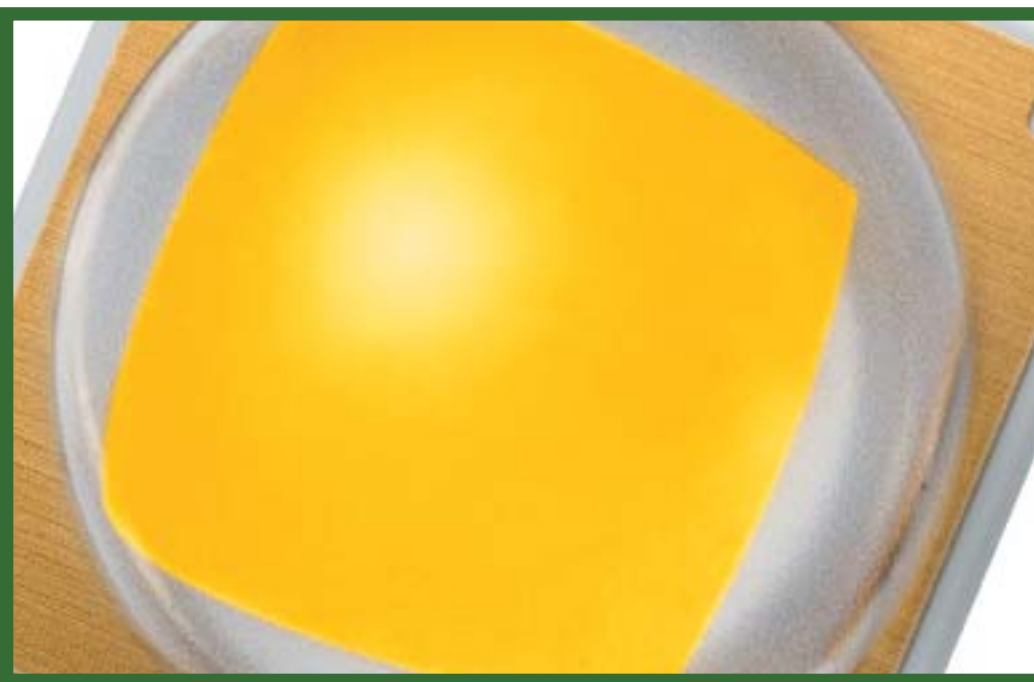


Сергей Никифоров, д. т. н. | sgnikiforov@arhlight.ru  
 Александр Архипов | aarkhipov@arhlight.ru

# Samsung: кристаллы — «с ног на голову», параметры светодиодов — «выше крыши»

➔ В статье представлены результаты тестовых измерений новых светодиодов серии 3535 Ceramic LH351B — от фирмы Samsung, проведенных в лаборатории «АРХИЛАЙТ» и инициированных российской компанией — дистрибьютором ГК «Симметрон» в лице Игоря Залогина и Павла Овчинникова. Идея была поддержана потребителями нового светодиодного продукта. Представленный материал может быть полезен разработчикам светотехнических устройств на основе светодиодов и специалистов, отвечающих за стратегию выбора источников света для разрабатываемых устройств светотехники.



## Предисловие

Утверждение о том, что время быстротечно, в контексте промышленного развития светодиодного освещения выглядит как не успевающие быть толком освоенными, прежние технологии производства устаревают и сменяются более совершенными. Стремление к улучшению параметров светодиодов заставляет работать технологов соответствующих производств значительно интенсивнее. Однако некоторые «новшества» оказываются довольно давними разработками, которые были отложены «до поры» либо по причине явной дороговизны их промышленной реализации, либо из-за технической невозможности исполнения в то время. К таким новациям относится и совершенно недавнее промышленное освоение крупными компаниями — производителями светодиодов и излучающих кристаллов для них, технологии установки чипов методом flip-chip («перевернутый кристалл»). Суть ее состоит в том, что имеющий верхнее расположение омических контактов кристалл, например на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , выращенный на подложке из сапфира, устанавливается «вверх дном». При этом контактные площадки, изначально предназначенные для приварки к ним внешних контактных проводников, используются для припайки кристалла к токоведущим площадкам платы (подложки) эвтектическим сплавом. А излучение от оказавшегося внизу *p-n*-перехода выводится вверх через прозрачную подложку. Таким образом, близость активной области кристалла к теплоотводу оказывается максимальной, поэтому вся система имеет существенно большую эффективность охлаждения, чем прежде. Но если раньше легко наносимое на ровную поверхность этой подложки зеркальное напыление отражало значительную долю излучения, производимого тыльной стороной активной области, то теперь это сделать сложнее, поскольку это зеркало необходимо на одной площади совместить с контактами. Это обстоятельство, конечно, не единственная задача, сопутствующая указанному «перевороту» в монтаже кристалла, которую потребовалось решить, чтобы адаптировать дизайн чипа для такой установки с сохранением эффективности излучения. Однако перспектива увеличения световой эффективности по причине лучшего отвода тепла и соблазн возможности повышения удельной излучающей способности

