

Особенности определения квантового выхода светодиодов на основе AlGaInN и AlGaInP при различной плотности тока через излучающий кристалл

Сергей НИКИФОРОВ
sergnik71@mail.ru
Александр АРХИПОВ
Aarhipov@azcompany.ru

В статье приведены полученные импульсным методом результаты измерений зависимости оптических характеристик светодиодов от плотности тока через излучающий кристалл, которые поясняют физические основы работы указанных гетероструктур. Используемые в работе методики измерения энергетических параметров излучения без учета теплового действия тока позволяют выявить и объяснить существенную разницу в оценке истинной и приводимой производителями световой эффективности светодиодов.

Еще один способ измерить то, чего нет

При производстве светодиодов существует очень важный вопрос, связанный с оценкой их эффективности (квантового выхода излучения), ответ на который определяет как область их применения, стоимость, так и то, что будет записано в спецификации в качестве декларируемого параметра (световой поток, оптическая мощность и т. д.). Как говорилось в [1, 2], отсутствие методик измерения указанных параметров, стандартизированных и утвержденных на международном уровне, толкает производителя светодиодов к применению сомнительных средств измерений, «которые не являются таковыми» (Ловинский Л. С.) [3], а также заставляет руководствоваться методиками измерений, не учитывающими физические аспекты работы полупроводниковых источников излучения. Данные факты привели к появлению на рынке светодиодов с заявленными запредельными значениями световой эффективности, на основе которых создаются совершенно заурядные, как потом оказывается, по своим параметрам устройства. Дальнейшим, более глубоким объективным ответом на вопрос о том, почему так происходит, стало описанное в настоящей работе исследование квантовой эффективности излучения светодиодов на основе твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ с измерением характеристик в импульсном режиме, в котором тепловое действие тока на активную область гетероструктуры минимально.

Эффективность светодиода можно оценить разными способами, но основаны они на измерении комплекса параметров на различных этапах изготовления. Определение эффективности преобразования энергии необходимо для оценки конструктивных особенностей корпусов с точки зрения теплоотвода, которые используются в светодиодном приборе.

Описываемое исследование было проведено в отношении большинства типов самых популярных конструкций излучающих кристаллов, квантовый выход которых при сходном спектральном распределении излучения должен быть одинаков, независимо от материала подложки, на которой выращена или на которую перенесена гетероструктура. Различие в значениях квантового выхода может быть обусловлено лишь степенью неидеальности самой структуры, потому что тепловое воздействие тока не учитывается и, соответственно, конструкция кристалла не влияет на энергетические показатели излучения. Из чего можно сделать вывод, что результаты исследования зависимости квантового выхода AlGaInN и AlGaInP светодиодов от плотности тока в импульсном режиме питания могут служить качественным показателем исследуемых излучающих кристаллов.

Как тайное сделать явным

Компании-производители полупроводниковых светоизлучающих структур проводят измерения пластин после эпитаксиальных процессов в импульсном режиме, используя зондовый механизм, теплоотводящую по-

верхность и импульс длительностью 10–20 мс. Данная методика измерений не отображает реальные значения квантового выхода, особенно при больших плотностях тока в импульсе, так как не позволяет полностью исключить нагрев. В настоящей работе проведены исследования зависимости мощности излучения (P) от плотности тока (J) у зеленых и синих светодиодов на основе гетероструктур InGaN и у красных и желтых светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP в импульсном режиме, исключая нагрев активной области кристалла.

Измерения значений P осуществлялись в конце импульса тока (в области его заднего фронта) длительностью 1 мкс и 10 мкс при частоте повторения импульсов 1 кГц и 100 Гц соответственно. В таблице приведены расчетные значения температуры перегрева активной области в момент измерения ΔT_{j-a} , (температуры в конце импульса). Измерения проводились при $T_A = 25^\circ\text{C}$ в наиболее практически важном диапазоне плотностей токов $J = 10\text{--}250\text{ A/cm}^2$.

Также в таблице приведены значения квантового выхода мощности излучения R_p для разных типов полупроводниковых структур, изготовленных на разных подложках, разного цвета свечения и разных производителей.

