

Всеволод Дохтуров | niipp24@mail.ru | Серафим Смирнов | seraphim.smirnov@mail.ru

# Временная и тепловая стабильность параметров полупроводниковых источников света

## при ускоренных испытаниях

**В статье проводится анализ теплового режима полупроводниковых источников света типа КИПД154А92-Б3 при ускоренных испытаниях. Показано, что температура кристалла и люминофора монотонно увеличивается со временем испытаний, что, соответственно, приводит к увеличению коэффициента ускорения.**

Критерием отказа полупроводниковых источников света является снижение их светового потока на 30% или полный выход из строя ввиду разрушения. Кроме того, для оценки долговечности могут быть использованы изменения и других параметров, например вольт-амперной характеристики или цветовой температуры. При условии соблюдения рекомендованных производителем электрических и тепловых режимов срок службы устройств может достигать 10 лет, нарушение же теплового режима источника света (обычно это работа с температурой перехода более 120–125 °С) может привести к снижению срока службы почти на порядок [1].

При такой высокой предполагаемой долговечности натурные испытания становятся нерентабельными ввиду их высокой длительности и трудоемкости, поэтому актуальной становится разработка ускоренных методов испытаний. Ускоренные испытания позволяют за более короткое время определить среднее время наработки источника света и сделать достоверный долгосрочный прогноз.

Основную роль в вопросе надежности источников играет деградация параметров кристалла. Кроме того, для источников белого цвета важным вопросом является деградация люминофора и системы кристалл–люминофор в целом. Каждый из этих процессов характеризуется своей скоростью и энергией активации. Скорость деградации

в первую очередь определяется температурой кристалла и люминофора, а также плотностью тока в активной области кристалла. Наибольшее распространение получили методы ускоренных испытаний при повышенных температурах, с постоянным коэффициентом ускорения. Однако на практике не всегда удается зафиксировать коэффициент ускорения в допустимых пределах. Это связано с тем, что деградация кристалла и люминофора в процессе испытаний приводит к уменьшению внешней квантовой эффективности и, соответственно, к увеличению выделяемого в кристалле тепла, а следовательно, температуры кристалла [2, 3].

Целью данной работы является установление реальной температуры и коэффициента ускорения в начале и конце ускоренных испытаний на примере серийно выпускаемых ОАО НИИПП (г. Томск) полупроводниковых источников света типа КИПД154А92-Б3 в пластмассовом корпусе 5050 (рис. 1). С этой целью были проведены испытания партии изделий, отобранных на производстве методом случайной выборки.

В качестве ускоряющего параметра была выбрана повышенная температура испытаний +85 °С. С целью определения кажущейся энергии активации были проведены специальные испытания со ступенчато возрастающей температурой при +25, +85, +150, +175, +200 и +225 °С и выдержке на каждой ступени в течение 24 ч. Критической нагрузкой считалась та ступень испытаний, при которой наблюдалось достижение предельного значения светового потока, равное 0,5 от первоначального значения. После каждой ступени измерялись световой поток источника света, прямое падение напряжения и цветовая температура. Результаты испытаний представлены на рис. 2. Из анализа этих результатов получены величины кажущейся энергии активации деградации: для светового потока  $E_1 \approx 0,39$  эВ, для прямого падения напряжения  $E_2 \approx 1$  эВ, для цветовой температуры  $E_3 \approx 0,8$  эВ. Таким образом, процесс снижения светового потока обладает наименьшей кажущейся энергией активации. Одновременно ступенчатые испытания были проведены и для синих светодиодов КИПД154А92-С, изготовленных с одинаковым кристаллом и корпусом, что и КИПД154А92-Б3, но без люминофора. Для этих светодиодов кажущаяся энергия активации составила 0,65 эВ.



