

# Инфракрасные светодиоды с оптическим возбуждением на основе InGaAs(Sb)

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

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

(Получена 2 августа 2000 г. Принята к печати 2 августа 2000 г.)

Приведены спектральные характеристики и мощность излучения светодиодов с длиной волны 3.1–3.6 мкм, изготовленных из структур, содержащих узкозонные слои InGaAs или InGaAsSb на подложке  $n^+$ -InAs, в которых накачка осуществлялась с помощью светодиода из арсенида галлия. Получен коэффициент преобразования  $90 \text{ мВт/А} \cdot \text{см}^2$ , сравнимый с данными для инжекционных светодиодов.

## Введение

В  $p$ - $n$ -структурах на основе материалов, близких по составу к арсениду индия, вследствие высокой подвижности электронов имеет место преимущественная рекомбинация носителей в  $p$ -области. Это является одной из причин довольно низкой эффективности излучателей в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне, поскольку в материале  $p$ -типа проводимости безызлучательная оже-рекомбинация усиливается из-за резонанса энергий запрещенной и спин-орбитально отщепленной зон [1].

Из этого следует, что квантовую эффективность излучателя можно повысить, создав преимущественную инжекцию в активную область  $n$ -типа проводимости. Инжекция может быть осуществлена, например, при оптическом возбуждении, т. е. без участия  $p$ - $n$ -перехода. Оптическое возбуждение довольно широко используется при разработке лазеров на основе двойных гетероструктур и светодиодов для ближнего ИК диапазона [2,3], известно также несколько работ, посвященных фотолюминесценции (ФЛ) узкозонных материалов III-V при комнатной температуре [4,5]. Однако нам не известны работы, описывающие светодиоды III-V с оптическим возбуждением, работающие в среднем ИК диапазоне спектра. Вместе с тем недорогие и эффективные излучатели для длин волн  $\lambda = 3\text{--}5 \text{ мкм}$  могут найти применение в газовом анализе, связи и т. п.

В настоящем сообщении приводятся характеристики светодиодов (СД) с оптическим возбуждением, изготовленных на основе твердых растворов InGaAs и InGaAsSb, обогащенных InAs и излучающих на длинах волн от 3.1 до 3.6 мкм.

## Образцы и методика измерений

Нелегированные эпитаксиальные слои  $\text{In}_{0.94}\text{Ga}_{0.06}\text{As}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  и  $\text{In}_{0.96}\text{Ga}_{0.04}\text{As}$   $n$ -типа проводимости толщиной 3–8 мкм выращивались методом жидкофазной эпитаксии при температурах 650–720 °С на сильно легированных подложках  $n^+$ -InAs(Sn) с

концентрацией электронов  $n = (2\text{--}4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , ориентированных в плоскости (111) или (100). Выращивание производилось из легированных Gd расплавов. При этом, согласно [6,7], осуществляется геттерирование дефектов, сопровождаемое уменьшением концентрации остаточных доноров и увеличением квантового выхода люминесценции. Согласованные с подложкой слои  $\text{In}_{0.94}\text{Ga}_{0.06}\text{As}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  имели плотность наклонных дислокаций на уровне  $10^4\text{--}10^5 \text{ см}^{-2}$ , в то время как сильное рассогласование параметров решетки в системе  $\text{In}_{0.96}\text{Ga}_{0.04}\text{As}/\text{InAs}$  ( $\Delta a/a \approx 0.3\%$ ) имело следствием возрастание плотности дислокаций до  $10^7 \text{ см}^{-2}$ . В ряде случаев перед наращиванием "рабочего" слоя  $n$ -InGaAsSb на подложке осаждался широкозонный "буферный" слой  $n$ -InAs<sub>0.74</sub>Sb<sub>0.09</sub>P<sub>0.17</sub> толщиной 2 мкм. Перед оптическим измерением подложка утоньшалась до толщины 50 мкм.