заставили технологов решать эти задачи. Не посчитали их неразрешимыми даже специалисты компании Cree, которым при освоении технологии flip-chip пришлось значительно изменять дизайн кристалла из-за того, что и подложка у него непрозрачная (SiC) и структура — вертикальная. Последнее означает, что кристалл имеет аксиальные выводы, одним из которых и является подложка, а второй расположен сверху. В традиционном варианте установки такая конструкция имеет ряд особенностей, вряд ли позволяющих оценивать их как истинные преимущества. Так, связующий материал, удерживающий кристалл на контактной площадке кристаллодержателя (подложки) светодиода, помимо теплопроводящих свойств, должен обладать еще и хорошей электропроводностью. При этом подложка светодиода практически всегда оказывалась одним из контактов светодиода, что не всегда приемлемо. Это впоследствии была применена керамическая основа, гальванически развязывающая корпус светодиода и кристалл, однако это не могло произойти без увеличения теплового сопротивления. Таким образом, единственным выходом для применения установки методом flip-chip, был перенос контактов на одну плоскость (нижнюю грань), что существенно изменило дизайн некогда вертикального кристалла. Поэтому, по сути, этот кристалл никто и не «переворачивал», и скорее всего, правильнее было бы называть его установку не flip-chip, а просто — «на эвтектический сплав». Но, как всегда в таких случаях, этот факт является больше коммерческим ходом с громким названием, поэтому никто и не стал возражать. Единственным признаком «переворота» может служить лишь оказавшаяся снизу, как и у других кристаллов, их активная область. И здесь следует отдать должное — эффект от такого преобразования получился очень неплохим: вкуче с бриллиантоподобной огранкой подложки сверху для лучшей квантовой эффективности, светодиоды на основе таких кристаллов обладают одними из лучших значений параметров в мире. Однако стоимость затрат на описанные действия по перестройке технологии производства кристаллов оказалась таковой, что и цена этих светодиодов, как и огранка их кристаллов — бриллиантоподобна.

Большинства проблем адаптации дизайна к установке методом flip-chip лишены кристаллы на основе сапфира, в том числе те,

которые в своих светодиодах использует компания Samsung. Одним из преимуществ вертикальной структуры кристалла до этого варианта установки был единственный акт приварки контактного проводника к одному верхнему омическому контакту. В то время как кристалл на основе сапфира испытывал эту операцию дважды. Как правило, при сварке использовался термоультразвуковой метод, сочетающий в себе внешний общий нагрев установленного на подложку кристалла и локальный кратковременный нагрев области контакта ультразвуком (УЗ). Как утверждают результаты исследований [1, 2], такие воздействия не только не проходили для кристаллов бесследно, но и довольно существенно влияли на деградационные характеристики светодиодов впоследствии. Поэтому у специалистов компании Samsung повод для развития промышленной технологии установки кристаллов методом flip-chip оказался наиболее веским. Если учесть, что операция термоультразвуковой приварки контактных проводников при монтаже кристаллов используется в подавляющем большинстве производств светодиодов или иных полупроводниковых элементов, то можно сказать, что на выходе конвейера производитель получает приборы с некоторой потенциальной степенью деградации параметров, отличающейся от той, которая была бы в случае отсутствия воздействия ультразвука на гетероструктуру [1, 2]. В итоге через одинаковое время наработки светодиодов можно заметить достаточно значительную разницу в значении светового потока у тех, которые испытали воздействие УЗ-сварки, и тех, которые были установлены методом flip-chip, где она не используется. Причем если подходить к этому факту с точки зрения абсолютного начального значения светового потока, то процесс его деградации в точке 3000–5000 часов наработки у образцов кристаллов без применения приварки контактного проводника (установлены методом flip-chip) вообще еще не начался: он несколько превышает начальное значение и, судя по ходу графика, представленного в [1] не так скоро его снова достигнет.

Таким образом, можно предположить, что помимо очевидных преимуществ в совершенствовании световой эффективности, обозначенных в начале этого параграфа, освоенная компанией Samsung технология установки кристаллов методом flip-chip, открывает значительные перспективы

по увеличению срока службы и надежности своих светодиодов. В истинности этих предположений попробуем разобраться, используя результаты независимых и объективных исследований характеристик светодиодов новой серии 3535 Ceramic LH351B от фирмы Samsung в светотехнической лаборатории испытательного центра «АРХИЛАЙТ». Несмотря на то, что о нижеследующем условии мы говорили неоднократно в прежних статьях, посвященных подобным исследованиям, не лишним было бы отметить их и сейчас. Речь идет о порядке проведения такого исследования, для «чистоты эксперимента» и соблюдения принципа максимальной объективности которого переданные образцы сопровождалась только указанием режима, при котором требовалось проводить измерения, а наименование бина (биновой комбинации) заказчиком не сообщалось. Эта информация «втемную» была помещена в конверт, закрыта и опечатана. При рассмотрении результатов конверт вскрывался в присутствии заказчика и исполнителя, таким образом, исполнитель (лаборатория «АРХИЛАЙТ»), проводя исследования и рассчитывая их результаты, не мог знать, какому бину соответствует образец, и «подогнать» ответ под задачу».

