

УДК 536.21

К.В. Короткова, М.А. Романова, С.В. Смирнов

Температурная и временная стабильность колориметрических параметров полупроводниковых источников света

Установлено влияние температуры и длительности работы полупроводникового источника света на величину цветовой температуры его излучения. Показано, что основной вклад в увеличении её значения дают температурное гашение люминесценции и деградационные процессы в люминофорном покрытии.

Ключевые слова: полупроводниковый источник света, кристалл, люминофор, цветовая температура.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-38-41

Полупроводниковый источник света представляет собой оптический прибор, преобразующий электрическую энергию в излучение, близкое по спектральному составу к белому свету. Кристалл на основе гетероструктуры GaN-GaInN генерирует монохроматическое излучение длиной волны 450–460 нм, которое с помощью люминофора частично преобразуется в немонахроматическое излучение красно-желтой области спектра. Смесь потоков излучения кристалла и люминофора позволяет получить белый свет с коррелированной цветовой температурой от 3000 до 6000 К. Величина цветовой температуры определяется соотношением потоков излучения в синей и красно-желтой областях спектра. Так как все параметры полупроводникового источника света зависят от температуры кристалла и люминофора, то и цветовая температура источника является термозависимой величиной. Цвет излучения также зависит и от времени эксплуатации источника света: общеизвестен факт смещения цветовой температуры в сторону её увеличения [1].

Для преобразования излучения кристалла в красно-желтый свет используются твердые кристаллические люминофоры, преимущественно на основе порошка из иттрий-алюминиевых и иттрий-гадолиниевых гранатов легированных церием [2]. Порошок, состоит из зерен сферической или неправильной формы размерами в пределах от 3 до 30 мкм. Для обеспечения прочности и технологичности порошок смешивают с кремний–органическим компаундом, который в виде слоя толщиной от 200 до 500 мкм, наносится на поверхность кристалла. Возбуждающее излучение, проходя сквозь слой композита, претерпевает отражение и поглощение на отдельных зернах люминофора. В результате в зернах порошка возникает свечение люминесценции, которое, распространяясь в слое, рассеивается и частично поглощается. Предполагаем, что люминофор является направленно-рассеивающей с преимущественным пропусканием «мутной средой». Тогда, путем сопоставления диаграмм направленности излучения кристалла без люминофора и с люминофором, возможно, определить коэффициенты поглощения и рассеяния излучения покрытия [3, 4]. Таким образом, входящий в люминофор поток излучения из

кристалла испытывает поглощение и рассеяние, а его величина в осевом направлении выражается формулой

$$I(d) = I_{\alpha}(d) + I_{\rho}(d) = I_0 \exp[-(\alpha + \rho)d], \quad (1)$$

$I(d)$ – поток излучения, проходящий через люминофор; I_0 – поток излучения, входящий в люминофор; $I_{\alpha}(d)$ – поток излучения, поглощенный в люминофоре; $I_{\rho}(d)$ – поток излучения рассеянный люминофором; d – толщина слоя люминофора; α – коэффициент поглощения люминофора; ρ – коэффициент рассеяния люминофора. Экспериментально установлено, что типичные диапазоны изменения коэффициента поглощения находятся в интервале от 30 до 70 см⁻¹, а коэффициента рассеяния – от 20 до 30 см⁻¹.

Интенсивность свечения люминофора зависит не только от величины поглощенного потока излучения, но и от температуры: чем выше рабочая температура, тем слабее свечение. Для эффекта термического гашения люминесценции характерно уменьшение выходной оптической мощности за счет увеличения вероятности безызлучательных переходов. Рабочая температура люминофора зависит как от температуры окружающей среды, так и от температуры поверхности полупроводникового кристалла. Кроме того, разогрев люминофора может происходить под воздействием поглощенного в нем излучения кристалла.

Повышение температуры окружающей среды неоднозначно влияет на изменение величины суммарного внешнего квантового выхода источника света. Так, зависимость светового потока от температуры кристалла без люминофора может быть описана с помощью известной формулы [1]

$$I(T) = I(300K) \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right), \quad (2)$$

где $I(300K)$ – световой поток при температуре кристалла 300 К; 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.

