

06;12

## Определение локальных температур в структурах красных AlInGaP/GaAs светодиодов в импульсном режиме

© В.А. Сергеев, А.А. Широков

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники РАН  
E-mail: ufire@mv.ru*В окончательной редакции 16 июля 2008 г.*

Исследованы спектры излучения красных AlInGaP/GaAs светодиодов с многоямной гетероструктурой и распределенным брэгговским отражателем в импульсном режиме в диапазоне температур  $20 \div 100^\circ\text{C}$ , токов  $1 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-1}$  А и частот следования импульсов  $1 \div 10$  kHz. Установлено, что при коротких импульсах тока большой скважности, исключающих саморазогрев структуры, температурные зависимости длины волны максимума спектра основной и побочной полосы излучения имеют суперлинейный и сублинейный характер соответственно. На квазилинейном участке этих зависимостей температурный коэффициент сдвига основной полосы излучения уменьшается, а побочной — слабо растет с увеличением тока. Локальные температуры, определяемые по сдвигу спектра основной и побочной полосы, и их разность линейно возрастают с ростом длительности импульсов. Разность тепловых сопротивлений, вычисляемых по наклону зависимости локальных температур от средней греющей мощности, не зависит от величины тока и определяется параметрами слоев, разделяющих гетероструктуру и область переизлучения.

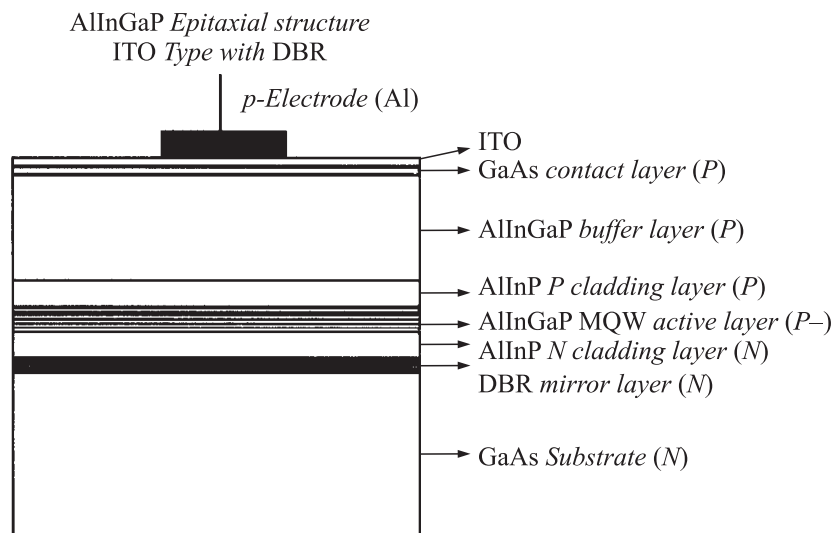
PACS: 85.60.Jb, 78.60.Fi

Известно [1], что локальные температуры светодиодных структур с GaAs подложкой, определяемые по смещению спектра основной и побочной полос излучения, существенно различны, поскольку область

генерации основной полосы и область „переизлучения“ пространственно разделены [2]. В [1] показано, что в светоизлучающих структурах на основе GaAlAs/GaAs, работающих в непрерывном режиме, при относительно небольших токах ( $< 100$  мА) температура, определяемая по смещению спектра основной полосы, меньше температуры, определяемой по смещению спектра основной полосы; разность температур была максимальной и равной  $\sim 12$  К при токе 50 мА. С увеличением тока температура области „переизлучения“ растет суперлинейно и при токах  $> 100$  мА разность локальных температур вообще меняет знак. Расчет локальных температур проводился по температурным коэффициентам ширины запрещенной зоны узкозонного и широкозонного полупроводников, которые полагались постоянными. Такой характер изменения локальных температур авторы [1] объясняли перераспределением рассеиваемой мощности по толщине структуры с ростом греющего тока. Однако оценки в рамках одномерной тепловой модели светоизлучающих диодов (СИД) [3,4] показывают, что перепад температуры  $\sim 10$  К на слое GaAs толщиной  $\sim 50$  мкм возможен при плотности рассеиваемой мощности порядка  $10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, что сравнимо с предельно достижимым в настоящее время уровнем плотности мощности в структурах СИД.