### Описание образцов и результаты измерений

Светодиод выполнен в корпусе размером 3,5×3,5 мм с высотой около 2 мм. Внешний вид показан на рис. 1. Все его элементы крепятся к керамическому основанию толщиной около 0,4 мм. Особо стоит отметить узел из установленного на токоведущие контактные площадки подложки излучающего кристалла и систему вывода излучения в виде кремнийорганической линзы с «прослойкой» из люминофорной композиции. Последняя, ввиду абсолютно ровной поверхности подложки кристалла по причине отсутствия контактов (показано на рис. 2а), представляет собой подобие отрезка клейкой ленты определенной толщины с необходимым содержанием люминофора, которая подобно ламинированию наклеивается на указанную поверхность. Простота и высокая технологичность нанесения этого покрытия — это еще одно важное достоинство примененного flip-chip — метода установки кристалла. Однако при таком способе нанесения люминофора торцы кристалла, через которые выводится хоть и небольшая, но ощутимая доля из-

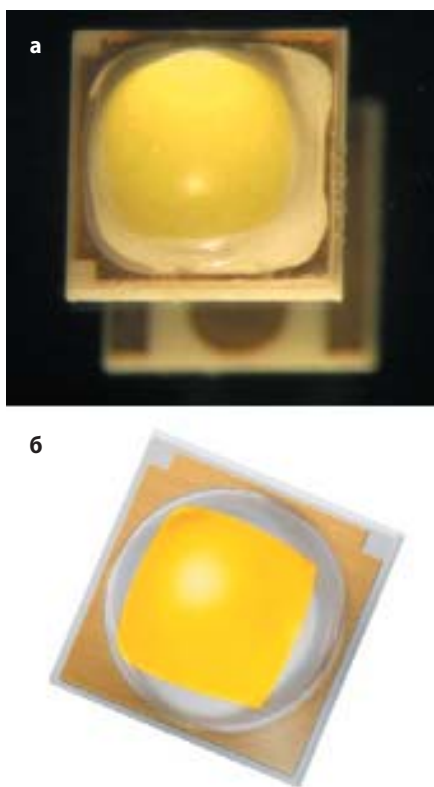


Рис. 1. Внешний вид светодиода LH351B

лучения, могут остаться незакрытыми. Это приведет к появлению значительной доли исходного синего света в боковых областях пространственной диаграммы распределения силы света. Чтобы такого не случилось, размер «лоскута» ленты с люминофором несколько больше, чем размер кристалла, поэтому она перегибается через его грани и закрывает торцы. Это заметно по оставшемуся следу на отсоединенной от кристалла линзе вместе с люминофором, показанному на рис. 2б стрелками. Но для полной «герметизации» этой оптической системы от просачивания синего излучения, а также для механического крепления вся полость под линзой, не занятая кристаллом, заполнена непрозрачным компаундом (рис. 2а). Большинство подобных технологических приемов применяется с целью оптимизации процесса нанесения люминофора и одновременной минимизации неравномерности колориметрических характеристик по фотометрическому телу светодиода. Анализ последних, как показатель того, насколько указанные приемы оказались успешными, будет проведен позже. А на этом этапе изучения конструкции светодиода также следует обратить внимание и на саму установку кристалла методом flip-chip.

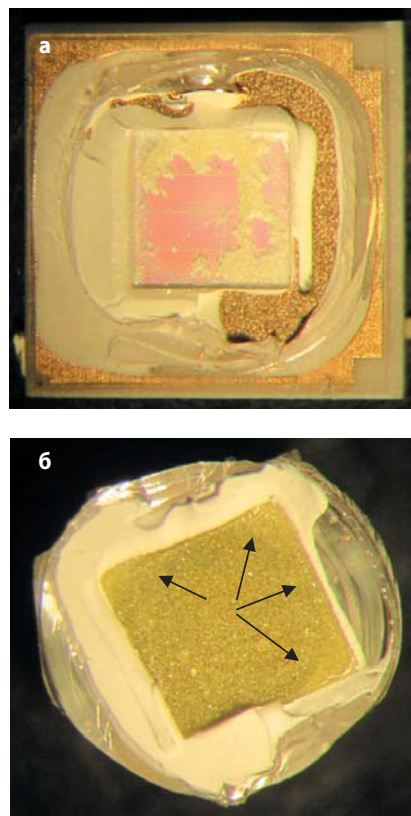


Рис. 2. а) Светодиод LH351B со снятой линзой и люминофорным покрытием кристалла; б) «оттиск» кристалла на поднутрении отсоединенной линзы с люминофором

Как говорилось выше, крайне важным моментом, принципиально отличающим такую установку от прежнего варианта, является существенное снижение теплового сопротивления *p-n*-переход – подложка светодиода. В классическом случае применения кристалла на подложке из сапфира ( $Al_2O_3$ ) (с приваркой контактных проводников) основным элементом, на откуп которому отдавалось значение указанного теплового сопротивления, был компаунд (эпоксидный клеевой состав), служащий креплением кристалла к подложке (основанию) светодиода. Вдобавок тепло от активной области должно было передаваться на этот компаунд через сам сапфир. Со временем эта система, подвергаясь сильному механическому напряжению при нагреве и остывании, расшатывалась, и ее тепловое сопротивление значительно увеличивалось. Все это