Фотолюминесценция на просвет измерялась при комнатной температуре при возбуждении с помощью светодиода из GaAs (длина волны излучения  $\lambda \approx 0.87 \text{ мкм}$ , внешний квантовый выход  $\eta_{\text{ext}} \approx 2\%$ ) размерами  $1 \times 0.9 \text{ мм}^2$  с диаметром мезы  $0.4 \text{ мм}$ , смонтированного на кремниевый носитель ( $1.5 \times 1.7 \times 0.4 \text{ мм}^3$ ), имеющий подковообразную контактную область для  $n$ -области и круглый  $p$ -контакт, расположенные в одной плоскости, как показано в наших предыдущих работах [8]. Благодаря отсутствию контактных областей на внешней поверхности возбуждающего GaAs-светодиода нам без затруднений удалось закрепить на его поверхности узкозонную структуру. При этом оптическое сопряжение узкозонного слоя с возбуждающим светодиодом было осуществлено с помощью халькогенидного стекла, имеющего показатель преломления  $n = 2.6$ . Для проведения серии экспериментов с разными толщинами слоев InGaAsSb использовалось послойное химическое травление.

Фотолюминесценция на отражение возбуждалась с помощью матрицы лазеров из GaAs и измерялась при температуре  $T = 77 \text{ К}$ .

Во всех спектральных измерениях было использовано синхронное детектирование импульсного сигнала (частота 500 Гц, длительность импульса 5–30 мкс), получаемого с охлаждаемого InSb-фотодиода. Измерения

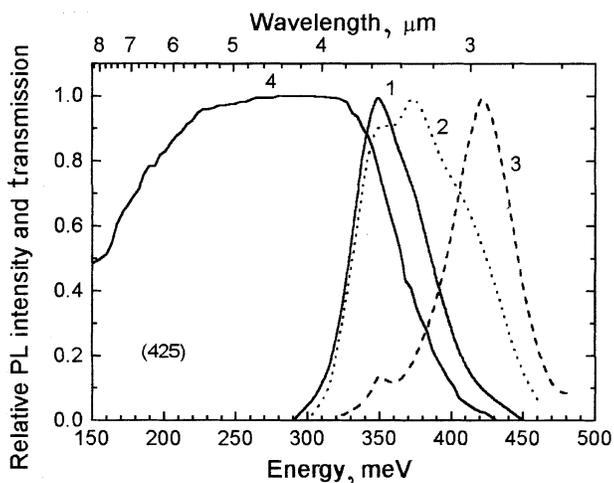
<sup>¶</sup> E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

мощности СД производились с помощью охлаждаемого CdHgTe-фотоиода с учетом особенностей спектров и диаграммы направленности светодиодов.

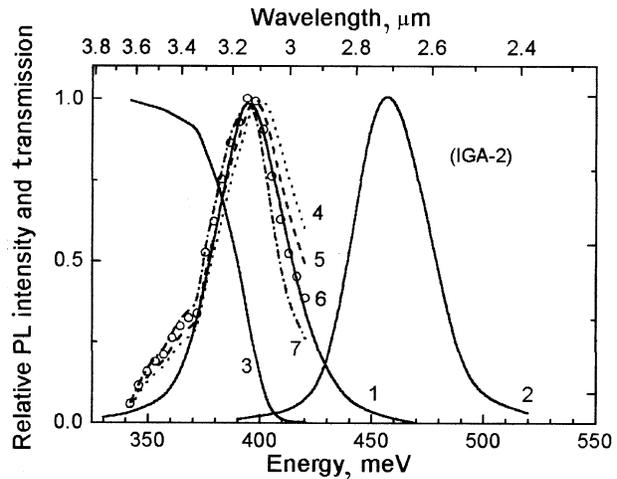
## Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены спектры ФЛ эпитаксиальных слоев, прошедшей через "окно" из InAsSbP и подложку  $n^+$ -InAs(100) при различных толщинах InGaAsSb и InAsSbP. На рис. 1 показан также спектр пропускания при  $T = 300$  К с краем поглощения в области максимума полосы ФЛ и длинноволновым поглощением на свободных носителях в подложке, начиная с  $\lambda \gtrsim 5$  мкм.

