

Электролюминесценция светодиодов $\lambda = 3.3 \div 4.3$ мкм на основе твердых растворов InGaAs и InAsSbP в интервале температур $20 \div 180^\circ\text{C}$

© М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев[¶], М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 7 июня 1999 г. Принята к печати 8 июня 1999 г.)

Исследованы СД $\lambda_{\text{max}} = 3.4, 4.3$ мкм ($t = 20^\circ\text{C}$) при повышенных температурах. Показано, что для описания их работы в интервале температур $t = 20 \div 180^\circ\text{C}$ применимы классические представления об инжекционных источниках излучения и процессах рекомбинации носителей заряда. Температурные зависимости обратных токов ВАХ в области насыщения соответствуют возрастанию собственной концентрации носителей заряда в теории Шокли. Спектры излучения описываются в предположении прямых переходов зона-зона, сферически симметричных зон и термализованных носителей заряда. $W-I$ -характеристики пропорциональны $I^{2/3}$, что говорит о доминирующей роли безызлучательной оже-рекомбинации. Мощность излучения экспоненциально падает с температурой, что характерно для CHSH- и CHCC-процессов.

1. Введение

Светодиоды (СД) в средней инфракрасной (ИК) области спектра ($3 \div 5$ мкм) с узкими спектрами излучения ($\Delta\lambda_{0.5} \sim 0.1\lambda_{\text{max}}$) используются в приборах газового анализа для детектирования метана CH_4 (3.3 мкм), углекислого газа CO_2 (4.3 мкм) и др. Исследования таких СД были ограничены областью температур $4 \div 380$ К [1–3], хотя для ряда практических задач необходима возможность работы СД при повышенных температурах.

Цель работы — исследование СД $\lambda_{\text{max}} = 3.3, 4.3$ мкм ($t = 20^\circ\text{C}$) при температурах $20 \div 180^\circ\text{C}$.

2. Изучаемые объекты и методики исследования

Диодные гетероструктуры выращивались методом ЖФЭ при температурах $650 \div 680^\circ\text{C}$ на подложках (n, p)-InAs (111) с концентрацией электронов $\sim 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и были аналогичны описанным ранее [3,4]. $p-n$ -переход создавался введением в расплав примесей цинка или марганца (концентрация свободных носителей $p \approx 1 \div 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$), эпитаксиальные слои n -типа специально не легировались ($n \approx 1 \div 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$). В качестве активного слоя СД использовались твердые растворы $\text{In}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$ ($\lambda = 3.3$ мкм) и $\text{InAs}_{0.87}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.01}$ ($\lambda = 4.3$ мкм). СД имели мезу диаметром 500 мкм. СД $\lambda = 3.3$ мкм монтировались подложкой вниз (рис. 1, а). В СД с $\lambda = 4.3$ мкм стравливалась подложка и часть широкозонного слоя; образцы монтировались "p" стороной на Si-держатель (рис. 1, б). Толщины слоев n -InGaAs и p -InAsSbP составляли $5 \div 10$ мкм.

Измерения электролюминесценции (ЭЛ) проводились с помощью охлаждаемого фотодиода из InSb.

[¶] Факс: +7 (812) 247 43 24,
e-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как известно, для существования $p-n$ -перехода необходимо, чтобы собственная концентрация носителей заряда в материале активной области была меньше, чем концентрация основных носителей в n - и p -областях, формирующих $p-n$ -переход. Концентрация собственных носителей $n_i = p_i$ определяется шириной запрещенной зоны материала E_g и температурой T :

$$n_i = p_i = 4.82 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2} \left(\frac{m_e m_h}{m_0^2} \right)^{3/4} \times \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right) [\text{см}^{-3}], \quad (1)$$

где m_e и m_h — эффективные массы электрона и дырки, m_0 — масса свободного электрона, k — постоянная

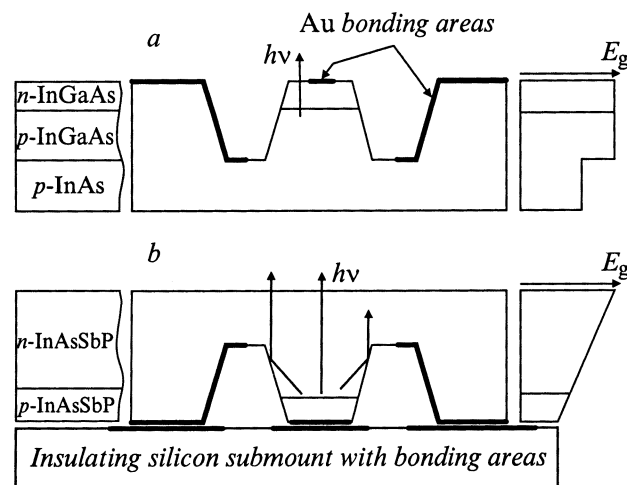


Рис. 1. Конструкции СД с $\lambda = 3.3$ (а) и 4.3 мкм (б).