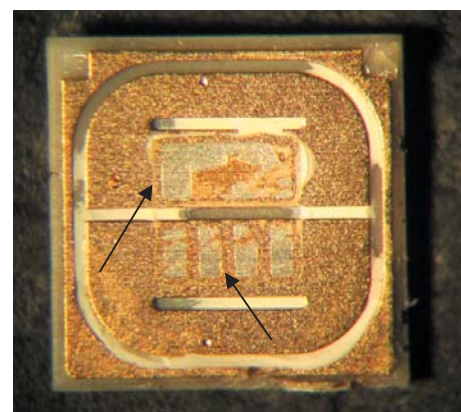


Рис. 3. Топология контактных площадок подложки светодиода LH351B и оставшиеся на них следы припайки кристалла (показаны стрелками).

приводило к перегреву активной области и в результате к ускоренной деградации параметров излучения. При установке кристалла описанного дизайна методом flip-chip, все эти слабые места тепловой схемы светодиода отсутствуют. Таким образом, значения теплового сопротивления *p-n*-переход кристалла на  $Al_2O_3$  – подложка светодиода, исчисляющиеся единицами, а не десятками  $^{\circ}C/Wt$ , стали вполне реальными. И даже хорошо заметные на рис. 3 следы припайки кристалла в светодиоде LH351B, имеющие существенные по площади области, не заполненные припоем, по-видимому, мало влияют на эти значения. Такой вывод можно сделать, если обратить внимание на содержание таблицы 1, в которой представлены результаты измерений теплового сопротивления образцов светодиодов. Измерения сделаны при рекомендованном спецификацией режиме  $+25^{\circ}C$ . При этом можно наблюдать не только практическое совпадение полученных и декларируемых значений, но и их истинную малую абсолютную величину. Это говорит о высокой эффективности примененного метода установки кристалла и о его надежности.

Другие данные по полученным и декларируемым значениям параметров приведены в таблице 2. Можно заметить, что подавляющему большинству из них свойствен-

Таблица 1. Результаты измерений теплового сопротивления образцов светодиодов

Образец	Потребляемый ток $I_f$ , mA	Тепловое сопротивление $R_{th}$ , $^{\circ}C/Wt$ , полученное	Тепловое сопротивление $R_{th}$ , $^{\circ}C/Wt$ , по D. Sh.
LH351B	350	4,2	4,0
LH351B	700	7,6	-

но очень близкое соответствие. Следует отметить, что спецификация составлена по принципу так называемого «горячего биннинга», когда параметры указываются при температуре активной области кристалла  $T_j = +85\text{ }^\circ\text{C}$ , характерной для реальных условий эксплуатации светодиода. Это обстоятельство заставляет производителя быть гораздо честнее и минимизирует «лукавство» по декларации «высоких» характеристик в наиболее выгодных температурных условиях светодиода. Однако даже при таких обстоятельствах значения, например, световой эффективности имеют очень высокий уровень при соответствующих плотностях тока. Некоторые косвенные параметры, такие как КПД (доля электроэнергии, преобразованной в излучение) или спектральная световая эффективность, являются типичными для приборов такого класса.

По колориметрическим характеристикам предоставленные образцы также оказались в соответствии со значениями, указанными в спецификации. Так, например, коррелированная цветовая температура (КЦТ) крайне близка к заявленной для этого ранка, а координаты цветности находятся, хотя и в области верхней границы, но в пределах бина, определенного при сортировке на производстве, что иллюстрирует рис. 4. Следует отметить, что даже удвоение тока через кристалл не привело к сколь-нибудь значимым изменениям КЦТ, и это свидетельствует о значительном запасе динамики изменения тока относительно штатного значения в 350 мА. Хотя именно о КЦТ и ее трактовке в настоящем исследовании стоит сказать

Т а б л и ц а 2. Данные по полученным и декларируемым значениям параметров светодиодов LH351B

