

## Прямые оптические переходы в излучательной рекомбинации в твердых растворах $\text{InGa}_x\text{As}$ ( $0 \leq x \leq 0.16$ )

© 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 26 апреля 2001 г. Принята к печати 11 мая 2001 г.)

Исследованы фотолюминесценция эпитаксиальных слоев твердого раствора  $\text{InGa}_x\text{As}$  в диапазоне составов  $0 \leq x \leq 0.16$ , полученных жидкофазной эпитаксией на подложках  $\text{InAs}$  (111), и электролюминесценция  $p-n$ -переходов на их основе в интервале температур 77–450 К. Показано, что, несмотря на отрицательное несоответствие периодов решетки эпитаксиального слоя и подложки, излучательная рекомбинация в эпитаксиальных слоях определяется прямыми оптическими переходами, обеспечивающими высокий внутренний квантовый выход люминесценции (6%, 295 К).

### Введение

Твердые растворы  $\text{InGa}_x\text{As}$  в диапазоне составов  $0 \leq x \leq 0.2$  могут быть использованы для создания оптоэлектронных приборов, излучающих в спектральной области 2.5–3.8 мкм. В ряде работ [1–7] исследовались структурные и люминесцентные свойства твердых растворов  $\text{InGaAs}$ , выращенных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложках  $\text{InAs}$ , с составами, близкими к  $\text{InAs}$ . Для гетероструктур  $\text{InGaAs/InAs}$  с отрицательным несоответствием периодов решетки эпитаксиального слоя и подложки ( $\bar{a}_{\text{sub}} > \bar{a}_{\text{кри}}$ ) характерно проявление нестабильности на гетерогранице, приводящее к "островковому" росту слоя и образованию кластеров [8]. Последнее может приводить к нарушению закона сохранения волнового вектора и соответственно к излучательной рекомбинации, определяемой непрямыми оптическими переходами [9]. Поскольку для получения эффективных светодиодов (СД) и лазеров необходимо использовать полупроводниковые материалы с прямыми оптическими переходами, обеспечивающими высокий квантовый выход люминесценции, представляется важным выяснить, выполняется ли закон сохранения волнового вектора в системе  $\text{InAs/InGaAs}$ .

Цель данной работы состояла в выяснении роли прямых оптических переходов в излучательной рекомбинации в эпитаксиальных слоях твердых растворов  $\text{InGa}_x\text{As}$  ( $0 \leq x \leq 0.16$ ) и  $p-n$ -структурах на их основе в диапазоне температур 77–450 К, полученных жидкофазной эпитаксией на подложках  $\text{InAs}$  (111).

### Исследуемые объекты и методики исследования

Объектом исследования служили гетероструктуры  $\text{InGaAs/InAs}$ , полученные методом ЖФЭ на подложках  $p\text{-InAs}$  (111).  $p-n$ -Переходы создавались введе-

нием  $\text{Mn}$  в раствор-расплав в интервале концентраций  $10^{-3}$ – $10^{-4}$ . Использование марганца, имеющего более низкие значения скорости диффузии и упругости пара по сравнению с традиционно используемыми в  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  акцепторными примесями — цинком и кадмием, позволяло точнее контролировать уровень легирования и положение  $p-n$ -перехода в структуре. Энергия активации акцепторного уровня  $\text{Mn}$  в твердом растворе  $\text{InGa}_x\text{As}$  в интервале составов  $0 \leq x \leq 0.2$  составляет около 20 мэВ, и с дальнейшим увеличением  $x$  энергия активации марганца возрастает [3]. Эпитаксиальные слои  $n$ -типа специально не легировались и имели концентрацию носителей  $n \approx 1 \div 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , концентрация дырок в  $p$ -слоях составляла  $10^{16}$ – $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Толщина слоя  $\text{InGaAs}$  составляла 5–10 мкм. Градиент ширины запрещенной зоны по толщине эпитаксиального слоя твердого раствора отсутствовал [1].

Спектры фотолюминесценции ( $T=77 \text{ K}$ ) измерялись в геометрии "на отражение" (возбуждение и регистрация излучения осуществлялись с поверхности слоя твердого раствора). Источником возбуждения служил полупроводниковый лазер ЛПИ-14 ( $\lambda = 0.8 \text{ мкм}$ ,  $P_{\text{pulse}} \approx 50 \text{ Вт}$ ). Для измерения электролюминесценции (ЭЛ) чипы светодиодов толщиной  $\sim 100 \text{ мкм}$  монтировались  $p$ -подложкой вниз на корпус ТО-18. При этом подача напряжения на СД осуществлялась через золотую подковообразную контактную площадку, расположенную на поверхности чипа рядом с катодом (рис. 1 [14]), что создавало отсутствие линий тока вблизи нерабочей поверхности  $p\text{-InAs}$ .