Величины R_p приведены относительно плотности тока $J = 20\text{ A/cm}^2$, что соответствует прямому току 160 мА через кристалл Cree C-470XB900 и 15 мА через кристалл C460MB290-E1000, эффективность которых при таких режимах близка к максимальной. Данный факт хорошо разъяснен (особенно

Таблица. Расчетные значения температуры p - n -перехода в конце импульса ΔT_{j-a} и квантовый выход оптической мощности

Кристаллы		Площадь p - n -перехода, см ²	Подложка	Активная область	ΔT_{j-a} разница между температурой активной области кристаллов (T_j) и температурой окружающей среды (T_a), К		Квантовый выход мощности излучения R_p	
Производитель	Цвет				1 мкс (величина тока в импульсе, мА)	10 мкс (величина тока в импульсе, мА)	$j = 20 \text{ A/cm}^2$	$j = 200 \text{ A/cm}^2$
Cree C460MB290-E1000	Синий	$5,8 \times 10^{-4}$	SiC	Наверху	—	—	1	0,62
Cree C460XT290-O119-A	Синий	$6,2 \times 10^{-4}$	SiC	Внизу	1 (120мА)	—	1	0,65
Cree C-470XB900	Синий	$8,1 \times 10^{-3}$	SiC	Внизу	0,15 (1400 мА)	1,5 (1400 мА)	1	0,71
Cree C-460EZR260	Синий	$1,2 \times 10^{-3}$	SiC	Внизу	0,9 (250мА)	2,3 (250 мА)	1	0,63
Shinghai	Синий	$1,06 \times 10^{-3}$	Al ₂ O ₃	Наверху	12,3 (300 мА)	—	1	0,48
BridgeLux BKO2424C455-1	Синий	$4,9 \times 10^{-3}$	Al ₂ O ₃	Наверху	1,4 (1000 мА)	2,7 (1000 мА)	1	0,51
Epistar ES-CEBLV40A-M	Синий	$5,1 \times 10^{-3}$	Si	Наверху	1,2 (1000 мА)	2,3 (1000 мА)	1	0,68
Epistar ES-CEBH915	Синий	$1,16 \times 10^{-3}$	Si	Наверху	3,6 (250мА)	—	1	0,6
Cree C527XT290-S0100-A	Зеленый	$6,2 \times 10^{-4}$	SiC	Внизу	1 (120мА)	—	1	0,56
Cree C527MB290-E1000	Зеленый	$5,8 \times 10^{-4}$	SiC	Наверху	—	—	1	0,48
Cree C-527XB900	Зеленый	$8,1 \times 10^{-3}$	SiC	Внизу	0,15 (1400 мА)	1,5 (1400 мА)	1	0,6
BridgeLux BKO2424C530-3	Зеленый	$4,9 \times 10^{-3}$	Al ₂ O ₃	Наверху	1,8 (1000 мА)	3,2 (1000 мА)	1	0,63
Epistar ES-CEGH915	Зеленый	$1,16 \times 10^{-3}$	Si	Наверху	3,6 (250мА)	—	1	0,47
Epistar ES-CEGH912	Зеленый	$9,0 \times 10^{-4}$	Si	Наверху	—	—	1	0,5
Epistar ES-SAHR840	Красный	$6,5 \times 10^{-3}$	Si	Наверху	3,4 (1200 мА)	4,7 (1200 мА)	1	0,99
Epistar ES-SAYL840	Желтый	$6,5 \times 10^{-3}$	Si	Наверху	3,4 (1200 мА)	4,7 (1200 мА)	1	1,08

для структур InGaN) в работах [4–7], где говорится о роли последовательного сопротивления при больших плотностях токов, распределении электрических полей в объеме активной области в зависимости от содержания индия в материале и образовании встроенных полей в квантовых ямах в зависимости от их заполненности носителями заряда при различных плотностях тока. Полученные в исследовании значения квантового выхода мощности излучения показывают, насколько совершенна полупроводниковая структура с точки зрения достижения максимального значения квантового выхода, несмотря на то, что в качестве образцов были взяты отнюдь не идеализированные и специально выращенные структуры, а промышленные светодиоды «с конвейера». Также по этим цифрам можно судить, насколько важен хороший теплоотвод и насколько можно повысить эффективность светодиода или излучающего кристалла, если свести к минимуму перегрев активной области. Поэтому по результатам измерений квантового выхода светодиода возможно достаточно достоверное суждение о том, до какой степени рационально выполнена конструкция кристаллодержателя и всего светодиода в целом в части охлаждения активной области излучающего кристалла. Наглядно этот момент можно рассмотреть далее при сравнении графиков рис. 2 и 3.

