

# Отрицательная люминесценция в диодах на основе $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$

© М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев<sup>¶</sup>,  
М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин

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

(Получена 25 июля 2000 г. Принята к печати 26 июля 2000 г.)

В диодных гетероструктурах  $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$ , смещенных в обратном направлении, исследовалась отрицательная люминесценция  $\lambda_{\text{max}} = 3.8$  мкм в интервале температур  $70 \div 180^\circ\text{C}$ . Мощность отрицательной люминесценции возрастала с повышением температуры и, начиная со  $110^\circ\text{C}$ , оказывалась больше мощности электролюминесценции в прямом направлении. Получены значения мощности отрицательной люминесценции  $5 \text{ мВт}/\text{см}^2$ , эффективности 60% и коэффициента преобразования  $25 \text{ мВт}/\text{А} \cdot \text{см}^2$  при  $160^\circ\text{C}$ .

## Введение

Светодиоды (СД) в средней инфракрасной (ИК) области спектра ( $3 \div 5$  мкм) используются в приборах газового анализа для детектирования углекислого газа  $\text{CO}_2$  (4.3 мкм), метана  $\text{CH}_4$  (3.3 мкм) и других углеводородов. Было показано, что СД на основе  $\text{InGaAs}$  ( $\lambda = 3.3$  мкм) и  $\text{InAsSbP}$  ( $\lambda = 4.3$  мкм), выращенные методом жидкофазной эпитаксии, имеют срок службы более 30 000 ч [1] и работают до температур  $t = 180^\circ\text{C}$  [2]. При этом работа СД в интервале температур  $t = 20 \div 180^\circ\text{C}$  хорошо описывается классическими представлениями об инжекционных источниках излучения и процессах рекомбинации носителей заряда. Температурные зависимости обратных токов в области насыщения соответствуют теории Шокли, т.е. возрастанию собственной концентрации носителей заряда. Спектры излучения описываются в предположении прямых переходов зона-зона, сферически симметричных зон и термализованных носителей заряда. Мощность излучения экспоненциально падает с температурой, что характерно для оже-процессов.

С другой стороны, если к  $p\text{-}n$ -переходу приложено обратное смещение, то можно ожидать экстракции носителей из примыкающих к  $p\text{-}n$ -переходу областей и уменьшения их концентрации ниже равновесной величины так, что  $(n \times p) < (n_0 \times p_0) = n_i^2$ , где  $n_0$ ,  $p_0$ ,  $n$ ,  $p$  — равновесные и неравновесные концентрации электронов и дырок соответственно, а  $n_i$  — собственная концентрация. Следствием экстракции носителей является уменьшение интенсивности излучательной рекомбинации  $P$ , которая становится ниже теплового фона  $P_0$ :

$$\Delta P = P - P_0 = P_0 \left( \frac{np}{n_i^2} - 1 \right) \leq 0,$$

т.е. люминесценция становится "отрицательной". Эффект отрицательной люминесценции (ОЛ) известен с 1965 г., когда В.И. Иванов-Омский с коллегами измерили ОЛ в  $\text{InSb}$ , помещенном во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях [3]. ОЛ исследовалась