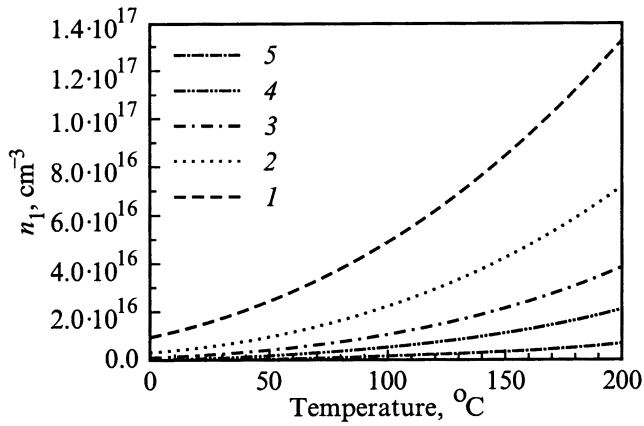


Рис. 2. Температурная зависимость собственной концентрации $n_i(T)$ для полупроводников, близких по составу к InAs ($m_e = 0.021m_0$, $m_h = 0.41m_0$, E_g , мэВ: 1 — 200, 2 — 250, 3 — 300, 4 — 350, 5 — 450).

Больцмана. Зависимость n_i от температуры для полупроводников, близких по составу к InAs ($m_e = 0.021m_0$, $m_h = 0.41m_0$, $E_g = 200 \div 450$ мэВ), представлена на рис. 2. Концентрации основных носителей в p и n эпитаксиальных слоях составляют $p, n \approx 1 \div 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, поэтому можно ожидать, что в материалах с $E_g \geq 0.2$ эВ ($\lambda \leq 6$ мкм) выполняется условие $p, n > p_i, n_i$, и p - n -переход существует при температурах вплоть до 180°C .

В InAs при комнатных температурах ход вольт-амперных характеристик (ВАХ) подчиняется теории Шокли, рассматривающей генерацию и рекомбинацию носителей заряда в n - и p -областях p - n -перехода, и согласно которой обратные токи в области насыщения пропорциональны квадрату собственной концентрации [5]. На рис. 3 приводятся вольт-амперные характеристики СД с $\lambda = 4.3$ мкм в интервале температур $20 \div 180^\circ\text{C}$, а также температурная зависимость обратного тока I_s при $U = -1$ В (область насыщения при низких температурах) и квадрата собственной концентрации n_i^2 . Совпадение хода кривых $I_s(t)$ и $n_i^2(t)$ показывает, что теория Шокли остается справедливой и при повышенных температурах для p - n -переходов на основе твердых растворов, близких по составу к InAs.

На рис. 4 приводятся спектры электролюминесценции (ЭЛ) СД с $\lambda = 3.3$ мкм в интервале температур $25 \div 180^\circ\text{C}$. В работе [6] было показано, что в длинноволновых СД ($\lambda = 5.3$ мкм) уже при $T > 175$ К происходит истощение акцепторного уровня Zn ($E_a \leq 15$ мэВ) и излучательная рекомбинация определяется переходами зона проводимости-валентная зона в p -области p - n -перехода. Поэтому обработку спектральных кривых можно проводить в предположении прямых переходов зона-зона, сферически симметричных зон и термализованных носителей заряда. При этом положение пика ЭЛ и корот-

коволновое крыло спектра хорошо описываются кривой

$$I(E) \sim \left[E_g + \left(1 + \frac{m_e}{m_h} \right) E \right]^2 \sqrt{E} \exp \left(-\frac{m_e E}{m_h kT} \right) \times \left(\exp \left(\frac{E}{kT} \right) + 1 \right)^{-1}, \quad (2)$$

где $E = \hbar\omega - E_g$ — энергия, отсчитанная от дна зоны проводимости. Следствием соотношения (2) является то, что энергия ширины запрещенной зоны меньше энергии