Там, где сходятся теория и практика

Предложенная методика практических исследований показала максимальное приближение с теорией работы гетероструктуры.

На рис. 1 представлены схемы светоизлучающих кристаллов производства компании Cree, изготовленных на подложке SiC с активной областью внизу — Cree C-470XB900

и с активной областью наверху — Cree C460MB290-E1000. Данные полупроводниковые структуры имеют различное тепловое сопротивление « p - n -переход — кристаллодержатель» (отличающиеся значения разниц (ΔT_{j-a}) между температурой активной области кристаллов (T_j) и температурой окружающей среды (T_a)). Такие отличия обусловлены не только разным геометрическим расположением активной области гетероструктуры кристалла относительно кристаллодержателя, площадью омических контактов, но и существенным отличием в теплопроводности связующего элемента, осуществляющего механическое крепление кристалла: используется токопроводящий клей на эпоксидной основе и эвтектический сплав, теплопроводность которых отличается на порядок.

Излучающие кристаллы с данными характеристиками умышленно взяты в качестве образцов с целью проверки правильности вы-

бранного метода исследования величины квантового выхода импульсным способом измерения оптической мощности, а также для выяснения применимости его в большом диапазоне конструкций кристаллов с разными тепловыми сопротивлениями « p - n -переход — кристаллодержатель».

Проведенный с помощью уравнения теплового баланса, описанного в [6], расчет разницы ΔT_{j-a} (1) между температурой активной области кристаллов T_j и температурой окружающей среды T_a показал, что значения ΔT_{j-a} не превышают 5 К. При разнице температур 5 К квантовая эффективность светодиода уменьшается на 1–2%. Таким образом, импульсный режим питания, принятый в исследовании, можно считать неразогревающим для всех образцов.

История уравнения теплового баланса в течение импульса тока τ рассмотрена и подробно описана в [6] его авторами. Разницу температур между p - n -переходом и комнатной температурой в конце импульса ΔT_{j-a} можно определить следующим образом:

$$\Delta T_{j-a} = P \times \tau / S_j (c \times \rho \times d_j + k \times \tau / d_{j-b}), \quad (1)$$

где c — удельная теплоемкость, J/K×g; ρ — удельная масса, g/cm³; S_j — площадь p - n -перехода, см²; d_j — область пространственного заряда, см; $P \times \tau$ — тепловая энергия, генерируемая в светодиоде электрической мощностью P , Вт; k — удельная теплопроводность, Вт/см×K; d_{j-b} — расстояние от p - n -перехода до основания, см. (Температура основания равна температуре окружающей среды).

Исходя из расчетов и используя данные таблицы 1, можно построить типовые зависимости относительной величины квантовой эффективности по мощности излучения $R_p = (P_j/P_{20})$. На рис. 2 представлена зависимость квантовой эффективности от плотности тока для светодиодов на основе синих кристаллов Cree C460XT290-O119-A и зеле-