в объемных кристаллах  $\text{InAs}$  [4], диодах на основе  $\text{InSb}$  и  $\text{CdHgTe}$  [5,6] и, совсем недавно, в структурах на основе сверхрешеток [7,8]. Мощность ОЛ, или "тепловой контраст", зависит от интенсивности излучения окружающей среды и ограничена мощностью излучения абсолютно черного тела при данной температуре. Поэтому мощность ОЛ при комнатной температуре:  $0.4$  ( $\lambda = 4.3$  мкм) [7],  $0.53$  ( $\lambda = 6$  мкм),  $4$  ( $\lambda = 8$  мкм) [6],  $0.2 \text{ мВт}/\text{см}^2$  ( $\lambda = 5.3$  мкм) [8] значительно меньше, чем у светодиодов при положительном смещении:  $46 \text{ мВт}/\text{см}^2$ ,  $I = 0.4 \text{ А}$  ( $\lambda = 3.3$  мкм) [9],  $36 \text{ мВт}/\text{см}^2$ ,  $I = 2 \text{ А}$  ( $\lambda = 4.2$  мкм) [10],  $25 \text{ мВт}/\text{см}^2$ ,  $I = 1 \text{ А}$  ( $\lambda = 5.5$  мкм) [11]. Однако с увеличением температуры и длины волны мощность ОЛ возрастает [4], отражая свойства черного тела, в противоположность мощности ЭЛ, которая из-за оже-рекомбинации уменьшается с ростом температуры и длины волны. Поэтому существует температура, при которой эффективность ОЛ превышает эффективность ЭЛ. Для сверхрешеток  $\text{InAs}/\text{InAsSb}$  ( $\lambda = 4.3$  мкм) такая температура была определена как  $310 \text{ К}$  [7], однако, насколько нам известно, не было попыток исследовать ОЛ в  $p\text{-}n$ -переходах при температурах  $T > 310 \text{ К}$ . В данной работе мы исследуем ОЛ в диодных гетероструктурах  $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$  ( $\lambda = 3.8$  мкм,  $80^\circ\text{C}$ ) в интервале температур  $70 \div 180^\circ\text{C}$ .

## Исследуемые объекты и методики исследования

Согласованные по параметру решетки диодные гетероструктуры  $p\text{-InAsSb}_{0.09}\text{P}_{0.18}/n\text{-InAs}$  выращивались методом жидкофазной эпитаксии на подложке  $n\text{-InAs}$  (111) при  $630\text{--}680^\circ\text{C}$ . Толщина подложки составляла  $350$  мкм, концентрация электронов  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , широкозонный слой  $p\text{-InAsSbP}$  ( $E_g = 390 \text{ мэВ}$ ,  $300 \text{ К}$ ) толщиной  $2 \div 4$  мкм легировался  $\text{Zn}$  до концентрации дырок  $5 \div 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Круглые меза-структуры диаметром  $430$  мкм и верхний  $p$ -контакт  $\text{Au}(\text{Zn})$  диаметром  $160$  мкм создавались методом фотолитографии. Излучение выводилось через широкозонный слой  $\text{InAsSbP}$ .

Измерения ЭЛ и ОЛ проводились в импульсном режиме  $\tau = 30$  мкс,  $f = 500$  Гц. Спектры излучения

<sup>¶</sup> Факс: +7(812) 2474324

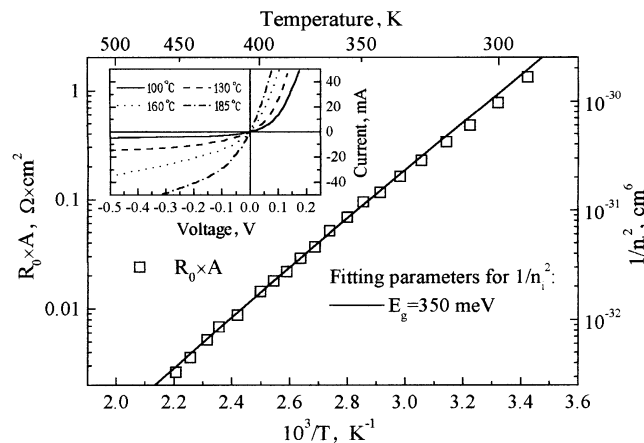
E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

регистрировались охлаждаемым (77 К) фотодиодом на основе InSb. Измерения абсолютной мощности были выполнены с помощью охлаждаемого (77 К) фотодиода на основе HgCdTe, с учетом диаграммы направленности СД и спектральной чувствительности фотоприемника.