Представляет интерес определение локальных температур светодиодных структур в импульсном режиме, при котором величина греющего тока и распределение рассеиваемой мощности по толщине структуры остаются неизменными, а греющая мощность изменяется путем изменения скважности импульсов. При этом необходимо более детальное исследование температурных коэффициентов смещения спектра основной и побочной полосы излучения СИД в исследуемом диапазоне токов и температур.

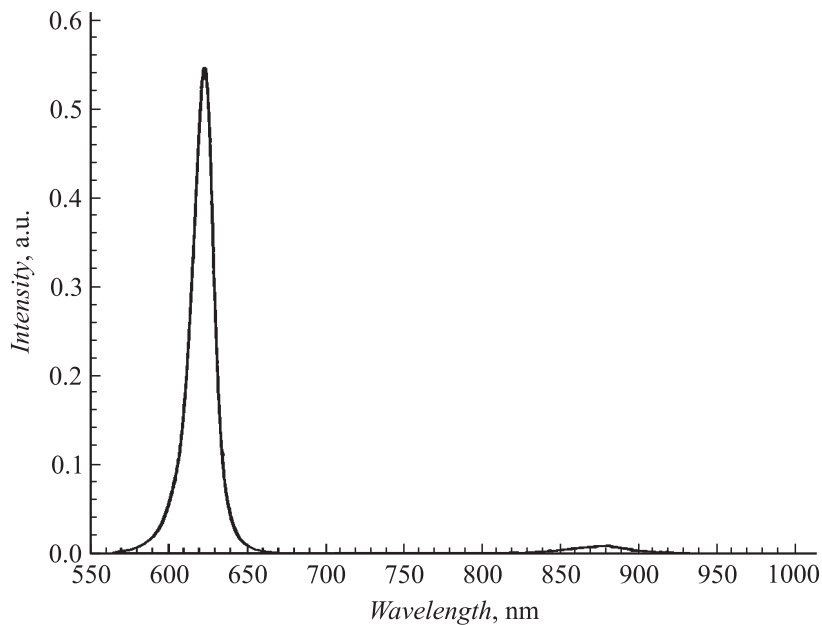
Исследовались температурные зависимости длины волны в максимуме основной  $\lambda I_{\max}$  и побочной  $\lambda II_{\max}$  полос излучения красных AlInGaP/GaAs светодиодов фирмы Vishey Semiconductors в диапазоне токов  $1 \div 200$  мА и температур  $20 \div 100^\circ\text{C}$ . Согласно данным о структуре исследованных СИД, имеющимся на сайте фирмы Vishey Semiconductors [5], двойная AlInGaP/GaP гетероструктура с множественными квантовыми ямами сформирована на GaAs подложке; между гетероструктурой и подложкой находятся AlInP защитный слой и распределенный брэгговский отражатель. Схема расположения слоев в светодиодном чипе показана на рис. 1, любезно предоставленном фирмой Vishey Semiconductors. Размеры чипа СИД —  $300 \times 300 \times 170$  мкм; площадь активной области  $S_a = 9 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>.



**Рис. 1.** Схема расположения слоев в структуре красного AlInGaP/GaAs светодиода.

На СИД подавались импульсы тока  $I$  с постоянной частотой следования, сигнал фотоприемника монохроматора МДР-3 усиливался трансимпедансным усилителем, с выхода которого поступал на вход цифрового осциллографа С9-7 и селективного нановольтметра, настроенного на частоту следования импульсов. Характерный вид спектра исследованных СИД при ширине входной и выходной щелей монохроматора 0.2 mm показан на рис. 2. Интенсивности излучения в максимуме спектров основной и побочной полос излучения различаются примерно на два порядка величины. Значения  $\lambda I_{\max}$  и  $\lambda II_{\max}$  определялись по регрессионным кривым, построенным в MathCad по измеренным спектрам. Оба способа регистрации сигнала — по показаниям цифрового осциллографа и селективного вольтметра — давали при такой обработке значения длин волн в максимуме спектра, различающиеся не более чем на 0.05 nm.