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции (ФЛ) эпитаксиальных слоев  $n$ -типа  $\text{InGa}_{0.05}\text{As}$  и  $\text{InGa}_{0.16}\text{As}$  (77 К). Положение максимума и коротковолновое крыло спектров хорошо описываются в предположении прямых переходов зона-зона, сферических

<sup>¶</sup> E-mail: bmat@iropt3ioffe.rssi.ru  
Fax: +7(812)2474324

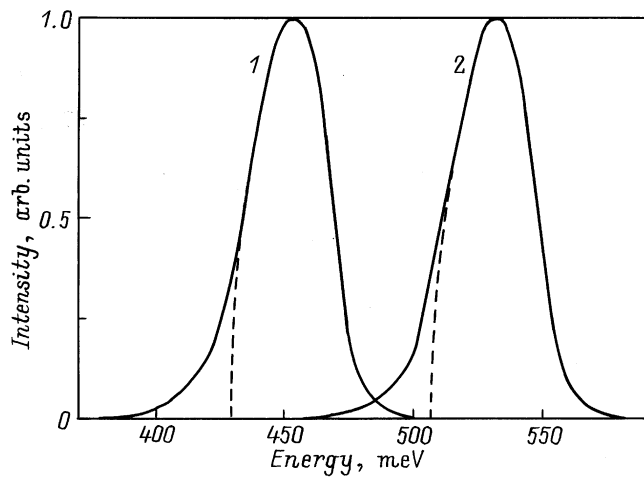


Рис. 1. Спектры ФЛ эпитаксиальных слоев  $n$ -типа  $\text{InGa}_{0.05}\text{As}$  (1) и  $\text{InGa}_{0.16}\text{As}$  (2),  $T = 77\text{ K}$ .

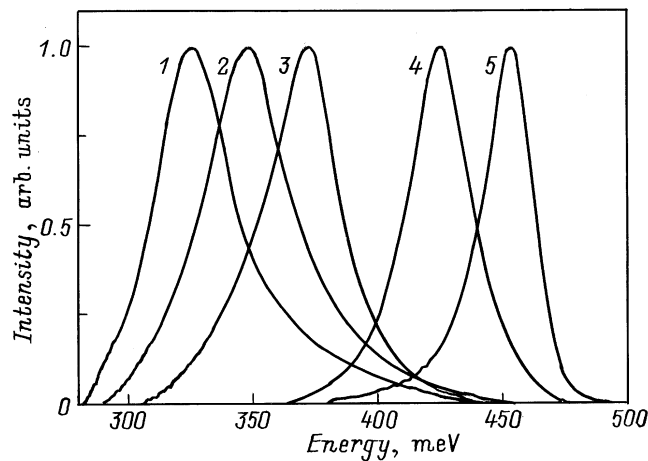


Рис. 2. Спектры ЭЛ светодиода  $\text{InAs}/\text{InGa}_{0.05}\text{As}$ . Температура, К: 1 — 450, 2 — 370, 3 — 295, 4 — 160, 5 — 77.

изоэнергетических поверхностей и термализованных неосновных носителей (штриховая прямая) [5]:

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

где  $E$  — энергия электрона, отсчитанная от дна зоны проводимости,  $m_e = 0.03m_0$ ,  $m_h = 0.4m_0$  — эффективные массы электронов и тяжелых дырок,  $\zeta = 30\text{ мэВ}$  — уровень Ферми для электронов при  $n = (1-2) \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ . Значение  $E_g$ , полученное из обработки спектров, хорошо соответствует интерполяции  $E_g(x) = 0.42 + 0.63x + 0.45x^2$  [6].