Рис. 1. Полупроводниковые источники света типа КИПД154А92-Б3

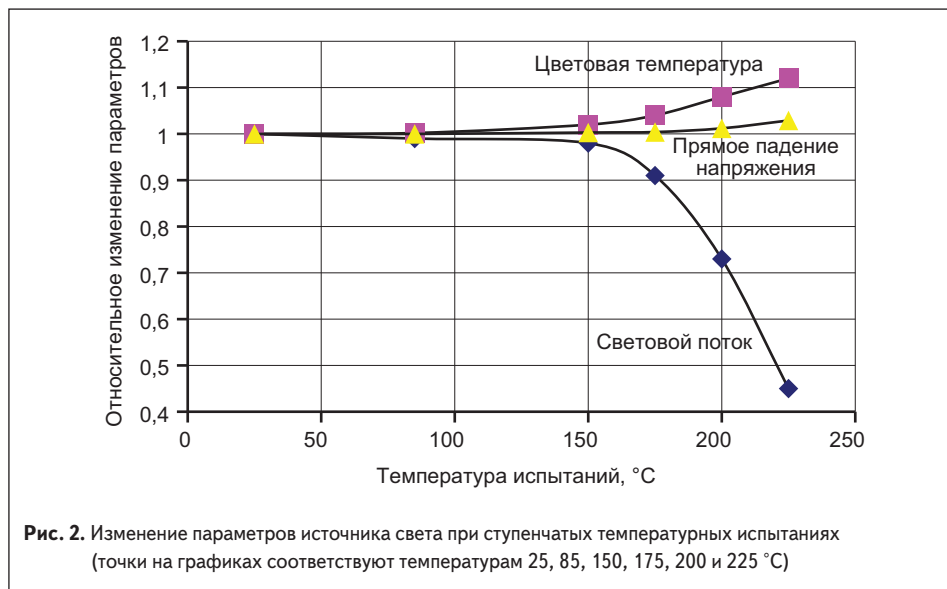


Рис. 2. Изменение параметров источника света при ступенчатых температурных испытаниях (точки на графиках соответствуют температурам 25, 85, 150, 175, 200 и 225 °С)

Исходя из закона Аррениуса, для ускорения процесса деградации при испытаниях полупроводниковых источников света КИПД154А92-Б3 необходимо повысить температуру в испытательной камере с 25 до 85 °С. Однако реальный коэффициент ускорения при этих температурах значительно выше расчетного. Это обусловлено несколькими причинами, основной из которых является увеличение температуры нагрева *p-n*-перехода, связанное с уменьшением в процессе испытаний внутренней и внешней квантовой эффективности и увеличением за счет этого выделяющегося в кристалле тепла. Повышение температуры окружающей среды неоднозначно влияет на изменение величины внешнего квантового выхода. Так, зависимость светового потока от температуры светодиода без люминофора может быть описана с помощью известной формулы [1]:

$$I(t) = I_{300} \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right), \quad (1)$$

где  $T_c$  — характеристическая температура кристалла (для GaN  $T_c = 1600$  К). Согласно экспериментальным данным, температурный коэффициент для светового потока составляет порядка 1–1,5% на каждые 10 °С перегрева.

При наличии в составе светодиода люминофора температурная зависимость выхода люминесценции хорошо описывается формулой Мотта:

$$\eta(T) = \frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)}, \quad (2)$$

где:  $A$  — константа тушения;  $E$  — кажущаяся энергия активации тушения люминесценции;  $\eta_0$  — квантовый выход люминесценции при комнатной температуре.

Температурная зависимость светового потока для светодиода с люминофором с учетом (1) и (2) может иметь вид:

$$I(t) = I_{300} \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right) \times \left( \frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)} \right). \quad (3)$$

Тогда, по экспериментальным данным, температурный коэффициент для светового потока составляет уже порядка 4–6% на каждые 10 °С перегрева [4, 5]. Основной причиной увеличения скорости деградации является дополнительный нагрев люминофора излучением, исходящим из кристалла, плотность потока которого достигает 100–150 Вт/см<sup>2</sup>. А ввиду того что теплопроводность материала люминофорного покрытия мала и не превышает 1 Вт/м·К, между покрытием и кристаллом возникает градиент температур.