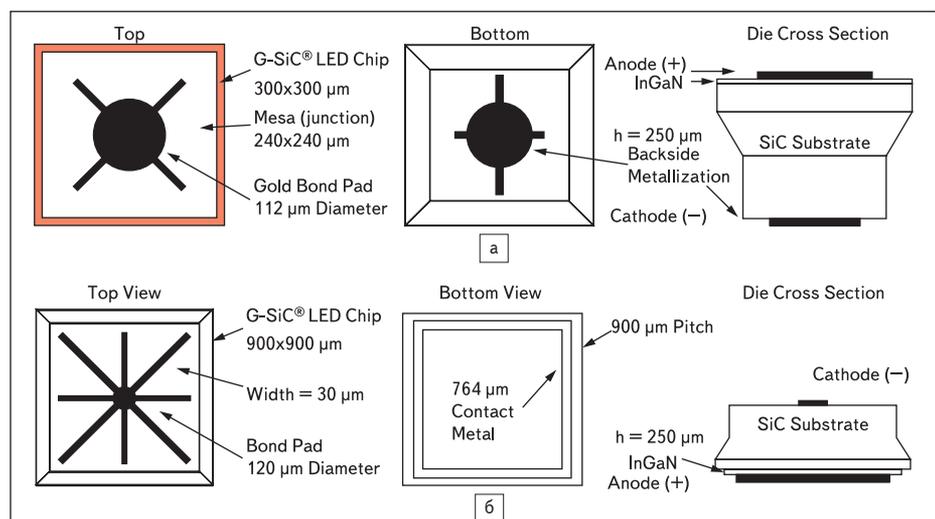


Рис. 1. Внешний вид светоизлучающих кристаллов фирмы Cree, использованных в качестве образцов для исследования в составе соответствующих светодиодов: а) Cree C-470XB900; б) C460MB290-E1000

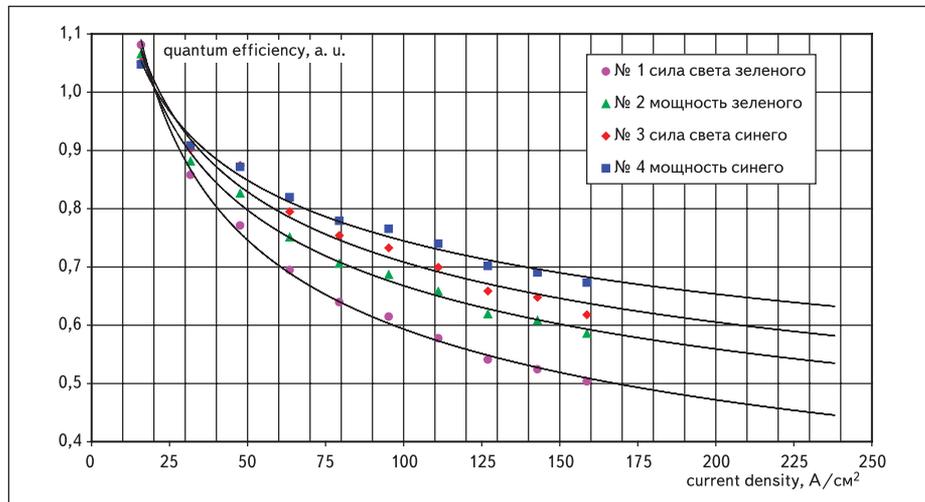


Рис. 2. Зависимость относительных значений квантовой эффективности мощности излучения R_p от плотности тока для зеленых и синих светодиодов на основе кристаллов на подложке SiC

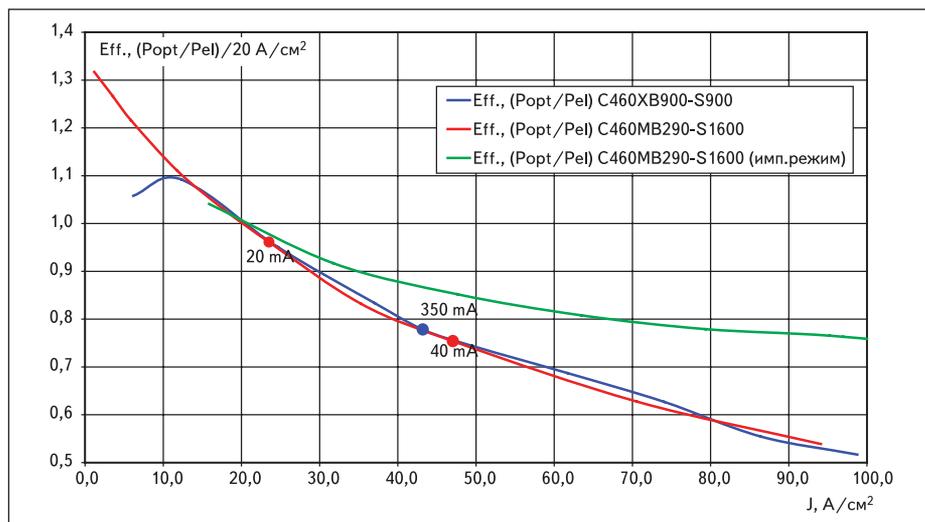


Рис. 3. Зависимость квантовой эффективности от плотности тока излучающих кристаллов AlInGaN на подложке SiC фирмы Cree. Красная и синяя кривые — измерения R_p в штатном режиме, с нагревом при соответствующей J , зеленая — в импульсном режиме

