнозируемого срока службы от тока при разной толщине МТИ типов 2 (а) и 3 (б)



важным элементом разработки светодиодных ламп с СД.

Термомеханическая модель имеющихся в продаже CoB СДМ с МТИ трёх типов и разными питающими токами сформирована с использованием метода конечных элементов. Для CoB СДМ с МТИ трёх типов проведены сравнение и анализ зависимости температуры p - n -перехода от питающего тока. Наименьшее значение температуры p - n -перехода наблюдалось в случае МТИ типа 3, что обусловлено его более высокой теплопроводностью и, соответственно, обеспечиваемым им лучшим отводом тепла к радиатору. Установлено, что температура p - n -перехода увеличивается при увеличении как питающего тока, так и толщины МТИ, что приводит к уменьшению срока службы СДМ. Данную работу можно рассматривать как пример исследований, облегчающих моделирование тепловых процессов при разработке CoB СДМ. Производителям СДМ следует помнить, что температура p - n -перехода СД лампы возрастает при увеличении не только питающего тока, но и толщины слоя МТИ.

Первый автор хотел бы поблагодарить правительство Западной Бенгалии, Индия, за предоставление стипендии. Оба автора хотели бы поблагодарить светотехническую школу факультета технического проектирования и электротехники Джадавпурского университета, Колката, Индия, за оказанную поддержку и предоставление экспериментальной установки для завершения данной работы в лабораторных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Narendran, N., Maliyagoda, N., Bierman, A., Pysar, R., Overington, M. Characterizing

White LEDs for General Illumination Applications // SPIE Photonics West Conference, Jan, 2000, San Jose, CA. – P. 3938–3939.

2. Arika, M., Beckerb, C., Weaverb, S., Petroskic, J. Thermal Management of LEDs: Package to System // 3rd Int. Conf. on Solid State Lighting, SPIE. Vol. 5187, doi: 10.1117/12.512731(2004)

3. Lu, G., Hao, M., Lai, C., Yao, B. Thermal analysis and reliability evaluation on high power Flip chip LED // IEEE conf., China, 2015. ISBN: 978-1-5090-0175-0.

4. Kang, J.-M., Kim, J.-W., Choi, J.-H., Kim, D.-H., Kwon, H.-K. Lifetime estimation of high-power blue light-emitting diode chips // Microelectron. Reliab. – 2009. – Vol. 49. – P. 1231–1235.

5. Meneghini, M., Tazzoli, A., Mura, G., Meneghesso, G., Zanoni, E. A review on the physical mechanisms that limit the reliability of GaN-based LEDs // IEEE Trans. Electron Devices. – 2010. – Vol. 57. – P. 108–118.

6. Elger, G., Hanss, A., Schmid, M., Wipiejewski, T. Application of thermal analysis for the development of reliable high power LED modules // Solid State Lighting (SSLCHINA), 2014, 11th China International Forum, ISBN-978-1-4799-6696-7, pp: 158–164, 2014.

7. Song, B.-M., Han, B., Lee, J.-H. Optimum design domain of LEDbased solid state lighting considering cost, energy consumption and reliability // Microelectron. Reliab. – 2013. – Vol. 53. – P. 435–442.

8. Krames, M. R., Shchekin, O. B., Mueller-Mach, R., Mueller, G. O., Zhou, L., Harbers, G., Craford, M.G. Status and Future of High-Power Light Emitting Diodes for Solid-State Lighting // J. Display Technol. – 2007. – Vol. 3, No. 2. – P. 160–175.

9. Lock, D.A., Hall, S. R.G., Prins, A.D., Crutchley, B.G., Kynaston, S., Sweeney, S.J. LED Junction Temperature Measurement Using Generated Photocurrent // Journal of Display Technology. – 2013. – Vol. 9, No. 5. – P. 396–401.

10. Chen, Q., Luo, X., Zhou, S., Liu, S. Dynamic junction temperature measurement for high power light emitting diodes // American Institute of Physics, Review of Scientific Instruments. – 2011. – Vol. 82. – P. 084904.

11. Lee, C.-Y., Ay Su, Liu, Y.-C., Fan, W.-Y., Hsieh, W.-J. In Situ Measurement of the Junction Temperature of Light Emitting Diodes Using a Flexible Micro Temperature Sensor // Sensors. – 2009. – Vol. 9, No. 7. – P. 5068–5075; ISSN1424–8220.

12. Ha, M., Graham, S. Development of a thermal resistance model for chip-on-board packaging of high power LED arrays // Microelectronics Reliability. – 2012. – Vol. 52. – P. 836–844.

13. Chernyakov, A.E., et al. Theoretical and Experimental Study of Thermal Management in High-Power AlInGaN LEDs // IEEE Conf. (EuroSimE2014), 978-1-4799-4790-4/14.

14. Kai Han, K., Liu, M., Fan, S., Shen, H. Improved Electrical Measurement Method for Junction Temperature of Light Emitting Diodes // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN0033-2097, R. 88 NR3b/2012.

15. Christensen, A., Graham, S. Thermal effects in packaging high power light emitting diode arrays // Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29. – P. 364–371. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.03.019.

16. Keppens, A., Ryckaert, W.R., Deconinck, G., Hanselaer, P. High power light-emitting diode junction temperature determination from current-voltage characteristics // Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 104, No. 9. – P. 093104–93104–8.

17. Freisleben, J., Dzugan, T., Hamacek, A. Comparative Study of Printed Circuit Board Substrates used for Thermal Management of High Power LEDs // IEEE38th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, 978-1-4799-8860-0, 2015.

