УДК 621.315.592

С.Г. Еханин, М.Н. Романовский, А.А. Томашевич

Оценка локального перегрева в гетероструктуре светоизлучающего диода на основе GaN

Предлагается метод оценки локального перегрева светоизлучающего диода. В основу расчета положено аналитическое решение уравнения теплопроводности для случая цилиндрического теплового шнура в бесконечной среде.

Ключевые слова: электролюминесценция, гетероструктура, локальный перегрев, нитрид галлия.

Известно [1], что деградация светоизлучающего диода (СИД) при высокой плотности тока превосходит значения, наблюдаемые при низкой плотности тока даже при повышенной температуре окружающей среды.

При эксплуатации СИД под действием тока большой плотности происходит электродиффузионное перераспределение примесей в области скопления протяженных микродефектов (в особенности дислокаций), пронизывающих активную область СИД [2]. По мнению авторов, это приводит к локальным изменениям, в частности, к сильному локальному нагреву, механическим напряжениям и образованию дополнительных точечных дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации, которые, нагреваясь, способствуют дальнейшему образованию дефектов.

В данной статье приведены аналитические оценки температуры локального перегрева как в области отдельных протяженных дефектов, так и их скоплений.

Метод расчета. Пусть ток равномерно распределен по площади СИД без учета эффекта растекания тока. Допустим, что внутренний квантовый выход близок к 100%, а выделение тепла происходит только в области протяженного дефекта, где наблюдаются безызлучательные переходы и энергия электрического поля полностью превращается в тепловую (рис. 1).



Рис. 1. Источник тепла, равномерно распределенный в цилиндрическом шнуре

Рассмотрим одиночный протяженный дефект в виде цилиндрического шнура радиуса R (см. рис. 1). Сделаем также и другие допущения. Считаем шнур прямолинейным, имеющим осевую симметрию. Функция мощности f_0 теплового источника имеет сугубо локальный характер, однако по площади шнура она имеет равномерное распределение такое, что

$$f(r) = \begin{bmatrix} f_0, r < R\\ 0, r > R \end{bmatrix},\tag{1}$$

где *r* – расстояние от центральной точки шнура до некоторой точки *M* среды.

Поскольку толщина активной зоны *L* (длина теплового шнура) и радиус шнура *R* на несколько порядков меньше соответствующих размеров кристалла СИД, будем считать среду, в которой рассеивается тепло, бесконечной.

Уравнение теплопроводности имеет вид [3]

$$\frac{\partial T(M,t)}{\partial t} = a\Delta T(M,t) + f(M,t), \tag{2}$$

где T(M,t) – температура точки среды M в момент времени t; a – коэффициент температуропроводности; Δ – оператор Лапласа; $f(M,t) = \frac{q_v}{C \cdot \rho}$; q_v – плотность мощности тепловых источников; ρ – плотность среды. Начальное и граничное (асимптотическое) условия в цилиндрической системе координат имеют вид

$$\begin{cases} T(r,0)=0\\ T(\infty,t)=0 \end{cases}.$$
(3)

В соответствии с условием (3) величина T(M, t) есть разница между температурой в данной точке M в момент времени t и температурой среды до начала действия источников тепла. Для крат-кости будем называть величину T температурой.

Для любого момента времени температура максимальна в центре шнура, поэтому целесообразно рассмотреть изменение температуры при r = 0. Как показано в [4], изменение температуры в центре шнура описывается следующим выражением:

$$T(0,t) = f_0 t \left[1 - E_2 \left(\frac{R^2}{4at} \right) \right].$$
(4)

Величину функции мощности можно определить следующим образом:

$$f_0 = \frac{U \cdot I}{\pi R^2 L \cdot C \cdot \rho} = \frac{E \cdot I}{\pi R^2 C \cdot \rho},\tag{5}$$

где *U* – электрическое напряжение, приложенное к активной зоне; *I* – величина тока; *E* – напряженность электрического поля; *C* – удельная теплоемкость среды.

Оценим аргумент интегральной экспоненты E_2 . Для нитрида галлия температуропроводность $a = 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{c}$ [5]. Визуальные наблюдения показывают, что $R < 10^{-7}$ м. Отсюда при относительно небольших t (например, при $t = 10^{-3}$ с) получим:

$$\frac{R^2}{4at} < 10^{-6} . (6)$$

Данная оценка позволяет воспользоваться более простой формулой для вычисления перегрева в центре теплового шнура:

$$T(0,t) = \frac{E \cdot I}{4\pi\lambda} \left(1 - \gamma - \ln\frac{R^2}{4at} \right),\tag{7}$$

где $\lambda = a \cdot \rho \cdot C$ – коэффициент теплопроводности, а γ – постоянная Эйлера.

Как видно из выражения (7), существенное влияние на перегрев оказывают три параметра: напряженность электрического поля E, полный ток через тепловой шнур I и коэффициент теплопроводности среды λ . Значительно слабее влияет на перегрев радиус теплового шнура, так как входит в аргумент логарифма. Еще слабее должно влиять время воздействия напряжения на активную область СИД, поскольку в аргументе логарифма величина времени входит в первой степени.

Из трех параметров, существенно влияющих на перегрев, наиболее неопределенным оказывается величина тока в шнуре, которая определялась как величина рабочей плотности тока (*J*) СИД, умноженная на площадь торца теплового шнура. Как известно, современные СИД имеют среднюю величину плотности рабочего тока, равную $J = 150 \text{ A/cm}^2$ [6]. Таким образом, для радиуса величиной $R = 10^{-7}$ м величина полного тока равна: $I = J \cdot S = J \cdot \pi \cdot R^2 = 150 \cdot 10^4 \cdot 3.14 \cdot 10^{-14} \approx 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ A}.$

Как видно из этого выражения, величина радиуса теплового шнура и полный ток через активную зону СИД взаимно связаны, причем квадратично. Таким образом, следует ожидать очень сильную зависимость перегрева от радиуса теплового шнура.