Таким образом, при учете общего снижения внешнего квантового выхода при повышенной температуре испытаний происходит увеличение

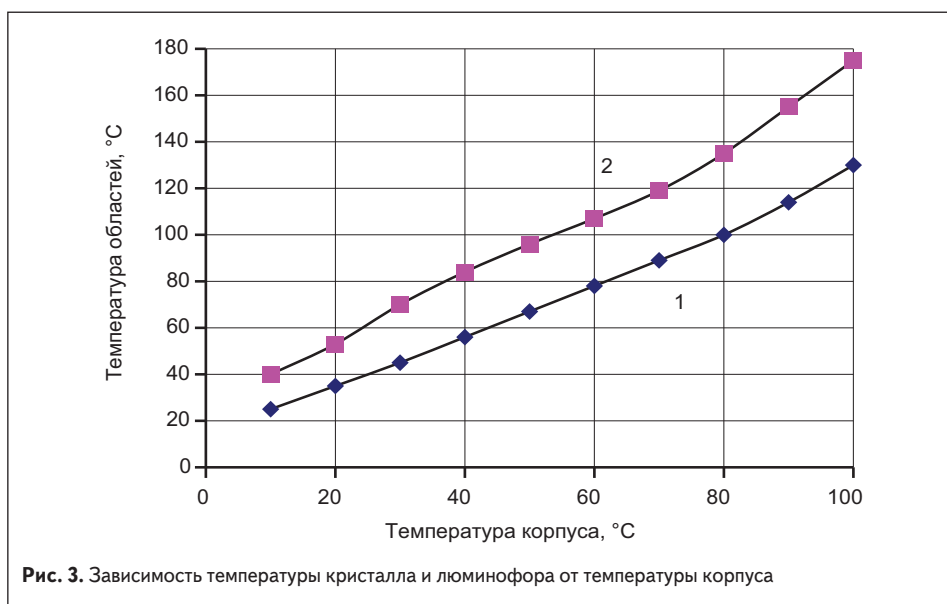


Рис. 3. Зависимость температуры кристалла и люминофора от температуры корпуса

выделяемой тепловой мощности. Следовательно, реальная температура кристалла при повышенной температуре существенно выше, чем расчетная. При этом температура люминофорного покрытия также может быть значительно выше, чем кристалла. На рис. 3 представлены экспериментальные измерения температуры кристалла и люминофорного покрытия при различных температурах основания корпуса светодиода. Как следует из зависимостей, градиент температур  $\Delta T$  кристалл–люминофор возрастает с повышением температуры испытаний: от 20 °С при температуре корпуса +25 °С до 40 °С при +85 °С, что связано с увеличением поглощения оптического излучения в люминофорном покрытии и уменьшением его коэффициента теплопроводности. Температура кристалла и люминофора увеличивается также и со временем ускоренных испытаний. Чем дольше время испытаний и выше коэффициент ускорения, тем выше температура. Если аппроксимировать уменьшение светового

потока светодиода в процессе испытаний экспоненциальной зависимостью, то повышение температуры кристалла в процессе испытаний можно представить в виде:

$$T(t) = T(t=0) \exp(\alpha t), \quad (4)$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент.

$$\alpha = \left(\frac{1}{t}\right) \ln\left(\frac{T(t)}{T(t=0)}\right),$$

где:  $T(t)$  — текущее значение температуры;  $T(t=0)$  — температура в начале испытаний;  $t$  — время испытаний. Одновременно, наряду с перечисленными выше явлениями, происходит деградация омических контактов, проявляющаяся в увеличении их сопротивления, приводящего к увеличению прямого падения напряжения на кристалле (рис. 4).