Мы полагаем, что спектр ФЛ не деформируется из-за присутствия  $n^+$ -InAs, поскольку вследствие сдвига Мосса–Бурштейна ожидаемая прозрачность подложки ( $t/t_0$ ) составляет 0.83 при 3.14 мкм и 0.5 при 3 мкм. Спектр ФЛ InGaAsSb "на отражение" при  $T = 77$  К (на рисунке не показан) имеет симметричную форму гауссовой кривой с полушириной  $\text{FWHM} = 44$  мэВ и максимумом при  $h\nu_{\text{max}} = 420$  мэВ. Спектр InGaAsSb при комнатной температуре несимметричен и имеет затянутый коротковолновый край, заметно усиливающийся с уменьшением толщины слоя. При сравнении слоя InGaAsSb в спектре появляется пик с  $h\nu_{\text{max}} = 420$  мэВ, соответствующий излучению из InAsSbP. В данном случае совпадение положения спектров InAsSbP (300 К) и InGaAsSb (77 К) является случайностью. Небольшое плечо  $h\nu_{\text{max}} = 350$  мэВ в спектре InAsSbP можно связать с неоднородностью травления и с наличием небольшого остатка слоя InGaAsSb. С уменьшением толщины слоя InGaAsSb интегральная интенсивность ФЛ изменяется аналогично интенсивности электролюминесценции в зависимости от глубины залегания  $p$ - $n$ -перехода [9,10] и имеет максимум при толщине  $d \approx 4$  мкм.



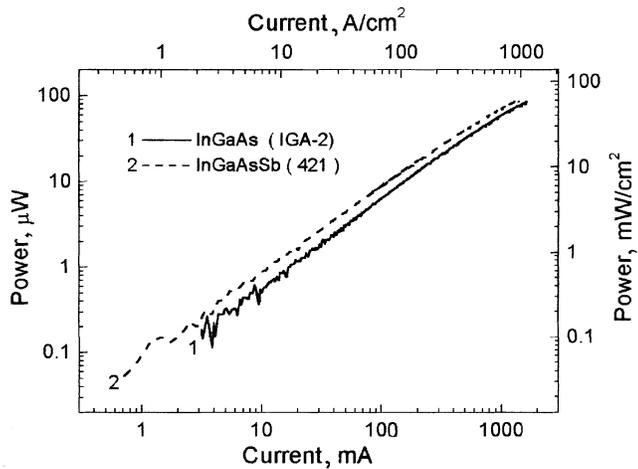
**Рис. 1.** Спектральные зависимости интенсивности фотолюминесценции (PL) (1–3) и пропускания (4) образцов InGaAsSb/InAsSbP/ $n^+$ -InAs. Толщины слоев InGaAsSb/InAsSbP, мкм: 6/2 (1, 4), 1.2/2 (2), 0/0.8 (3).



**Рис. 2.** Экспериментальные спектры фотолюминесценции (PL) (1, 2), пропускания (3) образца InGaAs/ $n^+$ -InAs и расчетные спектры фотолюминесценции (4–7). Температура 300 К (1, 3–7) и 77 К (2). Величина подгоночного параметра  $L_p$ :  $L_p \gg d$  (4),  $L_p = 10$  (5), 5 (6), 3 мкм (7).

Полученные данные по поглощению и излучению можно связать, используя принцип детального равновесия, предложенный Русбреком и Шокли. Учет самопоглощения излучения и экспоненциального распределения фотовозбужденных носителей [11] позволяет моделировать спектр ФЛ, используя диффузионную длину для дырок ( $L_p$ ) в качестве подгоночного параметра. Расчетный спектр ФЛ InGaAsSb при всех разумных значениях параметра  $L_p$  смещен в коротковолновую область на 10 мэВ по отношению к экспериментальному спектру. Вместе с тем его положение соответствует величине  $h\nu_{\text{max}}(77 \text{ К}) = 60$  мэВ, которую следует ожидать, основываясь на известных температурных зависимостях люминесценции подобных материалов [4,12]. В этой связи можно предположить, что наблюдаемая ФЛ состоит из двух пиков, связанных, например, с рекомбинацией "зона–зона" и "зона–акцептор". В пользу этого предположения свидетельствует несимметричный вид спектра (см. рис. 1), а также довольно низкое значение коэффициента поглощения при энергии максимума люминесценции  $\alpha(h\nu_{\text{max}}) = 417 \text{ см}^{-1}$  — значительно меньшее полученное ранее для рассогласованных с подложкой градиентных слоев InAs<sub>0.85</sub>Sb<sub>0.15</sub>,  $\alpha(h\nu_{\text{max}}) = 1400 \text{ см}^{-1}$  [13]. Пониженное значение  $\alpha(h\nu_{\text{max}})$  для изопериодного InGaAsSb не отражает, таким образом, общую тенденцию увеличения коэффициента поглощения при снижении плотности дислокаций, полученную в [13].

