

06:07;12

## InAs/InAsSbP светоизлучающие структуры, выращенные методом газофазной эпитаксии

© Е.А. Гребенщикова, Н.В. Зотова, С.С. Кижаяев,<sup>1</sup> С.С. Молчанов, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
<sup>1</sup>e-mail: serguie@mail.ru

(Поступило в Редакцию 16 октября 2000 г.)

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений изготовлены светодиоды на основе двойной гетероструктуры InAs/InAsSbP, работающие в диапазоне длин волн  $3.3 \mu\text{m}$ . Внешний квантовый выход диодов составлял 0.7%. В лазерных диодах получено стимулированное излучение на длине волны  $3.04 \mu\text{m}$  при  $T = 77 \text{ K}$ .

В настоящее время существует устойчивый спрос на приборы для контроля предельно допустимых концентраций ряда углеводородов (метана, пропана, этилена и др.). Молекулы метана, как и других углеводородов, обладают способностью поглощать инфракрасное излучение. У метана сильные полосы поглощения расположены в диапазоне длин волн  $3.3 \mu\text{m}$  [1], поэтому полупроводниковые светодиоды (СД), работающие в вышеупомянутой области спектра, могут использоваться в портативных газоанализаторах в качестве источников излучения. Соединения на основе солей свинца (IV–VI) [2], а также узкозонных полупроводников HgCdTe (II–VI) [3] обладают низкой теплопроводностью, а также значительной металлургической нестабильностью, что делает их в сравнении с твердыми растворами III–V менее привлекательными материалами для изготовления инфракрасных излучателей. Для области спектра  $3.3 \mu\text{m}$  на основе полупроводников III–V светодиодные структуры создавались чаще всего методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [4–6], реже газофазной эпитаксией из металлоорганических соединений (МОГФЭ) [7] и молекулярно-лучевой эпитаксией [8].

Основным недостатком созданных СД для спектрального диапазона  $3\text{--}5 \mu\text{m}$  является недостаточная для прикладных приложений выходная оптическая мощность излучения:  $\leq 0.1 \text{ mW}$  в непрерывном режиме и  $\sim 1 \text{ mW}$  в импульсном режиме работы, что сдерживает практическое использование таких СД. Данная работа является продолжением наших работ по СД в области  $3\text{--}5 \mu\text{m}$ , которые создавались ранее методом ЖФЭ. Мы продолжаем данной работой цикл исследований по созданию СД методом МОГФЭ [9] и ставим перед собой задачу увеличения эффективности СД почти на порядок по сравнению с излучателями, созданными ЖФЭ. Такой прогноз базируется на возможности более гибкого использования МОГФЭ для выращивания гетероструктур типа InAsSb/InAsSbP, прежде всего за счет выращивания более широкозонных слоев InAsSbP (например, в области несмешиваемости) и создания гетероструктур с лучшим электронным и оптическим ограничением, а также гетероструктур с более совершенной морфологией. Дан-

ная работа посвящена созданию СД методом МОГФЭ, излучающих на длине волны  $3.3 \mu\text{m}$  и обладающих высокими значениями оптической мощности излучения.

Рассмотрим выращенную симметричную двойную гетероструктуру, на основе которой изготавливались СД и лазеры (рис. 1). Структура состояла из подложки InAs (111)В ( $n \sim 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), на которую наращивались преднамеренно нелегированный слой InAsSbP ( $n \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) толщиной  $1.2 \mu\text{m}$ , специально нелегированный активный слой  $n\text{-InAs}$  (толщиной  $1 \mu\text{m}$ ) и  $p\text{-InAsSbP}$ , легированный цинком до уровня  $p \sim 8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , толщиной  $1.2 \mu\text{m}$ . Последующие измерения показали, что произошла диффузия цинка из последнего барьерного слоя InAsSbP и активный слой InAs имеет  $p$ -тип проводимости.  $p\text{--}n$ -переход располагался в первом барьерном слое InAsSbP на расстоянии  $0.5 \mu\text{m}$  от подложки  $n\text{-InAs}$ . Содержание фосфора в барьерных слоях составляло 25%. Ширина запрещенной зоны ( $E_g$ ) твердого раствора InAsSbP, рассчитанная по данным работы [10], составляла  $580 \text{ meV}$ .