Тип светодиода		LH351B - 3535 SPHWH2L3D30CD4RTP3 D2R4P1		
Параметры		Полученные	Полученные	Норма по D.S. (при $T_j = +85\text{ }^\circ\text{C}$ )
Режим		350 мА (при $T_j = +85\text{ }^\circ\text{C}$ )	700 мА (при $T_j = +85\text{ }^\circ\text{C}$ )	350 мА
Мощность излучения, Вт		0,45	0,82	
Световой поток, лм		154,7	282,3	160-170 (мин. 288 при 0,7 А)*
Сила света максимальная, кд		46,95	86,7	
Сила света осевая, кд		46,88	86,6	
Освещенность по оси на расстоянии 2 м, лк		11,7	21,7	
Сила излучения максимальная, Вт/ср		0,136	0,251	
Угол излучения 2Q0,5lv, град.	0-0	127,52	128,44	124
	0-90	130,32	126,84	124
	средний 2Q0,5lv	128,92	127,64	124
Угол излучения 2Q0,1lv, град.		154,41	153,66	175
Потребляемый ток, А		0,35	0,7	0,35
Напряжение питания статическое, В		2,774	2,909	2,6-2,8
Напряжение питания импульсное, В		2,877		2,8
Потребляемая мощность статическая, Вт		0,971	2,036	0,980
Потребляемая мощность импульсная, Вт		1,007		0,980
Световая эффективность статическая, лм/Вт		159,34	138,63	>163
Световая эффективность импульсная, лм/Вт		153,63		>163
Температура p-n-перехода $T_j$ , $^\circ\text{C}$		85	85	85
Относительная сила света, кд/кдм		303,4	307,1	
КПД светодиода, %		46,1	40,17	
Спектральная световая эффективность, лм/Вт		345,4	345,0	
Энергетическая освещенность по оси на расстоянии 2 м, Вт/м <sup>2</sup>		0,034	0,063	
Длина волны максимальная, нм		449,5	449	452
Длина волны центроидная, нм		557,5	557	
Ширина спектра излучения по уровню 0,5Р, нм		179,5	180,5	170
Ширина спектра излучения по уровню 0,1Р, нм		261,5	262,5	250
Координаты цветности	X	0,3529	0,3519	0,35
	Y	0,3727	0,3716	0,362
	Z	0,2744	0,2765	
Доля ОСПЭЯ относительно $V(\lambda)$ , %		61,5	61,8	
Индекс цветопередачи Ra (CRI)		71,6	71,8	>70
Коррелированная цветовая температура (CCT), К		4794	4825	5000 (R4)
Цветовая температура по Планку (приведенная), К		4276	4383	

Примечание: \* – в датшите подразумевается допуск указанного светового потока  $\pm 7\%$ .

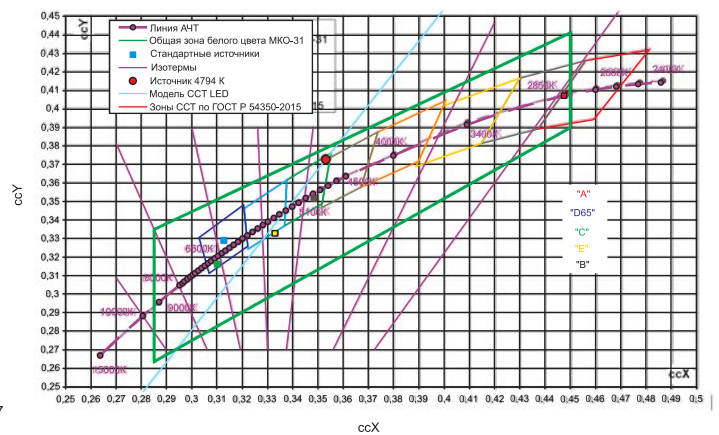
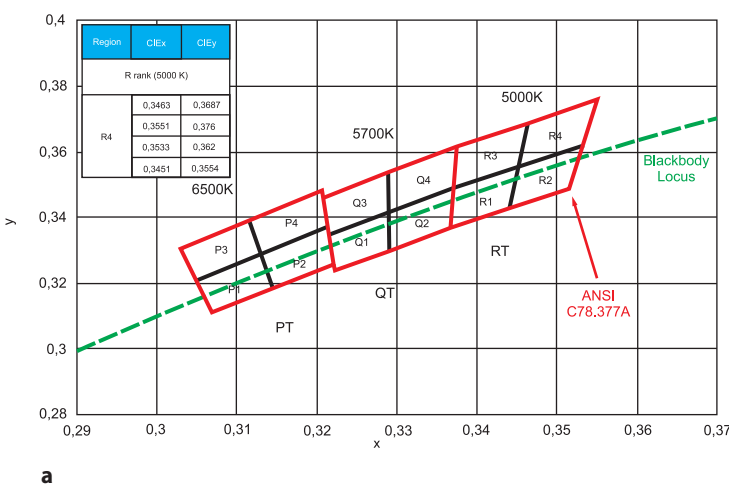


Рис. 4. Координаты цветности исследуемого светодиода: а) данные спецификации, параметры бина приведены на сноске графика; б) измеренные значения на цветовом графике МКО-31 для зоны белого цвета

особо. Дело в том, что масштабные споры о методах ее определения у светодиодов и в устройствах на их основе так и не привели к некоему конструктивному и единому мнению. Поэтому порой результаты измерений ее значений у одних и тех же источников могут отличаться. Как известно, вся проблема с этим решением основана на существенной неравномерности спектрального состава излучения светодиода в зависимости от угла излучения. Основная причина тому — несовершенство методов нанесения люминофорного покрытия, первичная и вторичная оптика, а также имеющаяся неравномерность плотности светового потока по площади кристалла. С одной стороны, очевидно, что, обладая узким (в 1 град.) полем зрения, наш глаз