ных кристаллов Cree C527XT290-S0100-A. Здесь P_J — значения при плотности тока J , P_{20} — значение при плотности тока $J = 20 \text{ A/cm}^2$. Представленные на рис. 2 линии тренда описываются степенной функцией. Графики изменения максимальной силы света приведены для сравнения и показывают, что и в импульсном режиме питания присутствует эффект перераспределения светового потока по диаграмме направленности излучения [7], при отсутствии которого характеристики $R_p(J)$ и $I_v(J)$ совпали бы. Видно, что у зеленых светодиодов имеет место больший градиент уменьшения R_p с увеличением J , чем у синих. Это может быть следствием различной степени изменения спектрального распределения излучения с изменением плотности тока, а правильнее сказать, с изменением внешнего приложенного электрического поля, если речь идет о барьерной структуре, хотя и в импульсном режиме.

Отсутствие разогрева активной области значительно увеличивает эффект коротковолнового сдвига всего спектра излучения. Однако это не приводит к пропорциональному увеличению оптической мощности из-за существенно меньшего квантового выхода секторов структуры с самым большим значением ширины запрещенной зоны, соответствующих минимальному содержанию индия [7], которые начинают работать интенсивнее (это и есть причина сдвига), и это одна из причин того, что интегральное значение квантового выхода с увеличением плотности тока снижается. Такое положение дел сохраняется и при тепловом действии тока. С той лишь разницей, что здесь нагрев имеет доминирующее влияние на характеристику $R_p(J)$, делая ее значительно круче. Это хорошо видно на рис. 3, где показаны в сравнении зависимости квантового выхода однотипных кристаллов при измерении в импульсном и штатном режимах.

Два графика, полученные при измерении с учетом разогрева активной области кристалла, буквально совмещены, несмотря на то, что указанные кристаллы имеют различную конструкцию (рис. 1).

Такой эффект обусловлен тем, что независимо от конструкции и размера кристалла имеет место одинаковая по составу гетероструктура и плотность тока через нее. Зеленая линия на графике показывает, насколько отличается зависимость $R_p(J)$ идентичных кристаллов при отсутствии нагрева. Из указанных диаграмм можно сделать вывод, прежде всего, о корректности проведенных измерений, правильности выбора режимов работы примененных в светодиодах кристаллов, а также о действенности предложенной методики определения эффективности излучательных свойств светодиодов и гетероструктур.

Указанные тенденции наблюдаются как у светодиодов на основе гетероструктур, выращенных на подложках SiC (Cree), так и у приборов на основе гетероструктур, выращенных на подложках Al_2O_3 (Epistar, Bridgelux). При этом у светодиодов на подложках Al_2O_3 уменьшение R_p с увеличением J на 15–20% больше, чем у светодиодов на подложках SiC. В самом простом случае это легко объяснимо различием в плотности дислокаций выращенных гетероструктур и подложек и рассогласованием периодов их кристаллических решеток, о чем сказано в [4, 7].

У красных и желтых светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP изменения R_p с увеличением J в диапазоне 10–250 A/cm^2 практически отсутствуют (рис. 4).

Представленные на рис. 4 линии тренда также описываются степенной функцией. Видно, что у красных светодиодов имеет место большее уменьшение R_p с увеличением J , чем у желтых. У желтых светодиодов наблюдается слабое увеличение R_p в диапазоне плотностей тока 10–250 A/cm^2 . Значительно меньше эти изменения заметны и при тепловом действии тока. Здесь вообще можно говорить об огромном потенциале структур на основе AlGaInP, имеющих существенный запас по эффективности, уменьшение которой не достигнуто в данном исследовании даже при питании импульсным током плотности в 300 A/cm^2 . Это обстоятельство может использоваться при необходимости получения большой оптической мощности в импульсе при соответствующем охлаждении излучающего кристалла.