Выращивание структуры InAsSbP/InAs/InAsSbP проводилось методом МОГФЭ в стандартном реакторе горизонтального типа при атмосферном давлении. Конструкция реактора была аналогична ранее подробно

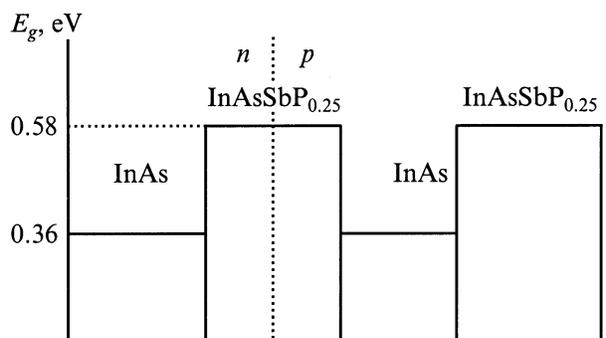
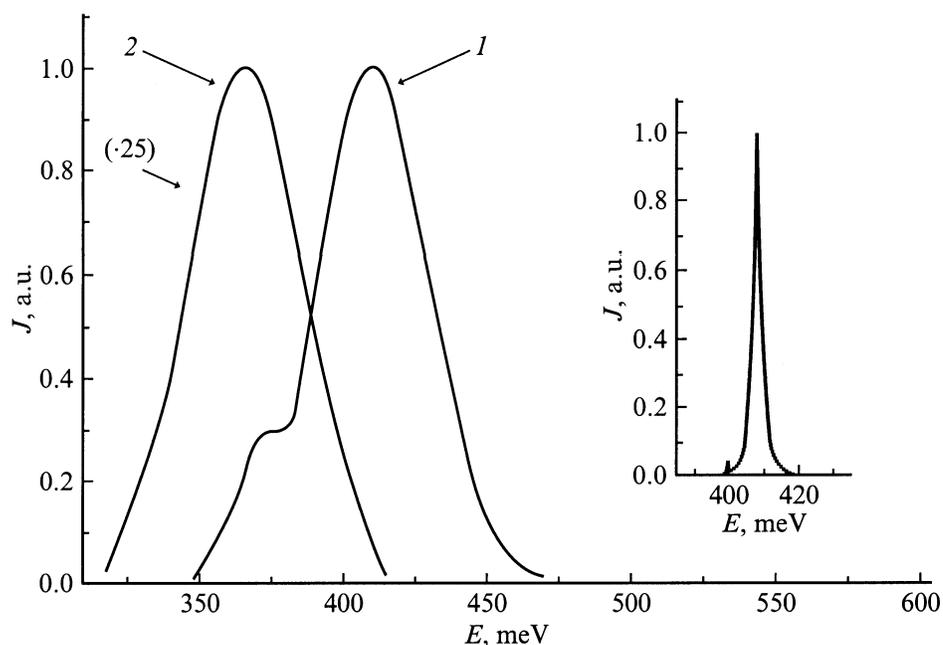


Рис. 1. Энергетическая диаграмма выращенной симметричной двойной гетероструктуры InAsSbP/InAs/InAsSbP при комнатной температуре.



**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции диодов при различных температурах.  $T = 77$  (1), 300 К (2). На вставке — спектр стимулированного излучения лазерного диода при  $T = 77$  К.

рассмотренной системе [11]. Общий поток водорода через реактор составлял 18 л/мин. Источниками индия, мышьяка, сурьмы и фосфора являлись соответственно триметилиндий (TMIn), арсин ( $\text{AsH}_3$ ), разбавленный до 20% в водороде, триметилстибин (TMSb) и фосфин ( $\text{PH}_3$ ), разбавленный до 20% в водороде.

Выращивание барьерных слоев InAsSbP проводилось при температуре подложки  $580^\circ\text{C}$ . Поток водорода через емкости (bubblers) с TMIn и TMSb составляли соответственно 435 и 50  $\text{cm}^3/\text{min}$ . TMIn и TMSb поддерживались при температурах 27 и  $6^\circ\text{C}$  соответственно. Поток  $\text{AsH}_3$  (20%) составлял 6  $\text{cm}^3/\text{min}$ ,  $\text{PH}_3$  (20%) — 50  $\text{cm}^3/\text{min}$ .  $p$ -тип проводимости в InAsSbP слое достигался легированием цинком. Источником цинка служил диэтилцинк (DeZn). Емкость с DeZn поддерживалась при температуре  $4.7^\circ\text{C}$ . Поток водорода через испаритель с DeZn составлял 20  $\text{cm}^3/\text{min}$ .