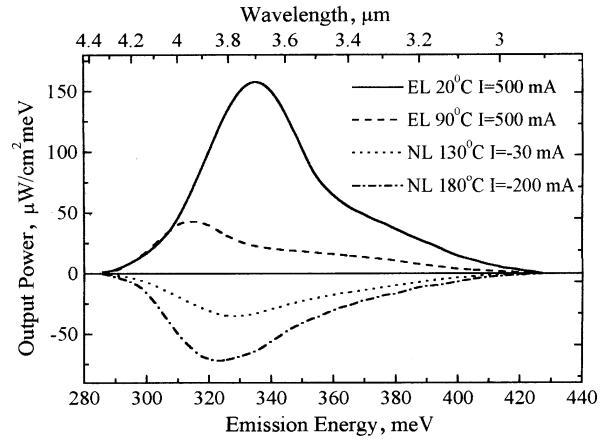
## Экспериментальные результаты и их обсуждение

В [12,13] было показано, что при температурах выше 200 К в  $p-n$ -переходах в InAs и близких к нему по составу твердых растворах преобладает "диффузионный" механизм протекания тока, т.е. в соответствии с теорией Шокли рекомбинация в "n" и "p" областях  $p-n$ -перехода определяет вольт-амперные характеристики. На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики при  $t = 100, 130, 160, 185^\circ\text{C}$  (см. вставку) и температурные зависимости произведения дифференциального сопротивления при нулевом смещении на площадь  $p-n$ -перехода  $R_0 \times A$  и обратного квадрата собственной концентрации  $1/n_i^2$ . Отсутствие четкого насыщения обратного тока свидетельствует о том, что ток содержит не только диффузионную составляющую. С другой стороны, совпадение наклонов  $R_0 \times A$  и  $1/n_i^2$  (рис. 1) свидетельствует о том, что при малых токах диффузионный механизм протекания тока является доминирующим. Это позволяет ожидать экстракции носителей заряда от  $p-n$ -перехода при обратном смещении в этом диапазоне температур. Ход экспериментальной зависимости совпадает с кривой  $1/n_i^2$  при  $E_g = 350$  мэВ, что означает, что  $p-n$ -переход смещен от гетерограницы InAs/InAsSbP и расположен в подложке  $n$ -InAs.

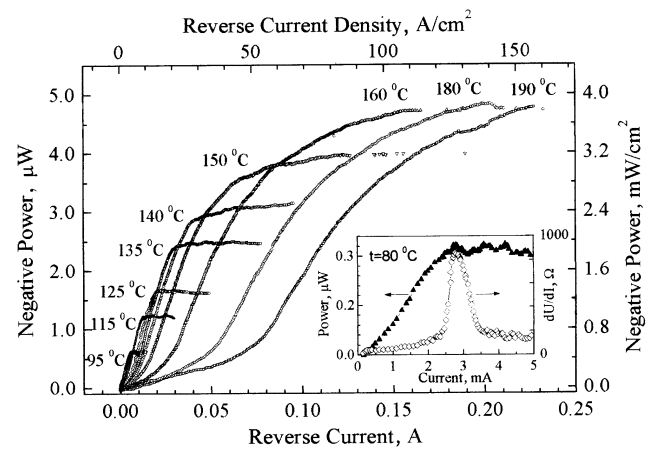
На рис. 2 представлены спектры ЭЛ ( $I = 500$  мА,  $t = 20, 90^\circ\text{C}$ ) и ОЛ ( $I = -30, -200$  мА,  $t = 130, 180^\circ\text{C}$ ). С увеличением температуры максимума излучения смещаются в длинноволновую сторону в соответствии с



**Рис. 1.** Температурные зависимости произведения дифференциального сопротивления на площадь  $p-n$ -перехода  $R_0 \times A$  при нулевом смещении и обратного квадрата собственной концентрации  $1/n_i^2$ . На вставке — вольт-амперные характеристики при  $t = 100, 130, 160, 185^\circ\text{C}$ .



**Рис. 2.** Спектры ЭЛ ( $I = 500$  мА,  $t = 20, 90^\circ\text{C}$ ) и ОЛ ( $I = -30, -200$  мА,  $t = 130, 180^\circ\text{C}$ ).



**Рис. 3.** Зависимости мощности излучения ОЛ от тока в температурном интервале  $t = 95 \div 190^\circ\text{C}$ . На вставке — токовые зависимости мощности ОЛ и дифференциального сопротивления  $dU/dI$  при  $t = 80^\circ\text{C}$ .