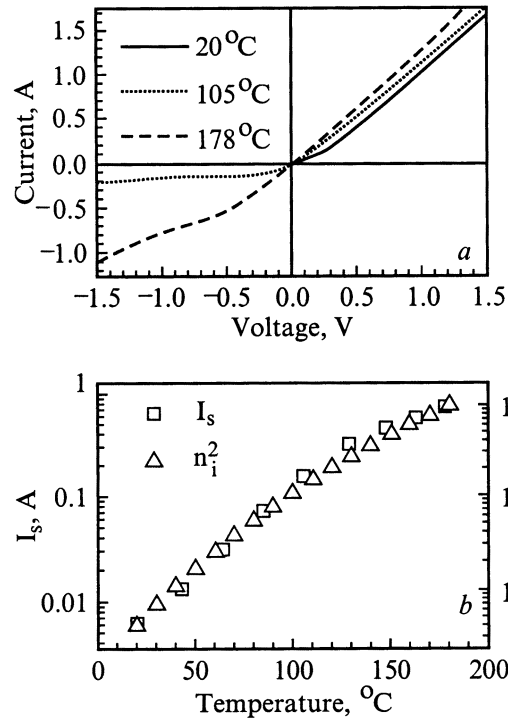


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики СД с $\lambda = 4.3$ мкм (а). Температурные зависимости обратного тока I_s ($U = -1$ В) и квадрата собственной концентрации n_i^2 (b).

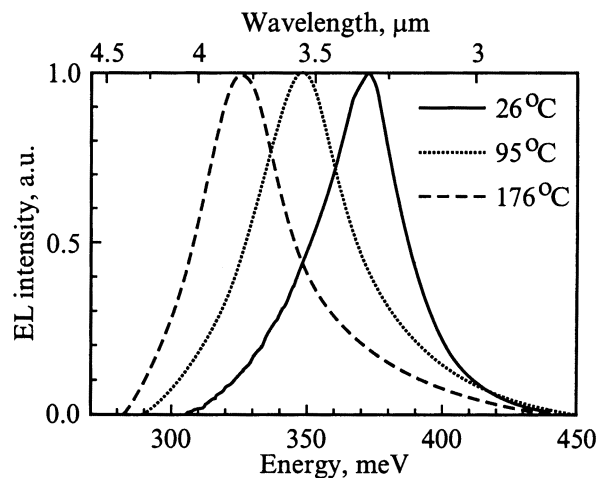


Рис. 4. Спектры электролюминесценции СД с $\lambda = 3.3$ мкм.

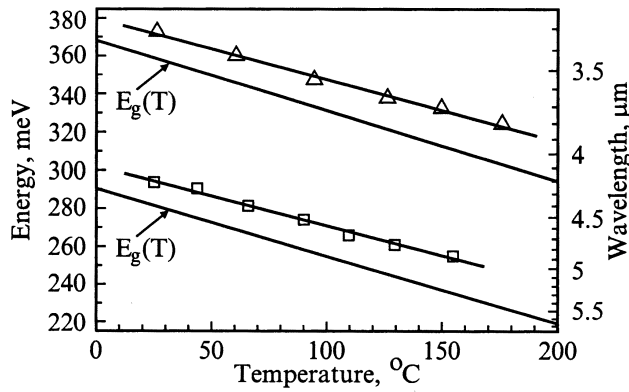


Рис. 5. Температурные зависимости энергии максимума ЭЛ и ширины запрещенной зоны СД с $\lambda = 3.3, 4.3$ мкм.