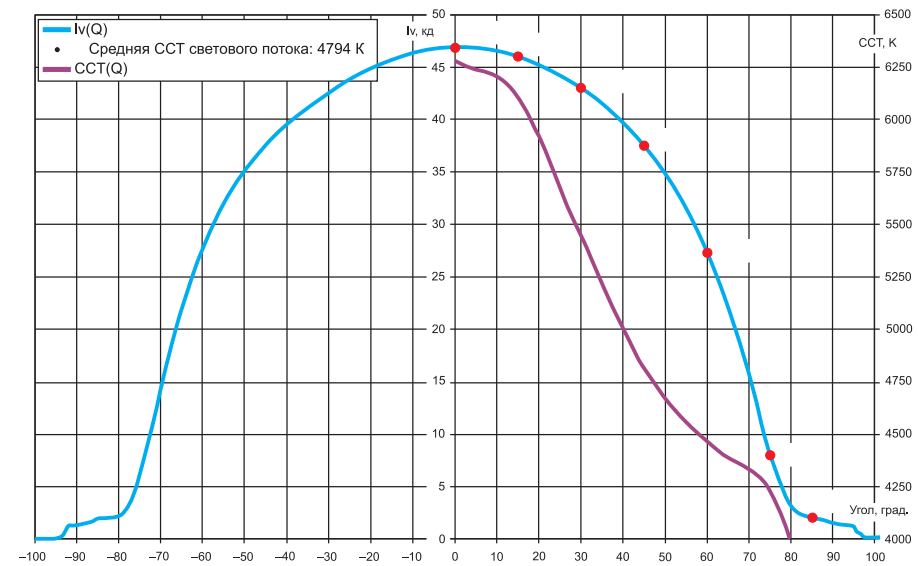
не может интегрировать световой поток не только от всей, но и даже от небольшой доли пространственной диаграммы излучения, поэтому важно, чтобы обозначенное значение КЦТ было одинаково по всей диаграмме (иначе оно не будет соответствовать спецификации). Но с другой стороны, если декларировать именно КЦТ суммарного потока источника, то тогда действительно можно говорить об интегральном значении КЦТ независимо от ее неравномерности распределения. По мнению автора, наиболее справедливым результатом рассуждения о корректности сути КЦТ окажется условие, при котором первая ситуация будет характеризовать осветительные приборы, а вторая — источники света. Вероятно, благодаря именно

этой трактовке «соломонова решения» о методике измерений, с января 2016 г. в ГОСТ Р 54350-2015 отсутствует требование по измерению КЦТ интегральным методом. Это, по сути, значительно ужесточает требование по неравномерности КЦТ, поскольку она может быть измерена в любой точке фотометрического тела и должна оставаться в рамках заявленного значения, что обеспечить в большинстве случаев крайне затруднительно. Но по смыслу — гораздо правильнее и логичнее. Это заключение как раз касается именно осветительных приборов, стандарт на методы измерений которых и приведен в примере, этим же подтверждаются предыдущие предположения о трактовке КЦТ. Как обстоят дела с этим вопросом у светодиодов LN351B от фирмы Samsung и что сулит их применение в осветительных приборах с точки зрения описанной проблемы, удобнее рассмотреть по соответствующим результатам измерений.

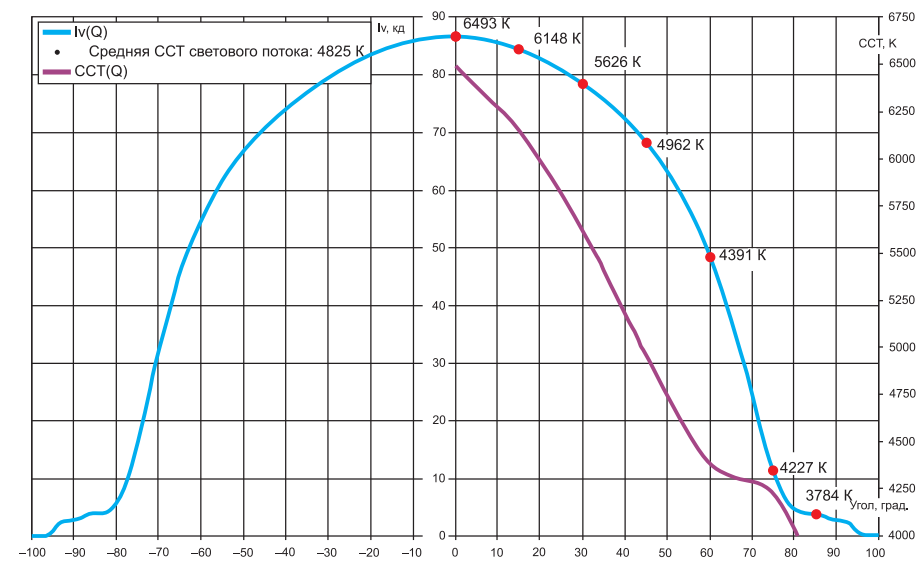
На рис. 5 показана та самая зависимость коррелированной цветовой температуры от угла излучения, о которой речь шла выше. График зависимости составлен таким образом, что можно проследить изменение КЦТ в каждой области абсолютной диаграммы углового распределения силы света с обозначенными на ней значениями и саму зависимость КЦТ от угла излучения, отложенную по второй оси Y. Прежде всего, стоит отметить, что, несмотря на указанное на графике и в таблице 2 интегральное значение КЦТ<sup>1</sup>, ее разброс (от центра диаграммы до углов по уровню 0,1Ф, где Ф — световой поток светодиода) составил порядка 2500 К. Причем благодаря форме диаграммы этот разброс относительно самого интегрального значения практически симметричен в обе стороны углов.

