

УДК 621:382

Ю.С. Гончарова, М.А. Романова, С.В. Смирнов

Спектральный метод бесконтактного измерения температуры кристаллов полупроводниковых источников света

Описан метод бесконтактного определения температуры полупроводниковых источников света. Приводятся теоретический анализ метода, а также результаты измерения температуры полупроводниковых источников света в пластмассовом корпусе.

Ключевые слова: полупроводниковый источник света, температура, спектр излучения, ширина спектра излучения.

Одним из важнейших параметров полупроводниковых светодиодов синего и белого света на основе нитрида галлия является температура активной области кристалла, которая в значительной мере определяет величину светоотдачи, спектр излучения, а также эксплуатационную надежность и срок службы источников [1, 2]. При условии соблюдения оптимального теплового режима срок службы диодов может достигать свыше 100000 ч, нарушение же теплового режима (повышение температуры кристалла более 115...125 °С) может привести к снижению срока службы более чем в 10 раз.

Точное определение температуры активной области кристалла светодиодов в процессе их испытаний и эксплуатации представляет собой технически сложную задачу, при этом существует несколько проблем:

1. Светодиоды при испытаниях и эксплуатации находятся в составе различных устройств, содержащих другие тепловыделяющие элементы, такие как другие светодиоды, драйверы, стабилизаторы, нагрузочные резисторы, которые ограничивают возможности отвода тепла и приводят к дополнительному нагреву контролируемого объекта.

2. Светодиоды эксплуатируются и испытываются в широком температурном диапазоне окружающей среды от –60 до +85 °С, а все теплофизические характеристики материалов, из которых выполнены элементы, входящие в состав устройства, зависят от температуры.

3. В процессе эксплуатации и испытаний происходит уменьшение внешней квантовой эффективности светодиода, что приводит к увеличению тепловыделения в кристалле.

4. Так как прямой ток светодиодов может изменяться в широких пределах от единиц до сотен миллиампер, то при повышенных значениях тока происходит локализация его плотности по поверхности и объему кристалла, что приводит к появлению участков с высокой температурой.

Наиболее распространенными методами оценки температуры кристалла светодиода является её расчет с использованием измеренной величины теплового сопротивления $p-n$ -переход-корпус. Этот метод дает весьма приблизительную оценку температуры.

В данной работе рассматривается метод измерения температуры источников света путем анализа формы спектра его излучения.

Известно, что форма спектра рекомбинационного излучения в полупроводниковом материале может быть описана выражением [2]

$$I(h\nu) = B(h\nu - \Delta E_g)^{1/2}, \quad (1)$$

где $I(h\nu)$ – интенсивность излучения; h – постоянная Планка; ν – частота колебаний фотонов; ΔE_g – ширина запрещенной зоны; B – постоянная, которая рассчитывается по формуле

$$B = \frac{2q^2 m_r^{3/2}}{nch^2 m_c}, \quad (2)$$

где m_c – эффективная плотность электронов; m_r – приведенная эффективная масса электрона и дырки; n – показатель преломления. Форма спектра зависит от температуры. Так, интенсивность излучения изменяется по экспоненциальному закону как:

$$I(h\nu) \sim \sqrt{h\nu - \Delta E_g} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right). \quad (3)$$

При увеличении температуры спектр излучения также уширяется, а его максимум сдвигается в сторону низких энергий. Ширина спектра на уровне 0,5 от максимального значения, зависит от температуры и равна

$$\Delta E_{0,5} \approx 1,8kT \text{ или } \Delta \lambda_{0,5} \approx \frac{1,8kT\lambda^2}{hc}. \tag{4}$$

Но подобная температурная зависимость справедлива только для гомоперехода. Для гетероструктуры GaN – InGaN со множественными квантовыми ямами зависимость формы спектра от температуры обусловлена изменением эффективной ширины запрещенной зоны ΔE_g^* , в простейшем случае определяемой как [3]:

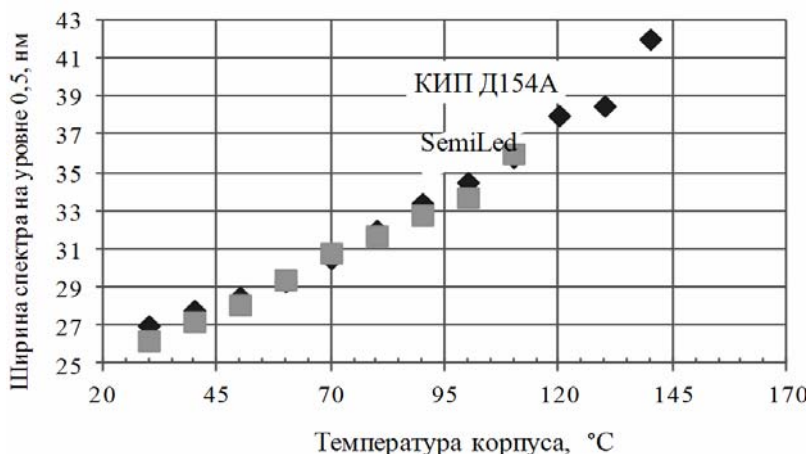
$$\Delta E_g^* = \Delta E_g(\text{InGaN}) + E_{c1} + E_{v1} + \sum_i \Delta E_i, \tag{5}$$

где $\Delta E_g(\text{InGaN})$ – ширина запрещенной зоны InGaN; E_{c1} и E_{v1} – положения первых уровней размерного квантования для электронов и дырок в ямах; под знаком суммы содержатся другие виды вкладов в эффективную ширину зоны вследствие деформации пьезоэффектов, кулоновского взаимодействия электронов и дырок и др. Все входящие в формулу параметры зависят от температуры и, следовательно, дают свой вклад в форму и ширину спектра излучения. Кроме того, значения этих параметров могут изменяться в зависимости от содержания индия в гетероструктуре, от количества и ширины квантовых ям и особенностей технологии их получения.