температурным сужением запрещенной зоны, однако максимум ОЛ смещен в сторону коротких волн по сравнению со спектром ЭЛ.

На рис. 3 представлены зависимости мощности излучения ОЛ от тока в температурном интервале  $t = 80 \div 190^\circ\text{C}$ . Линейное увеличение мощности от тока сменяется насыщением, которое свидетельствует об истощении активной области структуры и отсутствии разогрева диода. При этом мощность ОЛ приближается к мощности равновесного рекомбинационного излучения  $P_0$  при данной температуре. Ярко выраженное насыщение мощности ОЛ наблюдается вплоть до  $t = 135^\circ\text{C}$ ; при более высоких температурах отсутствие четкого насыщения и нелинейное нарастание мощности при малых токах может быть связано с присутствием добавочного источника носителей, например неомичного контакта, который, добавляя носители в активную область, препятствует полной экстракции носителей заряда, либо с утечками. Токи, при которых происходит насыщение

мощности ОЛ, коррелируют с точками насыщения обратных ветвей вольт-амперных характеристик, что хорошо видно на вставке к рис. 3 и рис. 4, где приводятся токовые зависимости дифференциального сопротивления  $dU/dI$  в интервале температур  $40 \div 190^\circ\text{C}$ . Аналогичные зависимости наблюдались на сверхрешетках InAs/InAsSb [7].

Величина равновесного рекомбинационного излучения  $P_0$ , к которой приближается мощность ОЛ при полном истощении активной области, для невырожденного полупроводника с шириной запрещенной зоны  $E_g$  и прямых межзонных переходов была рассчитана в [14]

$$P_0 = \frac{E_g^3 h^3 F(q) n_i^2}{4\pi^2 c^2 (m_n m_p)^{3/2} (kT)^2}, \quad (1)$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $F(q) \approx 0.1$  — функция показателя преломления полупроводника,  $c$  — скорость

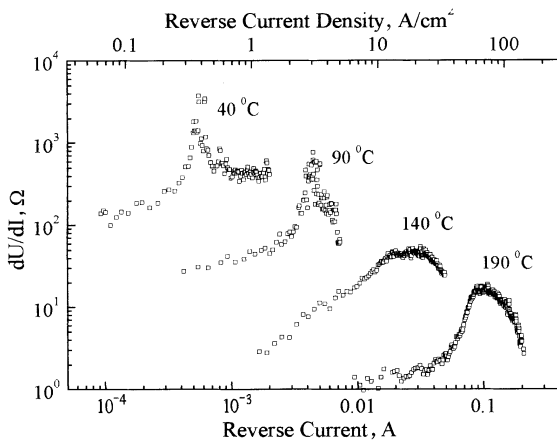


Рис. 4. Токовые зависимости дифференциального сопротивления в интервале температур  $t = 40 \div 190^\circ\text{C}$ .

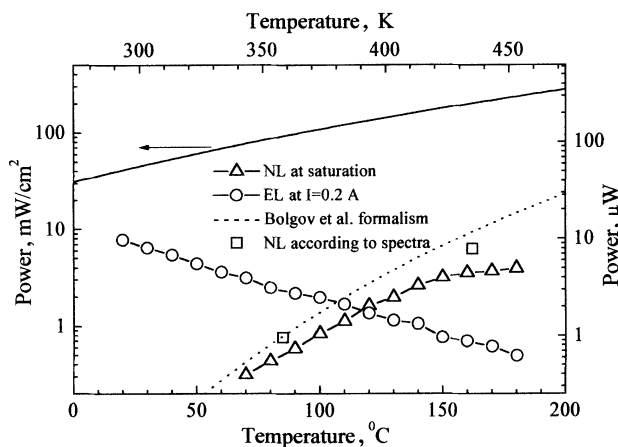


Рис. 5. Температурные зависимости мощности излучения ЧТ (сплошная линия), расчетной мощности равновесного рекомбинационного излучения  $P_0$  в InAs, расчетной мощности равновесного рекомбинационного излучения с учетом экспериментальных спектров ОЛ, мощности ЭЛ при  $I = 0.2 \text{ A}$  и мощности ОЛ при  $I = I_{\text{SAT}}$ .