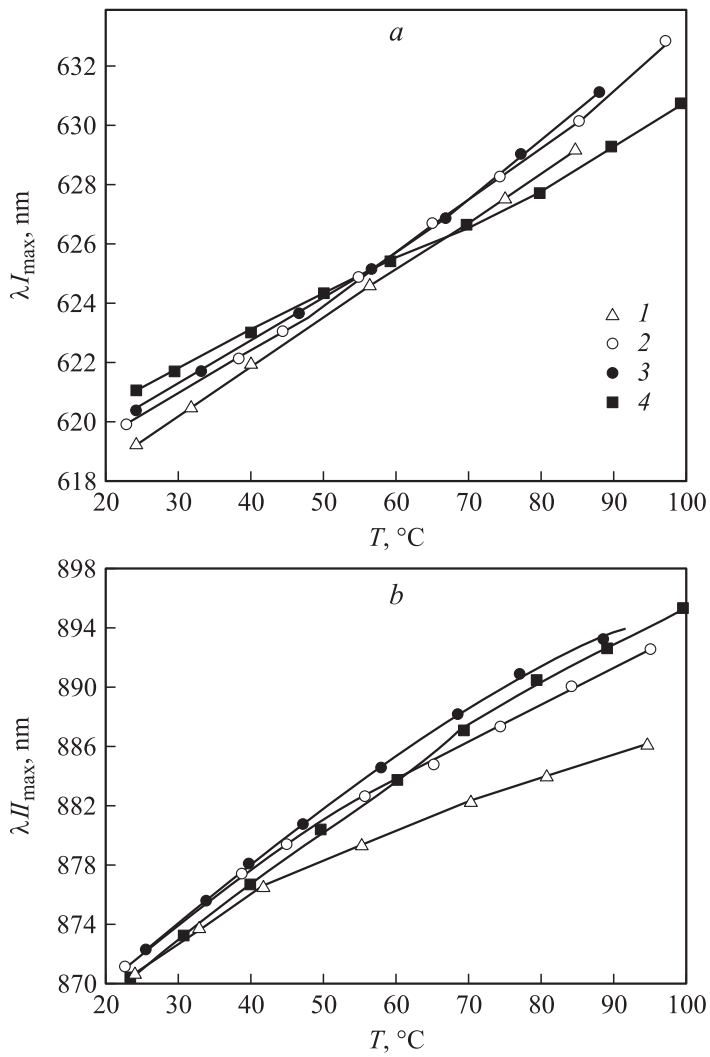
При подаче на светодиод импульсов тока с частотой следования  $F_{\text{pul}} = 1 \text{ kHz}$  и длительностью  $3 \mu\text{s}$  саморазогрев активной области структуры даже при токе 200 mA не превышает 0.3 K [3]. При ком-



**Рис. 2.** Типичный спектр излучения красного AlInGaP/GaAs светодиода.

натной температуре ( $T_0 = 23^\circ\text{C}$ ) и токах 1–50 мА в спектре излучения исследованных СИД наблюдались две полосы с максимумами при  $\lambda I_{\max} = 620.0 \text{ nm}$  и  $\lambda II_{\max} = 870.2 \text{ nm}$ . Максимум основной полосы соответствует энергии прямозонных переходов в широкозонном полупроводнике AlInGaP с шириной запрещенной зоны  $E_g = 2.0 \text{ eV}$ , максимум побочной полосы соответствует переизлучению в подложке GaAs с шириной запрещенной зоны  $E_g = 1.42 \text{ eV}$ .

При проведении температурных исследований светодиод размещался в массивном электрическом нагревателе с отверстием для вывода излучения. Для контроля температуры в капсуле светодиода проделывалось тонкое отверстие, в котором закреплялась термопара мультиметра МУ-64, измеряющего температуру с погрешностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Зависимости  $\lambda I_{\max}$  и  $\lambda II_{\max}$  от температуры одного из исследованных СИД при нескольких значениях тока приведены на рис. 3. С увеличением температуры обе полосы излучения смещаются в сторону



**Рис. 3.** Температурные зависимости длины волны максимума спектра основной (а) и побочной (b) полосы излучения красного СИД при различных токах: 1 — 1 мА; 2 — 5 мА; 3 — 50 мА; 4 — 200 мА.