Температурная зависимость выхода излучения из люминофора описывается формулой Мотта [2]:

$$\eta(T) = \frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)}, \quad (3)$$

где A – константа тушения; E_a – кажущаяся энергия активации тушения люминесценции; η_0 – квантовый выход люминесценции при комнатной температуре.

Таким образом, температурная зависимость светового потока для кристалла с люминофором имеет вид

$$I(T) \approx I(300K) \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right) \times \left[\exp(-\rho d) + \exp(-\alpha d) \left(\frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)} \right) \right]. \quad (4)$$

Тепловой режим кристалла зависит не только от температуры окружающей среды, но и от процессов выделения тепла в его активной области [5–7]. Кроме того, дополнительное выделение тепла происходит и в люминофорном покрытии кристалла, обусловленное процессами поглощения излучения. В работе была проведена теоретическая оценка температуры покрытия на примере модели источника света, представленной на рис. 1.

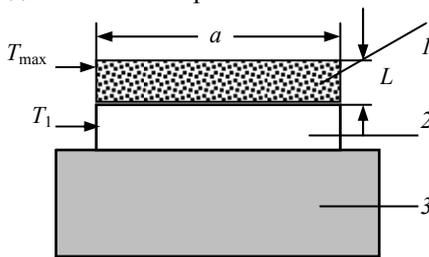


Рис. 1. Тепловая модель полупроводникового источника света: 1 – люминофор; 2 – кристалл; 3 – корпус

Оценку температуры люминофорного покрытия возможно провести, используя известное решение уравнения теплопроводности для плоской пластины с равномерно распределенным по её объёму источником тепла.

Примем, что поверхность люминофорного покрытия, контактирующая с кристаллом, имеет постоянную температуру T_1 , теплообмен с поверхности которой может осуществляться только конвекцией, фактически является теплоизолированной. Таким образом, если пренебречь конвективным теплоотводом с поверхности покрытия, то математически установившееся температурное поле в момент времени τ в кристалле будет описываться уравнением теплопроводности Лапласа [8]:

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} + \frac{q_B}{\lambda} = 0, \quad (5)$$

где q_B – плотность выделяющейся тепловой мощности излучения в единице объёма; λ – коэффициент теплопроводности люминофора.

Первое граничное условие имеет простой вид: $T(0) = T_1$.

Второе граничное условие, требующее чтобы поверхность при $x = L$ была теплоизолированной, следовательно, градиент температуры на ней равен нулю:

$$\left. \frac{dT(x)}{dx} \right|_{x=L} = 0. \quad (6)$$

Решение этого уравнения известно [8], распределение температуры по толщине покрытия подчиняется параболическому закону, при этом максимальная температура достигается на поверхности пластины при $x = L$.

$$\frac{T_{\max}}{T_1} = 1 + \frac{q_B L^2}{2\lambda T_1}. \quad (7)$$

Количество тепла, выделяемое в объёме люминофорного покрытия толщиной L с характерным размером a в единицу времени, определяется выражением [9]

$$q_B = \alpha L a^2 I_0 \exp(-\alpha L), \quad (8)$$

где α – коэффициент поглощения люминофора; I_0 – световой поток. Оценим коэффициент теплопроводности люминофорного покрытия, состоящего из кремнийорганического компаунда и порошка иттрий-алюминиевого граната, легированного церием. Соотношение компонент по весу: 90% кремнийорганики и 10% ИАГ (Ce). Переведем весовые соотношения в объёмные, получим, что объёмная доля компаунда $v_k = 0,975$, а доля люминофора $v_f = 0,0225$. Используем формулу Бургера [10] для теплопроводности смеси, состоящей из связки и сферических частиц:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \frac{v_k \lambda_k + c v_f \lambda_f}{v_k + c v_f}. \quad (9)$$

В этой формуле, кроме объёмных долей, введены следующие обозначения: λ_k – теплопроводность компаунда (0,2 Вт/мК), λ_f – теплопроводность ИАГ (13 Вт/мК), $c = \lambda_k/\lambda_f = 0,015$. На рис. 2 представлены результаты расчета температуры покрытия для круглого кристалла диаметром 1 мм, из которых следует, что температура люминофора может существенно превышать температуру кристалла. Это может привести к уменьшению квантовой эффективности люминофора и к изменению соотношения интенсивностей цветов: синего и красно-желтого.