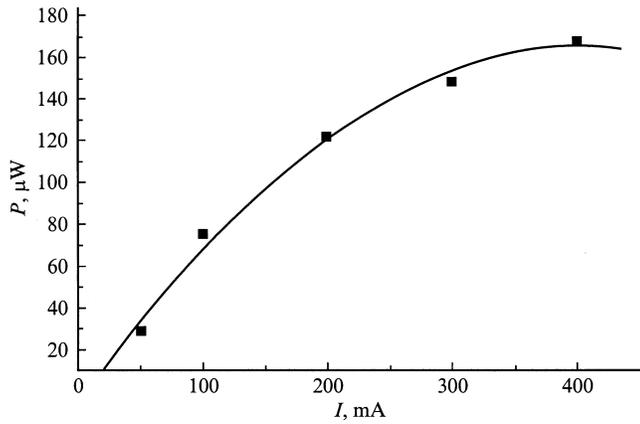
Активный слой InAs выращивался при температуре подложки  $620^\circ\text{C}$  и соотношении в газовой фазе  $V/\text{III} = 40$ .

Светодиоды были изготовлены методом стандартной фотолитографии в виде меза-диодов. Диаметр мезы составлял 300. Сплошной омический контакт создавался со стороны слоя  $p$ -InAsSbP. Диаметр точечного контакта со стороны подложки составлял 100  $\mu\text{m}$ . Омические контакты создавались напылением золота с теллуrom (на слой  $n$ -типа проводимости) и золота с цинком (на слой  $p$ -типа проводимости).

Лазерные диоды имели ширину меза-полоска 30  $\mu\text{m}$ . Контактный полосок создавался на  $p$ -InAsSbP слое. Ширина контактного полоска составляла 5  $\mu\text{m}$ . Резонаторы

изготавливались скалыванием и имели длину 300  $\mu\text{m}$ . Свойства выращенных структур исследовались с помощью электролюминесценции (ЭЛ). ЭЛ регистрировалась охлаждаемым InSb фотодиодом по схеме синхронного детектирования.

В первую очередь рассмотрим характеристики светодиодов. На рис. 2 приведены спектры ЭЛ диодов при 77 и 300 К. Диоды запитывались в импульсном режиме током 1 А ( $t = 5$  ms,  $f = 500$  Hz). В спектре, измеренном при 77 К, четко наблюдаются 2 пика: первый (коротковолновый) принадлежит подложке  $n$ -InAs ( $h\nu_{\text{max}} = 410$  meV,  $Dh\nu_{1/2} = 50$  meV), что соответствует концентрации электронов  $\sim 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  [12], и второй, принадлежащий активному слою  $p$ -InAs ( $h\nu_{\text{max}} = 380$  meV,  $Dh\nu_{1/2} = 26$  meV),  $p \sim 8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  [13]. Исходя из полученных результатов, можно предположить, что произошла диффузия цинка из верхнего барьерного слоя в глубь полупроводника и в излучательной рекомбинации участвуют подложка  $n$ -InAs и имеющий вследствие диффузии цинка  $p$ -тип проводимости активный слой InAs. Для подтверждения этого явления было произведено измерение положения  $p$ - $n$ -перехода методом растровой электронной микроскопии;  $p$ - $n$ -переход располагался в первом широкозонном слое InAsSbP на расстоянии 0.5  $\mu\text{m}$  от подложки (рис. 1). При  $T = 295$  К пик на спектре ЭЛ соответствует энергии  $h\nu_{\text{max}} = 364$  meV,  $Dh\nu_{1/2} = 56$  meV. При комнатной температуре в InAs  $E_g = 360$  meV [10]; смещение пика в сторону высоких энергий подтверждает участие в излучательной рекомбинации сильнолегированной подложки  $n$ -InAs.