Значения коэффициентов при квадратичных членах полиномов, аппроксимирующих зависимости  $\lambda I_{\max}(T)$  и  $\lambda II_{\max}(T)$

Коэффициенты аппроксимирующего полинома	Амплитуда импульсов тока, мА				
	5.0	20	50	100	200
$b_{\lambda I} \cdot 10^4, \text{ nm/K}^2$	5.4	6.0	5.6	5.4	4.0
$b_{\lambda II} \cdot 10^3, \text{ nm/K}^2$	1.0	1.1	1.1	1.3	0.8

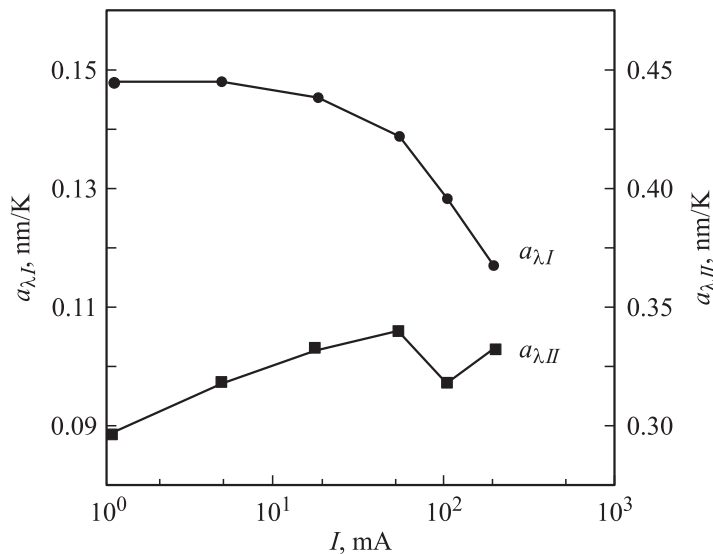
больших длин волн. Компьютерная обработка полученных зависимостей показала, что температурный коэффициент смещения  $\lambda I_{\max}$  несколько возрастает, а температурный коэффициент  $\lambda II_{\max}$ , напротив, несколько уменьшается с увеличением температуры и зависимости  $\lambda I_{\max}(T)$  и  $\lambda II_{\max}(T)$  в исследуемом диапазоне температур можно аппроксимировать полиномами второй степени вида:

$$\lambda I_{\max}(T) = \lambda I_{\max}(T_0) + a_{\lambda I}(T - T_0) + b_{\lambda I}(T - T_0)^2; \quad (1a)$$

$$\lambda II_{\max}(T) = \lambda II_{\max}(T_0) + a_{\lambda II}(T - T_0) - b_{\lambda II}(T - T_0)^2. \quad (1б)$$

Поскольку нелинейность зависимостей  $\lambda I_{\max}(T)$  и  $\lambda II_{\max}(T)$  невелика ( $b_{\lambda I}, b_{\lambda II} < 10^{-3} \text{ nm/K}^2$ , см. таблицу), то на начальном участке ( $T \leq 50^\circ\text{C}$ ) температурное смещение спектра полос определяется коэффициентами  $a_{\lambda I}$  и  $a_{\lambda II}$ . Температурный коэффициент  $a_{\lambda I}$  смещения основной полосы монотонно уменьшается с ростом тока (рис. 4); значение  $a_{\lambda I} = 0.146 \text{ nm/K}$  (при  $I < 20 \text{ mA}$ ) соответствует температурному коэффициенту ширины запрещенной зоны  $4.7 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$ , что согласуется с известными данными для GaP [6]. Температурный коэффициент  $a_{\lambda II}$  сдвига побочной полосы с увеличением тока слабо растет (рис. 4). Значение  $a_{\lambda II} = 0.31 \text{ nm/K}$  (при  $I < 20 \text{ mA}$ ) соответствует температурному коэффициенту ширины запрещенной зоны  $4.8 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$ , что несколько больше известного температурного коэффициента  $E_g$  для чистого арсенида галлия —  $4.0 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$  [6].