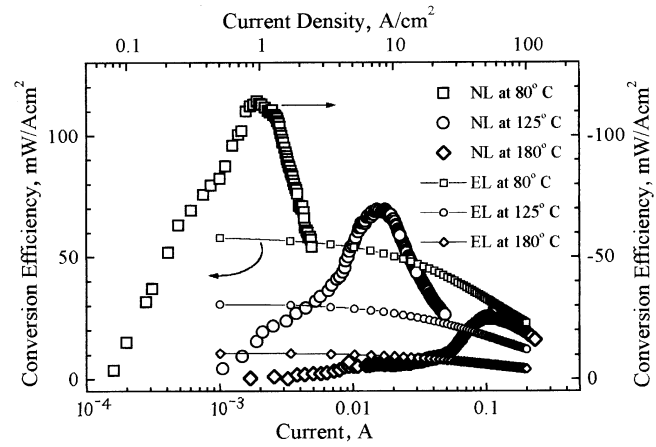


Рис. 6. Зависимости коэффициента преобразования от тока для случаев прямого и обратного смещения при  $t = 80, 125, 180^\circ\text{C}$ .

света,  $m_n$  и  $m_p$  — эффективные массы электрона и тяжелой дырки. На рис. 5 представлены температурные зависимости мощности излучения абсолютно черного тела (ЧТ), расчетной мощности равновесного рекомбинационного излучения  $P_0$  в InAs, расчетной мощности равновесного рекомбинационного излучения с учетом экспериментальных спектров ОЛ, мощности ЭЛ при токе  $I = 0.2 \text{ A}$  и мощности ОЛ при токе насыщения  $I = I_{\text{SAT}}$ . Видно хорошее совпадение зависимости  $P_0(t)$ , рассчитанной в соответствии с (1), и расчетной мощности равновесного рекомбинационного излучения с учетом экспериментальных спектров ОЛ. Мощность ОЛ резко возрастает с ростом температуры и при  $t = 110^\circ\text{C}$  превышает мощность ЭЛ. Температурная зависимость мощности ОЛ отражает температурную зависимость излучения ЧТ, при этом пик спектральной характеристики ОЛ, соответствующий ширине запрещенной зоны InAs, сдвигается к максимуму излучения ЧТ. Эффективность ОЛ  $\eta$  определяется как отношение мощности ОЛ и мощности ЧТ, приходящейся на спектр ОЛ (т.е. к  $P_0$ ). Полученная величина  $\eta = 0.63$  ( $160^\circ\text{C}$ ) близка к лучшим значениям, известным из литературы:  $\eta = 0.5$  (CdHgTe,  $\lambda = 9.5 \text{ мкм}$ ,  $300 \text{ K}$ ) [6].

На рис. 6 приведены токовые зависимости коэффициента преобразования (отношение мощности люминесценции с единичной площадью к рабочему току) для случаев прямого и обратного смещения в интервале  $80 \div 180^\circ\text{C}$ . Как видно, коэффициент преобразования ЭЛ падает с увеличением тока и температуры, что наблюдалось также в диодах на основе InAs [15] и InAsSbP [16]. При комнатной температуре коэффициент преобразования ЭЛ падает от  $210 \text{ мВт/Асм}^2$  при  $5 \text{ mA}$  до  $75 \text{ мВт/Асм}^2$  при  $200 \text{ mA}$  за счет джоулева разогрева, оже-рекомбинации и поглощения на свободных носителях. Отношение эффективностей преобразования ОЛ и ЭЛ увеличивается с ростом температуры и демонстрирует преимущества использования обратно смещенных  $p$ - $n$ -переходов в области повышенных температур.