Для исследуемых в работе гетероструктур GaN-InGaN со множественными квантовыми ямами, используемых при изготовлении источников света, температурная зависимость ширины линии излучения на уровне 0,5 от максимального значения имеет следующий вид: $\Delta E_{0,5} \approx 3 \div 4kT$, причем уширение спектра происходит в основном в сторону меньших энергий (больших длин волн).

Следовательно, температурную зависимость ширины спектра возможно использовать для контроля температуры активной области. Для этого необходимо определить температурный коэффициент (приращение ширины спектра при нагреве на один градус, нм/К), проводя измерения ширины при нескольких значениях температуры кристалла [4, 5]. На практике это реализуется путем измерения в термостате в импульсном и непрерывном режимах при одном значении прямого тока. Очень важен импульсный режим измерений, исключающий процесс саморазогрева источника. Поэтому измерения проводят при длительности импульсов порядка 1 мкс и скважности не менее 1000. На рис. 1 показаны зависимости ширины спектра на уровне 0,5 от максимального значения для импульсного тока для двух источников синего света производства ОАО НИИПП (Россия) типа КИП Д154А и фирмы SemiLed (Китай) в пластмассовом корпусе типа 5050. Измерения проведены с помощью волоконного спектрометра типа USB2000.

Рис. 1. Зависимость ширины спектра на уровне 0,5 от максимального значения для двух типов источников света при импульсном токе 350 мА и различной температуре корпуса



На рис. 2 представлены измеренные зависимости перепада температур кристалл–корпус источников света при постоянном токе. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами расчетов и измерений, полученных другими методами.

В заключение следует отметить, что разработанный бесконтактный метод измерения температуры полупроводниковых источников света является весьма перспективным для осуществления контроля температуры как отдельных изделий, так и в составе светотехнических устройств, например в лампах освещения [6, 7].

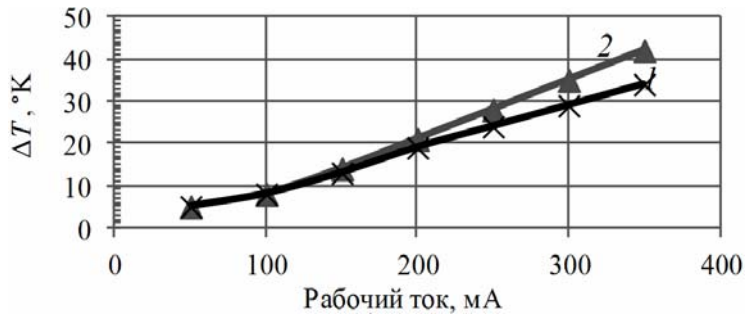


Рис. 2. Зависимость перепада температур ΔT активная область кристалла – окружающая среда от рабочего тока:
1 – SemiLed; 2 – КИПД 154А.
($T_{cp} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Литература

1. Шуберт Ф. Светодиоды. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
2. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. – М.: Мир, 1973. – 456 с.
3. Кудряшев В.Е. Спектры и квантовый выход излучения светодиодов с квантовыми ямами на основе гетероструктур и GaN-зависимость от тока и напряжения / В.Е. Кудряшев, С.С. Мамакин, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович // ФТП. – 2001. – Т. 35, № 7. – С. 861–868.
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. Пат. 2538070 РФ, МПК G01 R31/265 G01 K 7/00 Способ бесконтактного определения неравномерности температурного поля в полупроводниковых источниках света / С.В. Смирнов (РФ), Е.В. Саврук (РФ), Ю.С. Гончарова (РФ). – № 2013133512/28; заявл. 18.07.2013; опубл. 10.01.2015. Бюл. № 1.
6. Пат. № 116693 РФ, МПК H 01 L 33/00 Устройство для измерения температуры полупроводниковых источников света в осветительных устройствах / С.В. Смирнов (РФ), Е.В. Саврук (РФ), Ю.С. Гончарова (РФ). – № 2011151030/28; заявл. 14.12.2011; опубл. 27.05.2012. Бюл. № 15.
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.

Гончарова Юлия Сергеевна

Аспирант каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8-913-816-06-90
Эл. почта: xel9i@mail.ru

Романова Мария Андреевна

Ст. преподаватель каф. электронных средств автоматизации и управления ТУСУРа
Тел.: 8-913-118-26-68
Эл. почта: rma-rda@yandex.ru

Смирнов Серафим Всеволодович

Д-р техн. наук, профессор каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8-909-540-86-23
Эл. почта: serafim.smirnov@mail.ru

Goncharova Y.S., Romanova M.A., Smirnov S.V.

Spectral method for the contactless temperature measurement of crystals in semiconductor light sources

The paper describes a method for contactless temperature measurement of semiconductor light sources. We present a theoretical analysis of the method and the results of temperature measuring of semiconductor light sources in a plastic case.

Keywords: semiconductor light source, temperature, radiation spectrum, spectral width of radiation.