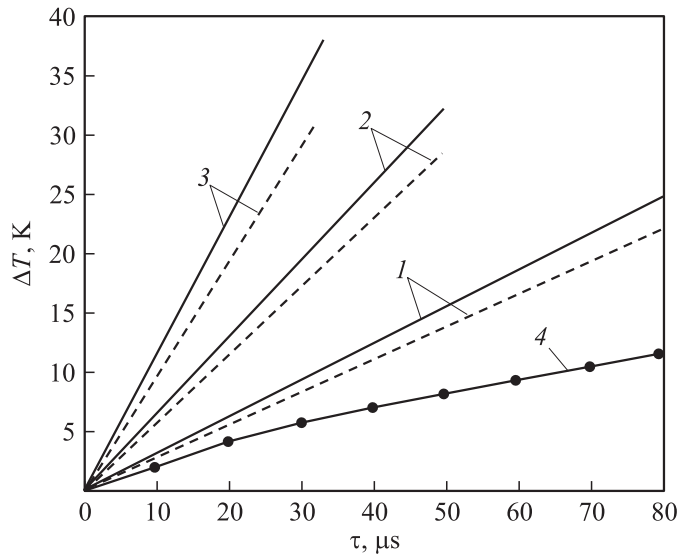
При подаче на СИД импульсов греющего тока частотой  $F_{pul} = 10 \text{ kHz}$  измерялись зависимости  $\lambda I_{\max}$  и  $\lambda II_{\max}$  от длительности импульсов  $\tau_{imp}$ . Спектры измерялись через 15 min после начала подачи греющих импульсов, когда температура  $T_C$  капсулы СИД достигала стационарного значения и переставала изменяться. Приращения локальных



**Рис. 4.** Токовые зависимости коэффициентов  $a_{\lambda I}$  и  $a_{\lambda II}$  при линейных членах полиномов, аппроксимирующих зависимости  $\lambda I_{\max}(T)$  и  $\lambda II_{\max}(T)$ .

температур  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  рассчитывались по сдвигу спектра основной и побочной полос соответственно с учетом температурных зависимостей  $\lambda I_{\max}(T)$  и  $\lambda II_{\max}(T)$ . Приращения локальных температур  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  структуры и приращение температуры капсулы  $\Delta T_C$  СИД линейно растут с увеличением длительности импульсов (рис. 5). Линейный характер зависимости локальных температур и температуры капсулы от длительности импульсов сохранялся при снижении частоты  $F_{pul}$  до 1 kHz. Разность температур  $\Delta T_{1-2} = \Delta T_1 - \Delta T_2$  всегда положительна и также линейно возрастает с увеличением длительности импульсов.

Измерения импульсной ВАХ СИД показали, что импульсная мощность  $P_{imp}$ , рассеиваемая в структуре СИД, при токе 50 mA равна 100 mW, при 100 mA — 220 mW, при 200 mA — 480 mW. Пересчитывая зависимости  $\Delta T_1(\tau_{imp})$  и  $\Delta T_2(\tau_{imp})$  в зависимости  $\Delta T_1(\bar{P}_{avg})$  и  $\Delta T_2(\bar{P}_{avg})$ , где  $\bar{P}_{avg} = P_{imp} F_{pul} \tau_{imp}$  — средняя греющая мощность, рассеиваемая структурой, по разности тангенса угла наклона зависимостей  $\Delta T_1(\bar{P}_{avg})$  и  $\Delta T_2(\bar{P}_{avg})$  можно определить тепловое сопротивление  $R_{T1-2}$  слоев



**Рис. 5.** Зависимости приращений локальных температур  $\Delta T_1$  (сплошные линии) и  $\Delta T_2$  (штриховые линии) светодиодной структуры ( $1 - I = 50 \text{ mA}$ ,  $2 - I = 100 \text{ mA}$ ,  $3 - I = 200 \text{ mA}$ ) и приращения температуры капсулы СИД  $\Delta T_C$  ( $4 - I = 50 \text{ mA}$ ) от длительности импульсов тока при частоте следования импульсов  $1 \text{ kHz}$ .