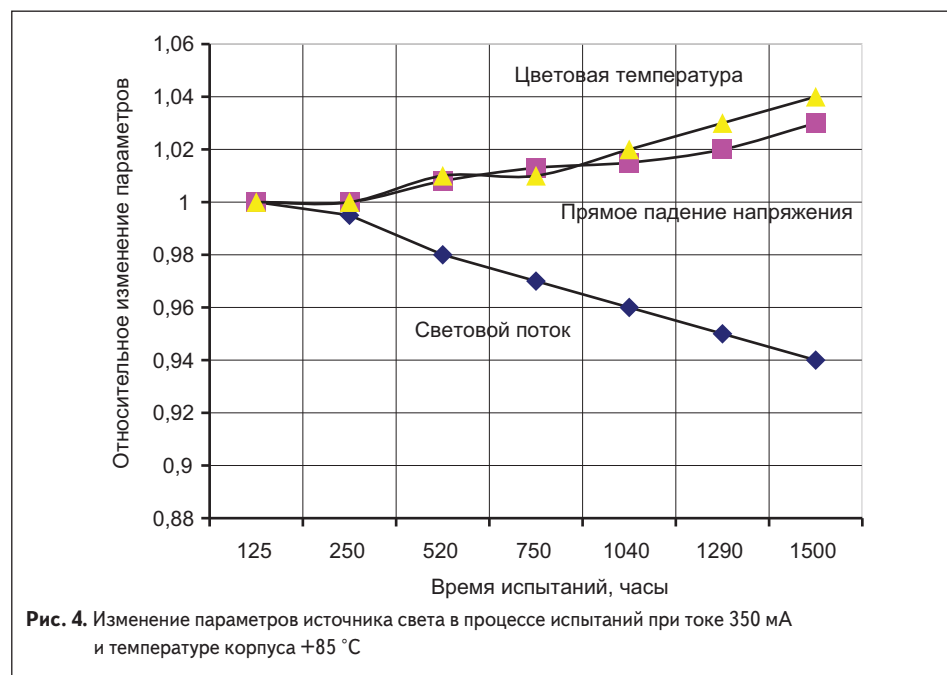


Рис. 4. Изменение параметров источника света в процессе испытаний при токе 350 мА и температуре корпуса +85 °С

Так как деградация омических контактов происходит за счет процессов диффузии элементов между слоями металлизации и кристалла, то изменение омического сопротивления  $R_C$  во времени можно описать зависимостью:

$$R_C = R_{C_0} + \gamma \times \exp\left(\frac{-E_a}{2kT}\right) \times \sqrt{t}, \quad (5)$$

где:  $R_C$  — контактное сопротивление в текущий момент времени [Ом];  $R_{C_0}$  — контактное сопротивление в начальный момент времени [Ом];  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности; энергия активации  $E_a$  [эВ] (энергия активации  $E_a$  деградационных явлений в омических контактах у полупроводников типа А<sup>1</sup>В<sup>v</sup> имеет величину порядка 1 эВ);  $t$  — время испытаний;  $k$  — постоянная Больцмана.

На графике (рис. 4) представлены изменения светового потока, прямого падения напряжения и цветовой температуры в ходе испытаний источников света КИПД154А92-Б3 при температуре

корпуса +85 °С и прямом токе 350 мА в течение 1500 ч. Основываясь на результатах измерения температуры кристалла до и после испытаний, возможно сделать следующие выводы:

- При ускоренных испытаниях при +85 °С в течение 1500 ч наблюдается превышение температуры кристалла по сравнению с начальной температурой на 6,5 °С. При этом коэффициент ускорения увеличивается в полтора раза.
- При ступенчатых испытаниях только на шестой ступени при температуре +225 °С за 24 ч превышение температуры достигло 21 °С.
- При ускоренных испытаниях на долговечность до достижения падения светового потока на 30% от начального температура кристалла в конце срока испытаний повысится на 18–20 °С по сравнению с начальной температурой.

Таким образом, по нашему мнению, на тепловые процессы при ускоренных испытаниях большое влияние оказывает возникающий градиент температур в системе кристалл–люминофор. ●

## Литература

1. Шуберт Ф. Светодиоды. М.: Физматлит. 2008.
2. Дохтуров В. В., Смирнов С. В. Контроль теплового режима кристаллов в светодиодных лампах // Полупроводниковая светотехника. 2012. № 5.
3. Дохтуров В. В., Смирнов С. В., Гончарова Ю. С. Влияние локализации тепловыделения на тепловое сопротивление мощных полупроводниковых источников света // Полупроводниковая светотехника. 2013. № 3.
4. Смирнов С. В., Саврук Е. В., Гончарова Ю. С. Температурная зависимость спектров излучения светодиодов белого свечения на основе нитрида галлия и его твердых растворов // Доклады ТУСУР. 2011. №2(24), ч. 2.
5. T. Khanh, C. Singer, S. Bruckner. Messung von Lichtstrom und Lichtausbeute an modernen Hochleistungslenchtdioden // Licht. 2007. № 9.