На рис. 2 приведены спектры ЭЛ светодиодов на основе  $p$ - $n$ -переходов в  $\text{InGa}_{0.05}\text{As}$  в интервале температур 77–450 К. Вследствие высокой подвижности

электронов излучательная рекомбинация происходит в  $p$ -области  $p$ - $n$ -перехода, поэтому обработка спектров ведется в предположении прямых переходов электронов из зоны проводимости на акцепторный уровень марганца. Коротковолновые спады спектров описываются зависимостью  $I \propto \exp(-h\nu/kT)$ , характерной для прямых переходов. Полуширина спектров возрастает с увеличением температуры от 20 мэВ (77 К) до 40 мэВ (450 К). При оптических переходах с сохранением волнового вектора энергия перехода из зоны проводимости на акцепторный уровень должна быть меньше энергии максимума ЭЛ ( $h\nu_{\text{max}}$ ) на величину  $kT/2$ , а ее температурная зависимость повторяет температурную зависимость ширины запрещенной зоны (следствие соотношения (1)). Температурные зависимости  $h\nu_{\text{max}}$  и  $h\nu_{\text{max}} - kT/2$  представлены на рис. 3. Действительно, наклон зависимости  $d(h\nu_{\text{max}} - kT/2)/dT = 3.8 \cdot 10^{-4}\text{ эВ/К}$  практически совпадает с температурным изменением ширины запрещенной зоны ближайшего аналога твердого раствора:

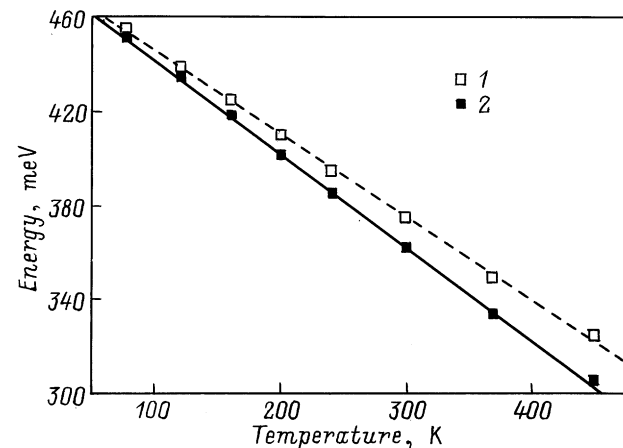


Рис. 3. Температурные зависимости энергии максимума спектра ЭЛ  $h\nu_{\text{max}}$  (1) и  $h\nu_{\text{max}} - kT/2$  (2) светодиода  $\text{InAs}/\text{InGa}_{0.05}\text{As}$ .

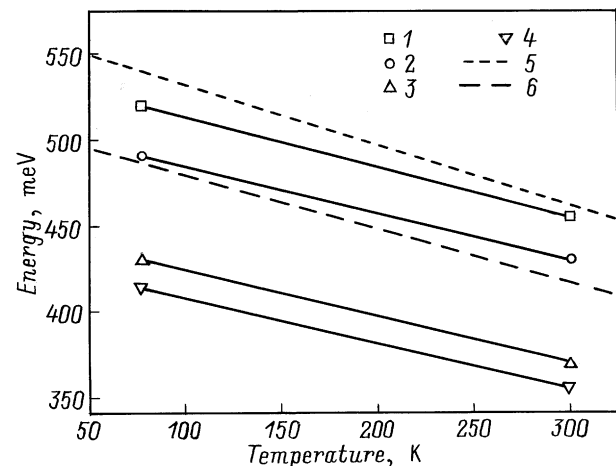
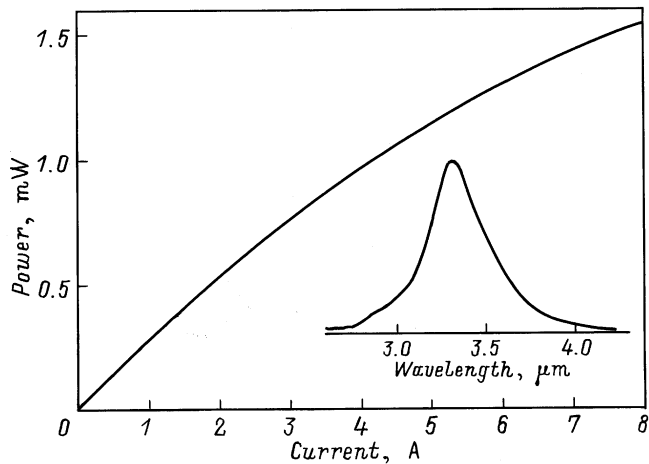


Рис. 4. Энергии максимума спектров ФЛ эпитаксиальных слоев  $\text{InGa}_x\text{As}$ ,  $x$ : 1 — 0.054, 2 — 0.06, 3 — 0.12, 4 — 0.16; 5 —  $E_g$ , 6 —  $h\nu - kT/2$  ( $x = 0.12$ ).