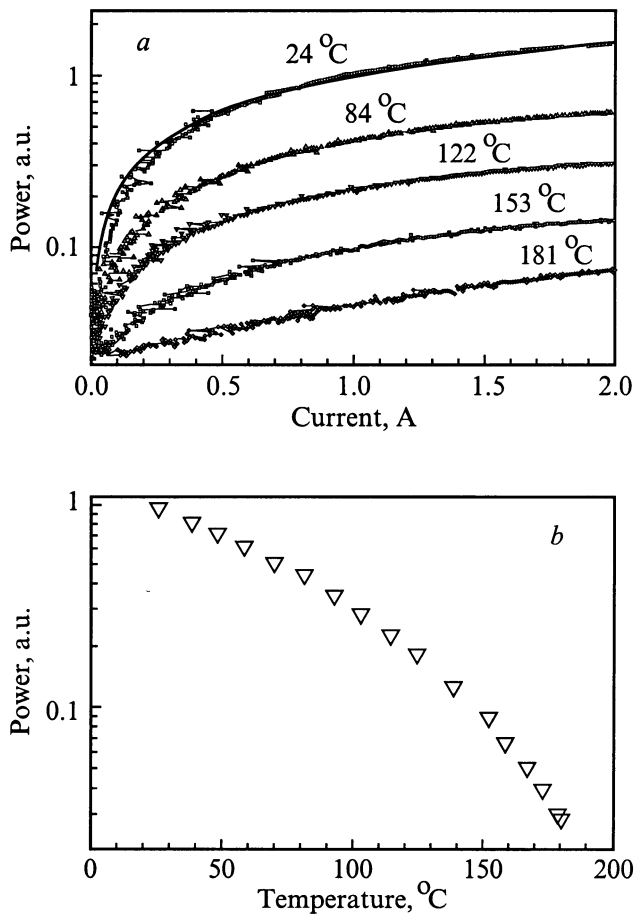


Рис. 6. Ватт-амперные характеристики (а) СД с $\lambda = 3.3$ мкм и температурная зависимость мощности излучения (б) при токе накачки 2 А (10 мкс, 500 Гц).

максимума ЭЛ на величину $kT/2$:

$$E_g(T) = h\nu_{\max}(T) - kT/2. \quad (3)$$

С ростом температуры максимум спектральной кривой сдвигается в длинноволновую сторону, следуя за

температурным сужением запрещенной зоны. Характеристическая энергия коротковолнового спада ε растет пропорционально T , однако величина ε меньше kT , что, по-видимому, связано с самопоглощением люминесценции. Характеристическая энергия длинноволнового спада $\sim 11 \div 15$ мэВ одного порядка с характеристической энергией размытия краев зон, связанной с флуктуациями состава твердого раствора [7]. На рис. 5 приведены температурные зависимости энергии максимума ЭЛ и ширины запрещенной зоны активной области СД с $\lambda = 3.3$ и 4.3 мкм, полученные из соотношения (3). Наклон кривых $E_g(T)$ (температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны dE_g/dT) составил $3.6 \cdot 10^{-4}$ и $3.5 \cdot 10^{-4}$ эВ/К для твердых растворов $\text{In}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$ и $\text{InAs}_{0.87}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.01}$ соответственно, что близко к значению для InAs ($2.8 \cdot 10^{-4}$ эВ/К), известному из литературы для интервала $T = 77 \div 300$ К [8].

На рис. 6 приводятся ватт-амперные характеристики ($W-I$) СД с $\lambda = 3.3$ мкм в интервале температур $25 \div 180^\circ\text{C}$ и температурная зависимость мощности излучения при токе накачки 2 А. Характеристики сублинейные и хорошо аппроксимируются степенной функцией

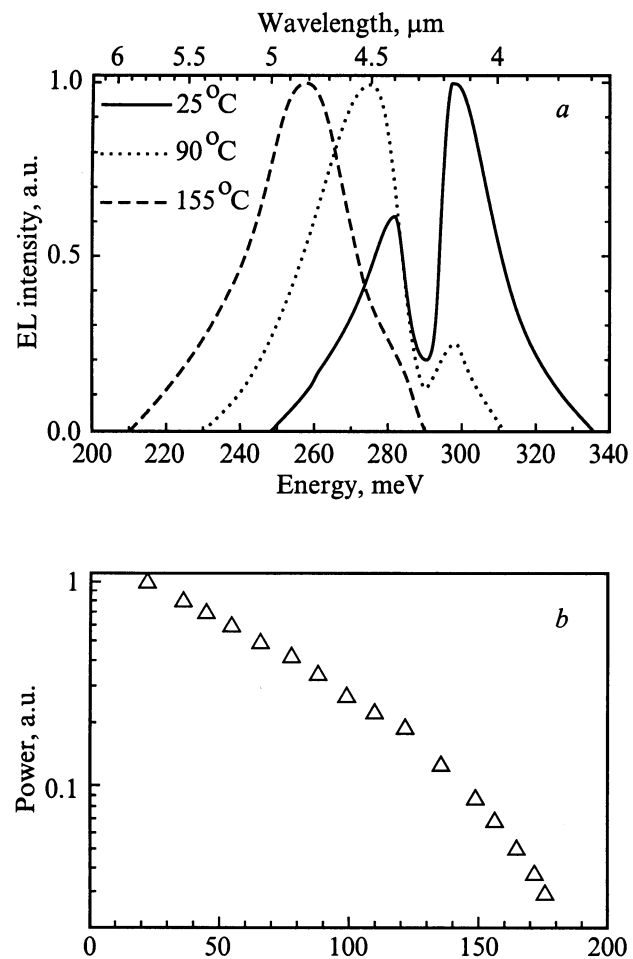


Рис. 7. Спектры электролюминесценции СД с $\lambda = 4.3$ мкм (а) и температурная зависимость мощности излучения (б) при токе накачки 2 А (10 мкс, 500 Гц).