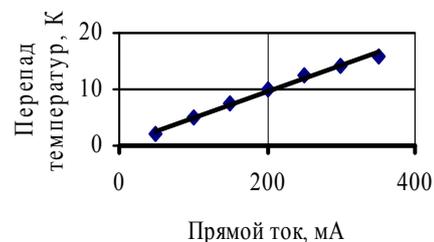


Рис. 2. Величина среднего перегрева люминофорного покрытия относительно поверхности кристалла в зависимости от прямого тока

Экспериментальная проверка сделанных предположений проводилась на полупроводниковых ис-

точниках света КИПД154А92 (АО НИИПП, Томск). Измерение коррелированной цветовой температуры, а также и величины светового потока в выделенных светофильтрами диапазонах излучения источника осуществлялось с помощью спектрометра AvaSpec-2048 в диапазоне температур от комнатной до +100 °С. Контроль температуры проводился как с помощью терморпары, закрепленной на поверхности корпуса источника света, так и бесконтактным методом [5].

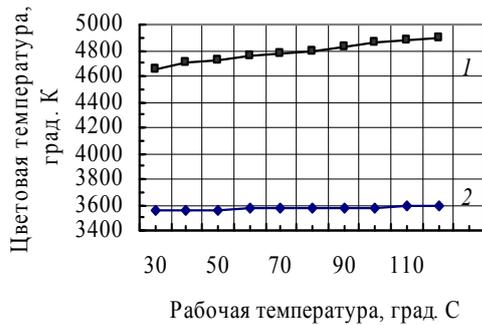


Рис. 3. Зависимость цветовой температуры полупроводниковых источников света КИПД154А92 от рабочей температуры: 1 – «холодного света»; 2 – «теплого света»

Как следует из зависимостей рис. 3, при повышении температуры корпуса источника наблюдается увеличение цветовой температуры. Это увеличение в большей мере проявляется для источников «холодного света», чем для источников «теплого света», что связано с различиями в составах люминофорных покрытий.

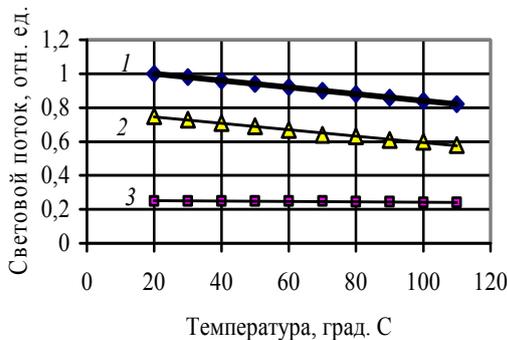


Рис. 4. Зависимость светового потока источника света от температуры: 1 – полный световой поток; 2 – световой поток в диапазоне длин волн от 500 до 800 нм; 3 – световой поток в диапазоне длин волн от 420 до 480 нм

На рис. 4 представлены результаты измерений светового потока полупроводникового источника света КИПД154А92, из которых следует, что световой поток из кристалла в диапазоне 420–480 нм практически не изменяется. Этот эксперимент подтверждает определяющее влияние квантовой эффективности люминофора на величины полного светового потока и коррелированной цветовой температуры источника света. Длительная работа источника света при повышенных температурах может привести к необратимому процессу снижения квантовой

эффективности люминофора. Для установления зависимости светового потока и цветовой температуры источника света от срока службы были проведены его испытания при температуре +85 °С в течение 2000 ч, при рабочем токе 350 мА. Результаты испытаний представлены на рис. 5. В процессе испытаний наблюдается уменьшение светового потока изделий и увеличение прямого падения напряжения и цветовой температуры. Эти изменения преимущественно обусловлены физико-химическими процессами как в кристалле, так и люминофоре.