**Рис. 5.** Ватт-амперная характеристика и спектр излучения (вставка) светодиода InAs/InGa<sub>0.05</sub>As (295 К). Длительность импульсов 5 мкс, частота 500 Гц.

InAs ( $dE_g/dT = 3.8 \cdot 10^{-4}$  эВ/К [7]). Интенсивность ЭЛ уменьшается в 70 раз с повышением температуры от 77 до 300 К, что сравнимо с уменьшением интенсивности люминесценции бинарного соединения InAs [9].

На рис. 4 приведены значения энергий максимумов спектров ЭЛ слоев InGa<sub>x</sub>As для составов  $x = 0.054, 0.06, 0.12, 0.16$  (77, 295 К). При увеличении температуры от 77 до 295 К сдвиг энергии максимумов ЭЛ имеет одинаковую величину, а зависимость  $h\nu - kT/2$  (рис. 4, прямая б) имеет тот же наклон, что и температурная зависимость ширины запрещенной зоны InAs (рис. 4, прямая 5).

На рис. 5 приведены ватт-амперная характеристика и спектр излучения СД на основе гетероструктуры  $p$ -InAs/InGa<sub>0.05</sub>As ( $\lambda_{\max} = 3.3$  мкм) при комнатной температуре. Значения мощности на линейном участке ватт-амперной характеристики (до  $\sim 1$  А) соответствуют значениям внешнего и внутреннего квантового выхода 0.08% и  $\sim 6\%$  соответственно.

## Заключение

Совпадение расчетных и экспериментальных кривых спектров ФЛ эпитаксиальных слоев  $n$ -типа InGa<sub>0.05</sub>As и InGa<sub>0.16</sub>As (77 К), совпадение наклонов температурных зависимостей энергии перехода и ширины запрещенной зоны в светодиодах на основе InGa<sub>0.05</sub>As в интервале температур 77–450 К и в СД на основе InGa<sub>x</sub>As для составов  $x = 0.054, 0.06, 0.12, 0.16$  (77, 295 К), а также высокий внутренний квантовый выход люминесценции свидетельствуют о том, что в твердых растворах InGa<sub>x</sub>As механизм излучательных переходов подчиняется закону сохранения волнового вектора и не изменяется в интервале составов  $0 \leq x \leq 0.16$  и диапазоне температур 77–450 К.

## Список литературы

- [1] Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин, Ю.Ю. Билинец. ФТП, **21** (6), 1079 (1987).
- [2] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Н.М. Стусь. ФТП, **23** (4), 592 (1989).
- [3] N.V. Zotova, S.A. Karandashov, B.A. Matveev, N.M. Stus', G.N. Talalakin. Cryst. Properties and Preparation, **12**, 243 (1987).
- [4] 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).
- [5] A. Mooradian, H.Y. Fan. Phys. Rev., **148** (2), 875 (1996).
- [6] G.B. Stringfellow, P.E. Greene. J. Electrochem. Soc., **118** (5), 805 (1971).
- [7] O. Madelung. Physics of III–V Compounds (John Wiley & Sons, N.Y.–London–Sydney, 1964).
- [8] M.G. Astles, O.D. Dosse, A.J. Machelan, P.J. Wright. J. Cryst. Growth, **54** (3), 485 (1981).
- [9] Z.M. Fang, K.J. Ma, D.H. Jaw, R.M. Cohen, G.B. Stringfellow. J. Appl. Phys., **67** (11), 7034 (1990).

Редактор Л.В. Беляков

## Direct optical transitions in radiative recombination in InGa<sub>x</sub>As ( $0 \leq x \leq 0.16$ ) solid solutions

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** Photoluminescence of InGa<sub>x</sub>As epilayers within  $0 \leq x \leq 0.16$  composition range, the LPE growth on InAs (111) substrates, and electroluminescence of  $p$ - $n$ -junctions on their basis in the temperature range 77–450 K are investigated. It has been shown, that despite the negative mismatch of the epilayer and substrate lattice constant, the radiation recombination in epilayers is determined by direct optical transitions ensuring high internal quantum yield of luminescence (6% at 295 K).