Результаты расчета. Расчет производился в среде MathCAD по формуле (4) при следующих параметрах СИД на основе GaN: C = 431 Дж/(кг·K); $a = 4,3\cdot10^{-5} \text{ m}^2$ /c; $\lambda = 130 \text{ Вт/м·K};$ $\rho = 6,15\cdot10^3 \text{ кг/m}^3;$ $L = 50\cdot10^{-9} \text{ m};$ $J = 150 \text{ A/cm}^2;$ U = 3 B; $t = 10^2 \text{ c}.$ Ниже приведены результаты расчета температуры перегрева в центре теплового шнура от радиуса шнура, при $J = 150 \text{ A/cm}^2$ (табл. 1).

Таблица 1

Результаты расчета для плотности тока, равнои	15U A/(CM-
---	---------	-----

<i>R</i> , м	1.10^{-7}	1.10^{-6}	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	9.10^{-6}
Т, К	0,014	1,426	5,7	12,83	22, 82	35,65	51,35	69,9	91,3	115,5

Значения величины перегрева *T* в центре шнура при протекании тока *I* и при напряжении *U* даны для разных значений радиуса шнура.

Как видно из табл. 1, перегрев при радиусах тепловых шнуров, соответствующих размерам выходов одиночных дислокаций ($R \le 10^{-7}$ м), незначителен. Однако при наличии объединений дислокаций и других протяженных дефектов в виде кластеров диаметрами в несколько микрон перегрев существенно возрастает. Очевидно, с увеличением рабочей плотности тока СИД величина перегрева может достигать опасных для работоспособности СИД величин при меньших диаметрах скоплений протяженных дефектов. Ниже приведены результаты расчета температуры перегрева локальных областей СИД при рабочей плотности тока, равной 200 А/см² (табл. 2).

> Таблица 2 й 200 л/с.-²

Результаты расчета для плотности тока, равной 200 А/см ²										
<i>R</i> , м	$1 \cdot 10^{-7}$	1.10^{-6}	$2 \cdot 10^{-6}$	3.10^{-6}	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	9·10 ⁻⁶
Т, К	0,02	1,9	7,6	17,1	30,42	47,5	68,4	93,18	121,7	154,5

Как следует из расчета, опасный для структуры локальный перегрев может возникать вследствие неоправданно завышенной рабочей плотности тока, а также при длительной эксплуатации. В этом случае в результате процессов прорастания дислокаций и генерации дефектов могут образовываться кластеры площадью в несколько квадратных микрометров (более десяти). В случае наличия процесса электродиффузии из металлического электрода опасный перегрев может возникать и при меньших сечениях кластеров.

Заключение. Результатами расчета является зависимость температуры локального перегрева активной области СИД от величины радиуса теплового шнура и плотности рабочего тока.

Показано, что величина температуры перегрева существенно зависит от величины плотности тока возбуждения электролюминесценции СИД и размеров областей скопления дефектов.

С помощью данной методики расчета, зная геометрические размеры выходов одиночных дефектов и их скоплений, можно устанавливать оптимальную рабочую плотность тока.

Разработанный метод теплового расчета может стать основой для разработки методов неразрушающего контроля качества и обнаружения потенциально ненадежных светодиодов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в соответствии с договором №13.G25.31.0042 от 07.09.2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Высокомощные синие флип-чип светодиоды на основе AlGaInN / Д.А. Закгейм, И.П. Смирнова, И.В. Рожанский и др. // Физика и техника полупроводников (ФТП). – 2005. – Т. 39, вып. 7. – С. 885–889.

2. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов / Н.И. Бочкарева, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане и др. // ФТП. – 2006. – Т. 40, вып. 1. – С. 122–127.

3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1964. – 847 с.

4. Еханин С.Г. Определение температуры в центре токового шнура в слое NaCl в предпробивных электрических полях / С.Г. Еханин, Н.С. Несмелов, Л.Ю. Солдатова // Изв. вузов. Физика. – 2011. – № 1–2. – С. 248–251.

5. Акчурин Р.Х. Нитрид галлия – перспективный материал электронной техники. – Ч. 1. Фундаментальные свойства нитрида галлия / Р.Х. Акчурин, А.А. Мармалюк // Материаловедение. – 2001. – № 10. – С. 30–38.

6. Исследование тепловых процессов в мощных InGaN/GaN флип-чип светодиодах с использованием инфракрасной тепловизионной микроскопии / А.Л. Закгейм, Г.Л. Курышев, М.Н. Мизе-ров и др. // ФТП. – 2010. – Т. 44, вып. 3. – С. 390–396.

Еханин Сергей Георгиевич Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. конструирования узлов и деталей РЭС (КУДР) ТУСУРа Тел.: (382-2) 51-23-27 Эл. почта: exan@ultranet.tomsk.ru

Романовский Михаил Николаевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КУДР ТУСУРа Тел.: (382-2) 51-23-27 Эл. почта: rmn@vtomske.ru

Томашевич Александр Александрович

Аспирант каф. КУДР, мл. науч. сотрудник НИИ светодиодных технологий ТУСУРа Тел.: 8-923-431-01-81 Эл. почта: tom.alex@mail.ru

Ekhanin S.G., Romanovski M.N., Tomashevich A.A. Estimation of local overheating in the heterostructure of light-emitting diodes based on GaN

The article presents local overheating estimation method for LED structure. Calculations are based on theoretical solution of heat-transfer equation to the case of cylindrical thermal cord in infinite medium. Keywords: electroluminescence, heterostructure, local overheating, gallium nitride.