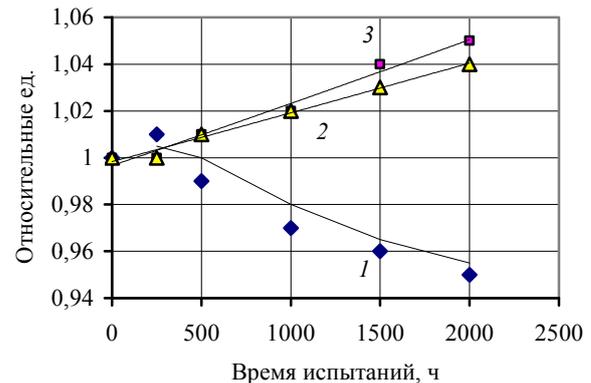


Рис. 5. Изменение параметров источника света КИПД154А92 в процессе испытаний при токе 350 мА и температуре корпуса 85 °С: 1 – световой поток; 2 – прямое падение напряжения; 3 – цветовая температура

Важнейшим фактором, оказывающим влияние на результаты ускоренных испытаний, является также рост температуры кристалла в процессе испытаний. Рост температуры обусловлен как уменьшением квантовой эффективности люминофора, так и увеличением падения напряжения при постоянном токе испытаний. Таким образом, происходит увеличение выделяющейся в кристалле тепловой мощности за время испытаний в 2000 ч на 10–15%, что приводит соответственно к повышению температуры кристалла и люминофора в конце испытаний на 8–12 °С.

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что коррелированная цветовая температура полупроводниковых источников света имеет сильную зависимость как от рабочей температуры источника, так и времени его эксплуатации. Увеличение цветовой температуры связано с изменением соотношения световых потоков в синем и красно-желтом диапазоне длин волн, что связано с уменьшением квантовой эффективности полупроводникового материала и люминофорного покрытия, обусловленного повышенной температурой и физико-химическими процессами деградации.

Литература

1. Никифоров С.Г. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты и технологии. – 2005. – № 7. – С. 16–24.
2. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ.; под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.

3. Девярых Э.В. Люминесцентные лампы. Люминофоры и люминофорные покрытия / Э.В. Девярых, В.Ф. Дадонов. – Мордов. ГУ, 2007. – 344 с.

4. Смирнов С.В. Температурная зависимость спектров излучения светодиодов белого свечения на основе нитрида галлия и его твердых растворов / С.В. Смирнов, Е.В. Саврук, Ю.С. Гончарова // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), ч. 2. – С. 55–58.

5. Гончарова Ю.С. Спектральный метод бесконтактного измерения температуры кристаллов полупроводниковых источников света / Ю.С. Гончарова, М.А. Романова, С.В. Смирнов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 2(36). – С. 38–40.

6. Дохтуров В.В. Влияние локализации тепловыделения на тепловое сопротивление мощных полупроводниковых источников света / В.В. Дохтуров, С.В. Смирнов, Ю.С. Гончарова // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – Т. 3, № 23. – С. 18–19.

7. Дохтуров В.В. Контроль теплового режима кристаллов в светодиодных лампах / В.В. Дохтуров, С.В. Смирнов // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – Т. 5, № 19. – С. 94–95.

8. Крейт Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.

9. Гусев В.Э. Лазерная оптоакустика / В.Э. Гусев, А.А. Карабутов. – М.: Наука, 1991. – 304 с.

10. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – М.: Энергия, 1974. – 264 с.

Короткова Клавдия Владимировна

Студентка каф. физической электроники ТУСУРа

Тел.: +7-952-151-05-56

Эл. почта: klavdiya_95k@mail.ru

Романова Мария Андреевна

Ст. преподаватель каф. электронных средств автоматизации и управления ТУСУРа

Тел.: +7-913-118-26-68

Эл. почта: rma-rda@yandex.ru

Смирнов Серафим Всеволодович

Д-р техн. наук, профессор

каф. физической электроники ТУСУРа

Тел.: +7-909-540-86-23

Эл. почта: serafim.smirnov@mail.ru

Korotkova K.V., Romanova M.A., Smirnov S.V.

Temperature dependence of radiation power and coloured temperature of semiconductor light source

The influence of the corps temperature of semiconductor light source on correlated coloured temperature of its radiation had been investigated. It is shown, that the main impact on temperature increasing is produced by temperature extinction of luminescence of phosphor coating.

Keywords: semiconductor light source, phosphor, correlated coloured temperature.