структуры, разделяющей гетероструктуру и область переизлучения. Значения  $R_{T1-2}$ , измеренные при разных токах, практически совпадают и равны  $37 \pm 4 \text{ K/W}$ , что позволяет сделать вывод о независимости пространственной локализации области генерации побочной полосы излучения от величины тока. Эта область, вероятно, располагается в верхнем слое GaAs подложки толщиной порядка диффузионной длины дырок  $L_p$ , и тепловое сопротивление  $R_{T1-2}$  можно представить как сумму тепловых сопротивлений трех слоев: защитного слоя  $R_{Tcl} = d_{cl}/S_a k_{cl}$ , брэгговского зеркала  $R_{TDDBR} = d_{DDBR}/S_a k_{DDBR}$  и слоя подложки  $R_{TSub} \approx L_p/S_a k_{GaAs}$ :

$$R_{T1-2} = (d_{cl}/S_a k_{cl}) + (d_{DDBR}/S_a k_{DDBR}) + (L_p/S_a k_{GaAs}), \quad (2)$$

где  $d_{cl}$ ,  $d_{DDBR}$  — толщины, а  $k_{cl}$ ,  $k_{DDBR}$ ,  $k_{GaAs}$  — коэффициенты теплопроводности соответствующих слоев. Примем для оценки  $L_p \approx 40 \mu\text{m}$  [7]



и после подстановки в (2) известных значений для данной структуры:  $k_{\text{GaAs}} = 45 \text{ W/K} \cdot \text{m}$  и  $S_a = 9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ , получим следующее соотношение для параметров слоев:

$$(d_{cl}/k_{cl}) + (d_{\text{DBR}}/k_{\text{DBR}}) \approx 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}. \quad (3)$$

При характерных в подобных структурах толщинах слоев  $d_{cl} \approx d_{\text{DBR}} \approx 5\text{--}10 \mu\text{m}$  для коэффициентов теплопроводностей слоев запишем соотношение:

$$\frac{k_{cl} \cdot k_{\text{DBR}}}{k_{cl} + k_{\text{DBR}}} \approx 2 \div 4 \text{ W/m} \cdot \text{K}. \quad (4)$$

При  $k_{cl} \approx k_{\text{DBR}} = k_{eff}$  из (4) следует  $k_{eff} \approx 4\text{--}8 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , что по порядку величины согласуется с известными данными для тройных соединений [7].

В результате проведенных исследований установлено, что температурные коэффициенты смещения максимума спектра основной и побочной полос излучения красных AlInGaP/GaAs светодиодов зависят от температуры и тока. Локальные температуры этих СИД, определяемые по смещению максимума спектра основной и побочной полос излучения в импульсном режиме, линейно возрастают с ростом длительности импульса. Разность тепловых сопротивлений, вычисляемых по наклону зависимости локальных температур от средней греющей мощности, не зависит от величины тока и определяется параметрами слоев, разделяющих гетероструктуру и область переизлучения. Представленная методика измерения локальных температур может быть использована для оценки коэффициентов теплопроводности слоев в светодиодных структурах на GaAs подложках.

## Список литературы

- [1] Свечников С.В., Сукач Г.А., Сытко Н.И., Николаенко В.В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 11. С. 2265–2266.
- [2] Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. М.: Энергоиздат, 1983. 208 с.
- [3] Ефремов А.А., Бочкарева Н.И., Горбунов Р.И. и др. // ФТП. 2006. Т. 40. В. 5. С. 621–626.
- [4] Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления // Пер. с англ. Под ред. Д.Б. Ди Лоренцо, Д.Д. Канделуола. М.: Изд-во МГУ, 1986. 256 с.

- [5] <http://www.vishay.com/docs/80097/physics.pdf>
- [6] *Антипов Б.Л., Сорокин В.С., Терехов В.А.* Материалы электронной техники: Задачи и вопросы. Учеб. пособие для вузов по специальностям электронной техники / Под ред. В.А. Терехова. М.: Высш. шк., 1990. 208 с.
- [7] <http://www.ioffe.ru> — NSM Archive