На рис. 2 приведены спектры пропускания и ФЛ образца InGaAs/ $n^+$ -InAs (111). Спектры ФЛ при  $T = 77$  и 300 К имеют одинаковую форму, хорошо описываемую гауссовой кривой с полушириной  $\text{FWHM} = 30$  мэВ и положениями пиков соответственно при 400 и 462 мэВ. На рис. 2 приведены также расчетные спектры, полу-



**Рис. 3.** Зависимость мощности светодиодов с оптическим возбуждением от амплитуды импульсного тока. Материал узкозонной активной области: 1 — InGaAs ( $\lambda = 3.14$  мкм), 2 — InGaAsSb ( $\lambda = 3.6$  мкм).  $T = 300$  К.

ченные при различных значениях диффузионной длины неосновных носителей. Как видно из рис. 2, хорошее совпадение расчетной кривой с экспериментальной наблюдается при  $L_p = 5$  мкм (см. точки на рисунке). Полученное значение  $L_p$  меньше диффузионной длины 10–20 мкм в "чистом" арсениде индия (с концентрацией электронов  $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) [14], но находится в соответствии с нашими оценками, основанными на наблюдении падения интенсивности люминесценции при послойном стравливании  $n$ -InAsSbP/ $n$ -InAs [15]. Следует отметить, что, несмотря на значительное несоответствие периодов решеток и высокую плотность дислокаций ( $10^7 \text{ см}^{-2}$ ), слои InGaAs имеют оптические свойства, характерные для совершенных кристаллов: резкий край поглощения,  $\alpha \propto \exp(h\nu/\epsilon)$  с  $\epsilon = 10$  мэВ, высокий коэффициент поглощения,  $\alpha(h\nu_{\max}) = 1140 \text{ см}^{-1}$ , и стандартную для InAs скорость температурного изменения положения пика ФЛ (62 мэВ/223 К). Из этого можно сделать вывод о том, что дислокации не вносят существенного вклада в рекомбинацию носителей в InGaAs.

Косвенно вышеуказанный вывод о несущественности влияния дислокаций подтверждается сравнением мощности InGaAs- и InGaAsSb-светодиодов с оптическим возбуждением (рис. 3). Как видно из рис. 3, оба светодиода имеют близкие значения выходной мощности с линейной зависимостью от тока. Отметим, что InGaAs-светодиод не был оптимизирован, в то время как InGaAsSb-светодиод имел оптимальную толщину узкозонного активного слоя — 3 мкм.

Линейность ватт-амперной характеристики является еще одним преимуществом СД с оптическим возбуждением, поскольку обычные светодиоды в среднем ИК диапазоне спектра часто насыщаются при больших токах [10,16]. Отметим также и то, что полученный коэффициент преобразования для СД из InGaAsSb

(90 мВт/А · см<sup>2</sup>) сравним с лучшими данными для СД в том же спектральном диапазоне (115 мВт/А · см<sup>2</sup>, InGaAs [17]).