Производители скрывают, куда деваются кванты от их светодиодов

В ходе исследования было установлено, что только импульсные измерения, исключаяющие нагрев кристалла, позволяют достоверно оценить квантовый выход светодиодной структуры и его изменение с плотностью тока. Данная методика разделяет два эффекта, влияющих на изменение квантового выхода: это

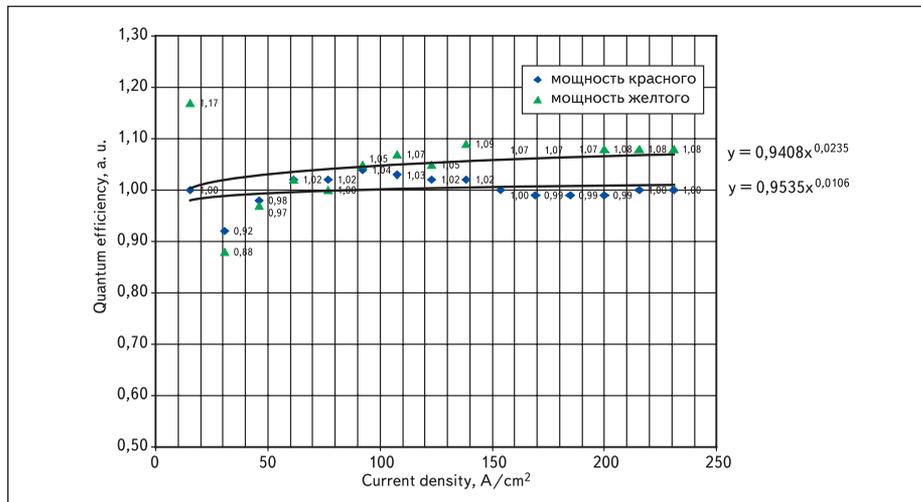


Рис. 4. Зависимость относительных значений квантовой эффективности мощности излучения R_p от плотности тока J светодиодов на основе AlGaInP

падение квантового выхода, связанного с неидеальностью эпитаксиальной структуры, и снижение квантового выхода, вызванного локальным перегревом узкой активной области. По значению этого падения также можно оценить степень перегрева активной области излучающего кристалла, что и было предложено в качестве результатов работы. Исследования показывают, что у красных и желтых светодиодов с повышением плотности тока не наблюдается падение квантового выхода, в отличие от синих и зеленых.

Представленные измерения, показывающие разницу между значениями оптической мощности, полученными импульсным методом и с учетом нагрева, указывают на некоторое сходство с разницей в публикуемых в спецификациях энергетических параметрах светодиодов и реальных, измеренных в штатном режиме, что может служить предположением о том, что декларированные характеристики являются теоретическими.

Авторы выражают благодарность В. С. Абрамову, к. т. н., и профессору Московского

Государственного института стали и сплавов В. П. Сушкову, д. т. н., за теоретическую поддержку проведенных исследований.

Литература

1. Никифоров С. Г. Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества // Компоненты и технологии. 2005. № 5.
2. Никифоров С. Г. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты и технологии. 2005. № 7.
3. Ловинский Л. С. Проблемы метрологического обеспечения оптических измерений светодиодов // Материалы конференции «Нитриды галлия и алюминия». МГУ. 2007. Январь.
4. Шмидт Н. М. Некоторые закономерности деградации синих светодиодов на основе InGaN/GaN // Материалы конференции «Нитриды галлия и алюминия».
5. Никифоров С. Г. Исследование параметров семейства светодиодов Cree XLamp // Компоненты и технологии. 2006. № 11.
6. Абрамов В. С., Архипов А. Л., Сушков В. П. Исследование зависимости квантового выхода InGaN и AlGaInP светодиодов от плотности тока // Материалы конференции «Нитриды галлия и алюминия».
7. Никифоров С. Г., Сушков В. П. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInN // Материалы конференции «Нитриды галлия и алюминия».