Из приведенных результатов очевидно, что полученную неравномерность КЦТ невозможно назвать незначительной, даже если ограничить ее оценку углами  $-60...+60^\circ$ , где сосредоточена основная доля светового потока. С точки зрения ответа на вопрос о причинах такого разброса оказалась полезной зависимость, показанная на рис. 5б, измеренная при удвоенной (относительно рис. 5а) плотности тока. Можно заметить, что график

<sup>1</sup> Интегральное значение КЦТ рассчитывается из данных по измерениям пространственного распределения спектра излучения по фотометрическому телу источника и определяется как объемный интеграл значений КЦТ, которые имеют соответствующие доли светового потока.



а



б

Рис. 5. Зависимость коррелированной цветовой температуры от угла излучения; а) в режиме 350 мА; б) в режиме 700 мА

ССТ(Q) на этой диаграмме более линейен, что означает большую равномерность плотности мощности излучения по площади кристалла. Это можно объяснить большим приложенным напряжением, приводящим к увеличению эффективности излучения в периферийных зонах активной области кристалла, имеющего значительную площадь. Приведенные рассуждения подтверждают и полученные при измерениях значения углов излучения, отличающиеся на несколько градусов при описанных режимах тока именно в средней области диаграммы (по уровню  $2Q0,5I_v$ ), как и показывает таблица 2. Однако на абсолютное значение разброса КЦТ это обстоятельство практически не повлияло. Последнее означает, что примененный метод нанесения люминофорного состава не в полной мере учитывает обозначенную выше неравномерность плотности светового потока (мощности излучения) кристалла, а имеющаяся кремнийорганическая линза, хотя и обладает незначительной оптической силой, все же катализирует эффект неравномерности КЦТ. Можно предположить, что и в случае применения исследуемых светодиодов в составе осветительного прибора, в особенности содержащего вторичную оптику, он будет обладать аналогичной неравномерностью КЦТ по углу излучения. Но если вернуться к анализу соответствия измеренных в исследовании характеристик светодиодов декларируемым и рассуждать с позиции того, что в документе подразумевается интегральное значение КЦТ (если можно так выразиться — «КЦТ светового потока»), то, как было сказано выше, здесь имеется полное соответствие (табл. 2, рис. 5).

Несколько слов о результатах исследования электрических параметров. Описанные в начале статьи преимущества светодиода с кристаллом, установленным методом flip-chip, касаются и электрических характеристик. Прежде всего, это — минимально возможное прямое напряжение. Отсутствие дополнительных токоведущих проводников, неизбежных потерь на далеко не идеальной проводимости сварных соединений, значительная площадь контактных площадок и эвтектический сплав с высокой проводимостью — все это звенья цепи увеличения КПД преобразования электроэнергии в излучение у flip-chip — установленного кристалла. Безусловно, все эти обстоятельства положительно сказываются на значении световой эффективности светодиода

и ее зависимости от прямого тока. Однако организация равномерности растекания тока по площади кристалла в применяемом типе кристаллов относительно дизайна вертикальной структуры — более про-

блемная, и поэтому не может обеспечить эту равномерность в большом диапазоне приложенных напряжений. Это также служит основной причиной обозначенной выше неравномерности плотности светового