## Заключение

Таким образом, в диодных гетероструктурах  $p$ -InAsSbP/ $n$ -InAs при приложении отрицательного смещения наблюдалась интенсивная отрицательная люминесценция  $\lambda = 3.8$  мкм, мощность которой возрастала с ростом тока и температуры. Спектральные и мощностные характеристики ОЛ в интервале температур  $70 \div 180^\circ\text{C}$  можно объяснить истощением активной области носителями заряда, что приводит к уровню излучательной рекомбинации ниже равновесного значения.

Мощность ОЛ (5 мкВт) и коэффициент преобразования ( $25 \text{ мВт/Асм}^2$ ) при  $160^\circ\text{C}$  превосходит соответствующие величины электролюминесценции, показывая тем самым перспективность использования обратно смещенных  $p$ - $n$ -переходов в оптоэлектронной аппаратуре при повышенных температурах.

Работа выполнена при административной поддержке Американского Фонда гражданских исследований и развития США для стран СНГ (CRDF).

## Список литературы

- [1] B. Matveev, M. Aidaraliev, G. Gavrilov et al. *Sensors & Actuators*, **51** (1–3), 233 (1998).
- [2] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. *ФТП*, **34** (1), 102 (2000).
- [3] В.И. Иванов-Омский, Б.Т. Коломиец, В.А. Смирнов. *ДАН СССР*, **161** (6), 1308 (1965).
- [4] С.С. Болгов, В.К. Малютенко, А.П. Савченко. *ФТП*, **31** (5), 526 (1997).
- [5] T. Ashley, C.T. Elliot, N.T. Gordon, S.H. Hall, A.D. Johnson, G.R. Price. *J. Cryst. Growth*, **159**, 1100 (1996).
- [6] T. Ashley, C.T. Elliot, N.T. Gordon, S.H. Hall, A.D. Johnson, G.R. Price. *Infr. Phys. Technol.*, **36**, 1037 (1995).
- [7] M.J. Pullin, H.R. Hardaway, J.D. Heber, C.C. Phillips. *Appl. Phys. Lett.*, **75** (22), 3427 (1999).
- [8] L.J. Olafsen, I. Vurgaftman, W.W. Bewley, C.L. Felix, E.H. Aifer, J.R. Meyer, J.R. Waterman, W. Mason. *Appl. Phys. Lett.*, **74** (18), 2681 (1999).
- [9] M.K. Parry, A. Krier. *Electron. Lett.*, **30** (23), 1968 (1994).
- [10] M.J. Pullin, H.R. Hardaway, J.D. Heber et al. *Appl. Phys. Lett.*, **74** (16), 2384 (1999).
- [11] B. Matveev, N. Zotova, S. Karandashov, M. Remennyi, N. P'inskaya, N. Stus', V. Shustov, G. Talalakin. *J. Malinen IEE Proc. Optoelectronics*, **145** (5), 254 (1998).
- [12] Н.П. Есина, Н.В. Зотова, Д.Н. Наследов. *ФТП*, **3** (5), 1370 (1969).
- [13] A. Krier, Y. Mao. *Infr. Phys. Technol.*, **38**, 397 (1997).
- [14] С.С. Болгов, В.К. Малютенко, В.И. Пипа. *Письма ЖТФ*, **5** (23), 1444 (1979).
- [15] M.J. Kane, G. Braithwaite, M.T. Ereny, D. Lee, T. Martin, D.R. Wright. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (8), 943 (2000).
- [16] M.K. Parry, A. Krier. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, 1764 (1993).

Редактор В.В. Чалдышев

## Negative luminescence from $p$ -InAsSbP/ $n$ -InAs diodes

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** We report negative luminescence in  $p$ -InAsSbP/ $n$ -InAs heterostructure diodes grown by the LPE method within  $70$ – $180^\circ\text{C}$ . The reverse bias device produced output power up to  $5 \mu\text{W}$  at  $180^\circ\text{C}$  ( $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$ ,  $\text{FWHM} = 0.7 \mu\text{m}$ ) and showed superiority to LED conversion efficiency indicating potentialities of such sources for low power consumption instruments.