## Заключение

Таким образом, нами созданы первые оптически возбуждаемые светодиоды для среднего ИК диапазона спектра на основе твердых растворов III–V, имеющие мощность, близкую к лучшим значениям, получаемым в обычных светодиодах. Высокое напряжение и, соответственно, высокая потребляемая мощность таких светодиодов компенсируются простотой в изготовлении, поскольку узкозонный активный слой может быть приготовлен без применения методов фотолитографии и формирования  $p$ - $n$ -перехода. Важным является также то, что дислокации не оказывают существенного влияния на работу СД с оптическим возбуждением, что позволяет создавать неизопродные светодиодные структуры, содержащие, например, InGaAs, для важного с точки зрения газового анализа диапазона 2.5–3.5 мкм. В заключение отметим, что применение градиентных структур на основе InAsSbP [18] позволит расширить спектральный диапазон и область применения СД с оптическим возбуждением.

Авторы считают приятным долгом поблагодарить О.Н. Сараева за предоставление чипов светодиодов GaAs и фонд гражданских исследований США для стран СНГ (CRDF) за административную поддержку работы.

## Список литературы

- [1] M. Takeshima. *J. Appl. Phys.*, **43** (10), 4114 (1972).
- [2] J.L. Malin, C.L. Felix, J.R. Meyer, C.A. Hoffman, J.F. Pinto, C.-H. Lin, P.C. Chang, S.J. Murry, S.-S. Pei. *Electron. Lett.*, **32** (17), 1593 (1996).
- [3] M. Boroditsky, T.F. Krauss, R. Coccioli, R. Vrijen, R. Bhat, E. Yablonovitch. *Appl. Phys. Lett.*, **75** (8), 1036 (1999).
- [4] Z.M. Fang, K.Y. Ma, D.H. Jaw, R.M. Cohen, G.B. Stringfellow. *J. Appl. Phys.*, **67** (11), 7034 (1990).
- [5] X.Y. Gong, T. Yamaguchi, H. Kan, T. Makino, N.L. Rowell, Y. Lacroix, A. Mangyou, M. Aoyama, M. Kumagawa. *Japan. J. Appl. Phys.*, **36**, 738 (1997).
- [6] Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. *ФТП*, **33** (8), 1010 (1999).
- [7] A. Krier, H.H. Gao, V.V. Sherstnev. *J. Appl. Phys.*, **85** (12), 8419 (1999).
- [8] B. Matveev, N. Zotova, S. Karandashov, M. Remennyi, N. P'inskaya, N. Stus', V. Shustov, G. Talalakin, J. Malinen. *IEE Proc. Optoelectron.*, **145** (5), 254 (1998).
- [9] A.A. Bergh, P.J. Dean. *Light-emitting diodes* (Clarendon Press, Oxford, 1976).
- [10] M.J. Kane, G. Braithwaite, M.T. Ereny, D. Lee, T. Martin, D.R. Wright. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (8), 943 (2000).
- [11] D.D. Sell, H.C. Casey Jr. *J. Appl. Phys.*, **45** (2), 800 (1974).
- [12] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. *ФТП*, **34** (1), 99 (2000).

- [13] Н.В. Зотова, А.В. Лосев, Б.А. Матвеев, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин, А.С. Филипченко. Письма ЖТФ, **16** (4), 76 (1990).
- [14] <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Nano/index.html>
- [15] Н.П. Есина, Н.В. Зотова, Б.А. Матвеев, Л.Д. Неуймина, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, **19** (11), 2031 (1985).
- [16] M.K. Parry, A. Krier. Semicond. Sci. Technol., **8**, 1764 (1993).
- [17] M.K. Parry, A. Krier. Electron. Lett., **30** (23), 1968 (1994).
- [18] Б.А. Матвеев, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. Патент РФ № 2154324 с приоритетом от 27.04.99.

*Редактор Л.В. Шаронова*

## **InGaAs(Sb) optically pumped mid-infrared light-emitting diodes**

N.V. Zotova, S.A. Karandashev, B.A. Matveev,  
M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin,  
V.V. Shustov

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

**Abstract** We report on spectral and power characteristics of mid-infrared light-emitting diodes in the 3.1–3.6  $\mu\text{m}$  range from InGaAsSb/ $n^+$ -InAs and InGaAs/ $n^+$ -InAs structures optically pumped using a GaAs light-emitting diode. Devices exhibited the conversion efficiency as high as 90 mW/A  $\cdot$  cm<sup>2</sup> close to conventional light-emitting diodes.