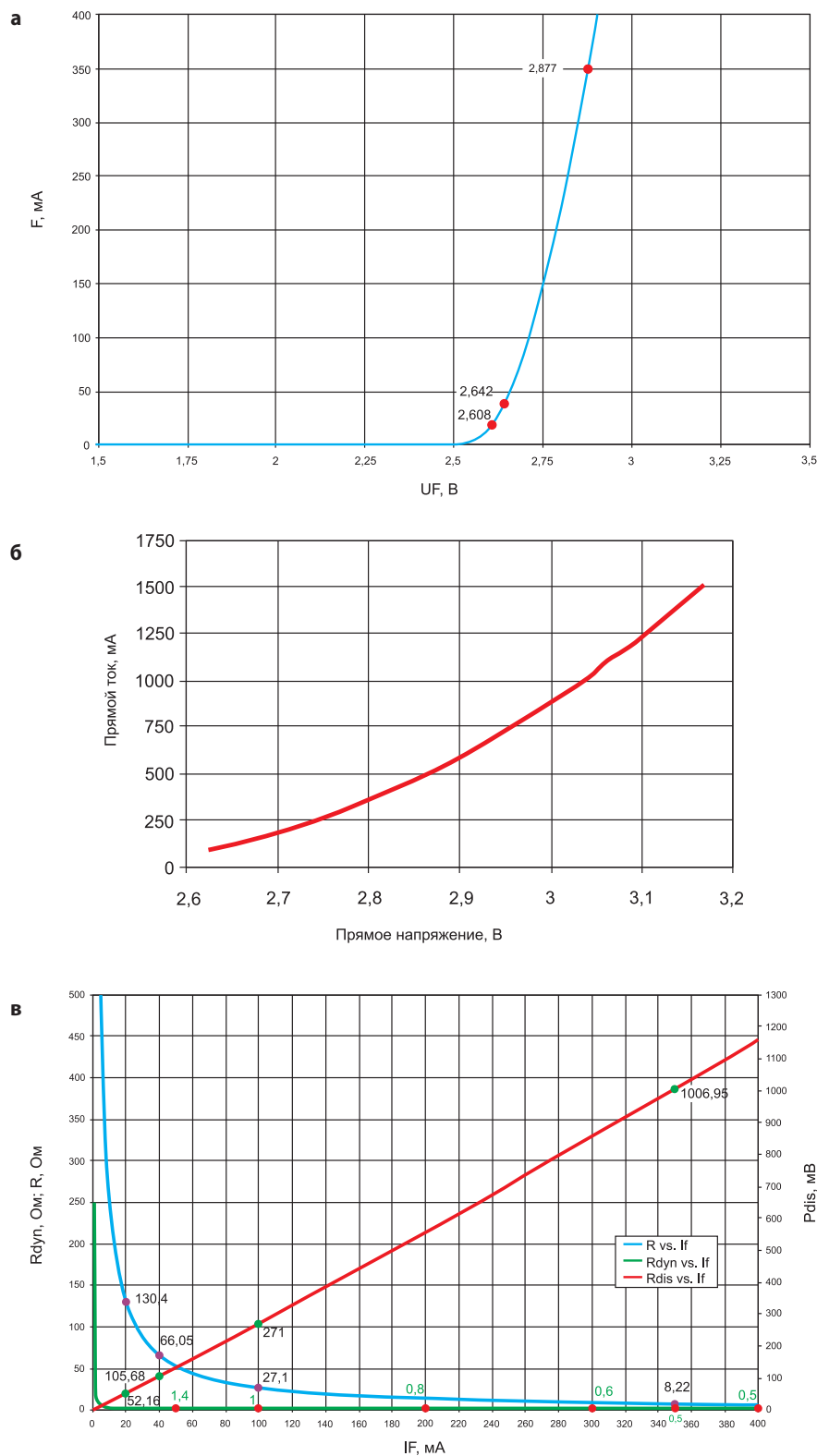


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики: а) измеренная; б) указанная в спецификации; в) — измеренные зависимости дифференциального сопротивления и потребляемой мощности от прямого тока (характеристики измерены при  $T_j = +25^\circ\text{C}$ )

потока по площади кристалла. Также следует отметить высокую крутизну вольт-амперной характеристики, имеющей такую форму благодаря минимальному паразитному сопротивлению цепи «выводы светодиода — активная область кристалла». А низкое дифференциальное сопротивление (порядка 0,5 Ом при токе 350 мА) обеспечивает высокие динамические нагрузки (использование на больших токах в импульсном режиме). Учитывая малую площадь светодиода для передачи тепла внешнему радиатору, скорее всего, именно это и имела в виду компания Samsung, указывая в спецификации возможность светодиода работать на токах до 1500 мА и даже до 2000 мА при скважности импульсов 10. Более наглядно об этих выводах расскажет рис. 6. Однако нужно отдать должное производителю в том, что

при оценке срока службы светодиодов по методике LM80, в спецификации указано время испытания 10 000 ч при токе 1 А и температуре (скорее всего —  $T_j$ ), равной +105 °С. По результатам многочисленных исследований аналогичных светодиодов, например в [3, 4], на предмет прогноза деградационной характеристики, эта информация крайне близка к истине. Следовательно, можно сделать вывод, что и другие, не участвующие в настоящем исследовании параметры и их значения приведены корректно и на них вполне можно ориентироваться при выборе этого семейства светодиодов для применения в светотехнических устройствах. ●

### Литература

1. S. G. Nikiforov. Photometric Method of Study of Semiconductor Heterostructures. //

Inorganic Materials, 2011, Vol. 47, No. 14.

2. Е. К. Наими, С. Г. Никифоров, О. И. Рабинович, В. П. Сушков. Влияние ультразвуковой вибрации на деградацию светоизлучающих диодов на основе InGaN // Материалы электронной техники. 2009. №1.
3. Rabinovich O. I., Nikiforov S. G., Sushkov V. P., Shishov A. V. New results of InGaN LED simulation // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, Volume 6468, 2007, Article number 64680U
4. С. Г. Никифоров. Прогноз срока службы и изменения параметров промышленных светодиодов при нагрузке с помощью фотометрического метода // Инновации и инвестиции. 2015. №1.