18. Mitterhuber, L., et al. Investigation of the Temperature-Dependent Heat Path of an

LED Module by Thermal Simulation and Design of Experiments // IEEE Thermic 2016–22nd Int. Workshop, ISBN978–1–5090–5450–3, 2016.

19. Guoguang, L., Shaohua, Y., Zhifeng, L. Failure analysis of LEDs // IEEE2011 Int. Symp. on Advanced Packaging Materials (APM 2011), 978–1–4673–0149–7/11, 2011.

20. Hsu, Y.C., et al. Failure Mechanisms Associated with Lens Shape of High-Power LED Modules in Aging Test // IEEE LEOS2007, P. 1092–8081.

21. Ghosh, K, Raul, D. Performance analysis of various types of high power light emitting diodes // Light and Engineering. – 2018. – Vol. 26, No. 1. – P. 91–98. doi.org/10.33383/2017–045.

22. Гхон К., Раул Д. Анализ эксплуатационных характеристик разнотипных светодиодных модулей // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 56–61.

23. Raul, D., Ghosh, K. Performance of chip-on-board and surface-mounted high-power LED luminaires at different relative humidities and temperatures // Lighting Research & Technology, doi: 10.1177/1477153518819040, 2018.

24. 25. Integrated Circuits Thermal Test Method Environmental Conditions – JEDEC Solid State Technology Association – JESD51–2A, January 2008.

26. Wang, F.-K., Chu, T.-P. Lifetime predictions of LED-based light bars by accelerated degradation test // Microelectron Reliability. – 2012. – Vol. 52, No. 7. – P. 1332–1336.

28–29 июля 2020 года прошёл семинар МКО, посвящённый двум актуальным темам – «Колориметрия МКО и 3-D печать» и «Измерения продвинутого уровня двунаправленной функции распределения коэффициента отражения, а также блеска и зернистости». В рамках вебинара были представлены учебные пособия и проведены обсуждения внесённых изменений.

Новое учебное пособие «МКО 015:2018 Колориметрия. 4-е издание» было опубликовано в 2018 году. Необходимость проведения исследований и выпуска новых уточняющих рекомендаций в этой области были связаны с эволюцией ИС, измерительных приборов, методов моделирования и оценки качества цвета. Например, доказано, что при оценке цвета от типовых СД ИС белого света с помощью стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 возникают существенные ошибки в текущей цветовой спецификации. Решение усовершенствовать колориметрическую систему МКО 1931, взяв за основу фундаментальную колбочковую теорию колориметрии МКО 2015, позволило установить связь между колориметрией и физиологией и улучшить понимание цвета. Основываясь на современных знаниях о цветовой визуальной системе человека, МКО опубликовала набор новых функций подбора цветов, учитывающих возраст наблюдателя и размер поля стимула, а также предложила метод получения соответствующей диаграммы цветности.

Другой проблемой повсеместного использования СД ИС стало разнообразие в спектрах света, что привело к новым вопросам по оценке качества цвета. В 2017 г. МКО был разработан новый индекс точности цветопередачи (CFI) для будущего обновления индекса цветопередачи МКО CRI. Однако, одного CFI или CRI недостаточно для оценки общего качества цвета ИС, результаты таких оценок часто не согласуются с восприятием цветопередачи конечными пользователями. На основе проведённых в последнее время исследований МКО планирует определить стандартные индексы, которые могут быть использованы с индексом точности цветопередачи и которые позволят определить или оценить общее цветовое качество светотехнической продукции.

Учебник МКО по основам визуального внешнего вида и измерению включа-

ет в себя разделы о визуальном восприятии материалов, основы радиометрии, колориметрии, основы двунаправленной функции распределения отражения, блеск, полихроматизм, гладкость и зернистость (*sparkle and graininess*). Внешний вид является одним из наиболее важных параметров, влияющих на выбор и потребности клиентов в продуктах; поэтому он должен поддаваться количественной оценке для обеспечения однородности и воспроизводимости. Существует ряд современных материалов, для корректного описания которых необходимо проводить большое количество измерений под разными углами объекта. При этом традиционные колориметрические параметры, рекомендуемые МКО не способны предсказать абсолютный внешний вид окрашенного образца в различных условиях. Решение этой проблемы описано в документе МКО 175:2006 о визуальном измерении параметров внешнего вида объекта, включая блеск, текстуру, уровень белого и гониометрические методы.



Рис. 1. Цветовосприятие со ссылками на документы МКО

Так, например, в процессе 3D-печати используются не только полимеры, но и металлы, биологические ткани, а в будущем, возможно, будет использоваться и их комбинация. Взаимосвязь между желаемыми 3D-объектами в процессе проектирования и полученными 3D-объектами должна быть визуальна и количественно оценена. При этом до настоящего момента не существует метрологии неоднородных 3D-объектов, включая 3D-форму, локальную шероховатость, текстуру и другие свойства, влияющие на визуальный эффект. Поэтому МКО поставила цель разработки идеи для измерительных приборов и их реализации в этой области, а также определения набора метрологических параметров, которые будут однозначно описывать цвет, текстуру и строение объекта применительно к его 3D-форме и созданию простой или комплексной модели поверхности, включающей физические и визуальные характеристики.



Дебашис Раул (Debashis Raul),
М.Е. Приглашённый преподаватель и старший научный сотрудник светотехнической школы факультета технического проектирования и электротехники Джадавпурского университета



Камалика Гхон (Kamalika Ghosh),
Ph.D. Доцент светотехнической школы факультета технического проектирования и электротехники Джадавпурского университета. Пожизненный член

Института инженеров, Индия, и Индийского общества инженеров-светотехников. Автор около 56 статей