от тока $W(I) \sim I^{2/3}$ (сплошная линия). Это указывает на то, что излучение является результатом бимолекулярной излучательной рекомбинации при доминирующей роли безызлучательной оже-рекомбинации, интенсивности которых пропорциональны Δn^2 и Δn^3 соответственно [9]. Мощность излучения экспоненциально падает с температурой, что характерно для СНСС и CHSH оже-рекомбинации, которые преобладают в твердых растворах, близких к InAs при повышенных температурах [10].

На рис. 7 приводятся спектры ЭЛ СД с $\lambda = 4.3$ мкм и температурная зависимость мощности излучения при токе накачки 2 А. Характер изменения спектров с температурой такой же, как и для СД с $\lambda = 3.3$ мкм. Мощность излучения падает быстрее, чем в случае СД с $\lambda = 3.3$ мкм: в ~ 30 раз против 20 раз, что связано с возрастанием роли оже-рекомбинации в структурах с меньшей энергией ширины запрещенной зоны.

4. Заключение

Таким образом, показано, что для описания работы длинноволновых СД ($\lambda = 3.3, 4.3$ мкм) в интервале температур $t = 20 \div 180^\circ\text{C}$ применимы классические представления о инжекционных источниках излучения и процессах рекомбинации носителей заряда. Температурные зависимости обратных токов ВАХ в области насыщения соответствуют возрастанию собственной концентрации носителей заряда в теории Шокли. Спектры излучения описываются в предположении прямых переходов зона–зона, сферически симметричных зон и термализованных носителей заряда. $W-I$ -характеристики пропорциональны $I^{2/3}$, что говорит о доминирующей роли безызлучательной оже-рекомбинации. Мощность излучения экспоненциально падает с температурой, что характерно для процессов CHSH и СНСС.

Работа выполнена при административной поддержке Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF).

Список литературы

- [1] H.J. Gerritsen, C.C. Taylor, S.C. Reuman, E.E. Crisman. *Proc. Second W.V.V. Conf. on Coal Mine Electrotechn.*, June 1974. p. 21–1.
- [2] Н.П. Есина, Н.В. Зотова, Д.Н. Наследов. ФТП, **3**, 1370 (1969).
- [3] B. Matveev, M. Aidaraliev, G. Gavrilov, N. Zotova, S. Karandashov, G. Sotnikova, N. Stus', G. Talalakin, N. Il'inskaya, S. Aleksandrov. *Sensors & Actuators B*, **51**, 233 (1998).
- [4] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. Письма ЖТФ, **17** (23), 75 (1991).
- [5] Н.П. Есина, Н.В. Зотова, Д.Н. Наследов. РЭ, **8**, 1602 (1963).
- [6] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. Письма ЖТФ, **24** (6), 88 (1998).
- [7] Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, **21** (6), 1079 (1987).
- [8] O. Madelung. *Physics of III–V Compounds* (John Wiley & Sons, N.Y.–London–Sydney, 1964).
- [9] D. Garbuzov, M. Maiorov, H. Lee, V. Khalfin, R. Martinelli, J. Connolly. *Appl. Phys. Lett.*, **74** (20), 2990 (1999).
- [10] М. Айдаралиев, Г.Г. Зегря Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, **26** (2), 246 (1992).

Редактор В.В. Чалдышев

Electroluminescence $\lambda = 3.3\text{--}4.3 \mu\text{m}$ of InAsSbP and InGaAs LEDs at temperatures $80 \div 180^\circ\text{C}$. (Can InAsSbP and InGaAs LEDs emit light in the $3.3\text{--}4.3 \mu\text{m}$ spectral range at temperatures $80 \div 180^\circ\text{C}$)

M. Aydaraliev, N.V. Zotova, S.A. Karandashov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract InGaAs ($\lambda = 3.3 \mu\text{m}$) and InAsSbP ($\lambda = 4.3 \mu\text{m}$) LEDs have been fabricated and studied in the $20 \div 180^\circ\text{C}$ temperature range. Emission peak as well as the reverse current temperature dependencies are close to those known for InAs diodes at room and lower temperatures: $dE_g/dT = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$ and $I_s \sim n_i^2$. $20 \div 30$ fold emission quenching at 180°C ($P \sim \exp(-T/\xi)$) and sublinear light-current dependencies ($P \sim I^{2/3}$) indicate that radiative recombination is a result of bimolecular recombination accompanied by nonradiative CHSH and CHCC Auger recombination.