**Рис. 3.** Ампер-ваттная характеристика диода, измеренная в импульсном режиме ( $\tau = 5 \mu\text{s}$ ,  $f = 500 \text{ Hz}$ ).  $P$  — мощность в оптическом диапазоне.

Ампер-ваттные ( $I$ – $W$ ) характеристики диодов измерялись в импульсном и непрерывном режимах. На рис. 3 представлена  $I$ – $W$ -характеристика диода в импульсном режиме ( $t = 5 \text{ ms}$ ,  $f = 500 \text{ Hz}$ ). Нелинейный ход зависимости не связан с разогревом, поскольку измерения в режиме постоянного тока и в импульсном режиме дают одинаковую зависимость. Внешний квантовый выход диодов составлял  $\sim 0.7\%$ . Быстрое насыщение зависимости мощности от тока накачки связано, очевидно, с малой толщиной активной области ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ), которая приводит к быстрому росту концентрации носителей заряда и, как следствие, к усилению оже-рекомбинации.

Эффективность исследуемых светодиодов можно улучшить путем оптимизации параметров ДГС. Так, в работе [14], где рассматривается механизм рекомбинации неравновесных носителей заряда в структуре  $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.16}\text{Sb}_{0.84}$  (активная область  $p$ - $\text{InAs}$ ), показано, что при малых токах инжекции, когда эффективность излучательной рекомбинации не зависит от тока, ее значение в  $p$ - $\text{InAs}$  достигает 24% при 300 К, а внешний квантовый выход  $\sim 9\%$ . Эти величины получены при оптимальных значениях концентрации дырок  $p \sim 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  и толщины активной области  $\sim 3 \mu\text{m}$ . С увеличением толщины активной области возрастает перепоглощение света (длина поглощения в  $p$ - $\text{InAs}$  в максимуме спектра излучения  $\sim 4.8 \mu\text{m}$ ) и эффективность падает. При толщинах меньше оптимальной сильнее сказывается рекомбинация на интерфейсе  $\text{InAs}/\text{AlAsSb}$ .

На вставке к рис. 2 показан спектр стимулированного излучения лазерного диода при  $T = 77 \text{ K}$ , изготовленного на основе выращенной структуры. Максимум спектра находится на длине волны  $3.04 \mu\text{m}$ , что соответствует  $E_g$  в  $\text{InAs}$  при данной температуре 408 meV. Появление стимулированного излучения свидетельствует о совершенстве гетерограниц  $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$ . Высокая величина порогового тока  $J_{\text{th}} = 330 \text{ mA}$ , объясняется недостаточной толщиной барьерных слоев  $\text{InAsSbP}$ , неоптимальными размерами активной области и положением  $p$ – $n$ -перехода с точки зрения лазерной структуры.

В дальнейшем при создании более эффективных светодиодов на основе ДГС  $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$  нам следует увеличить толщину активной области до ее оптимального значения и уменьшить концентрацию дырок. Вдобавок, так как вероятность излучательной рекомбинации в  $n$ - $\text{InAs}$  больше, чем в  $p$ - $\text{InAs}$  [13], в активной области следует использовать материал  $n$ -типа проводимости. Кроме того, метод МОГФЭ позволяет выращивать твердые растворы  $\text{InAsSbP}$  в области несмешиваемости [11,15,16], чем можно усилить оптическое и электронное ограничение в ДГС  $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$ . Хотя рассмотренная в работе светодиодная структура является далеко не оптимальной, тем не менее уже первые СД, созданные методом МОГФЭ, продемонстрировали мощность излучения, сравнимую со значениями ранее полученными у СД, изготовленных различными другими методами [4–8].

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить М.А. Ременного за внимание к работе и измерение мощности светодиодов, Т.Б. Попову за измерение химического состава  $\text{InAsSbP}$ , В.А. Соловьева за измерение положения  $p$ – $n$ -перехода. С.С. Кижаяев благодарен фонду Роберта Хэймана (Robert Haveman Foundation) за поддержку во время проведения данной работы.

## Список литературы

- [1] Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.H. et al. // J. Quant. Spectr. Rad. Transfer. 1992. Vol. 48. P. 469–507.
- [2] Feit Z., Kostyk D., Woods R.J., Mak P. // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 58 (4). P. 343–345.
- [3] Hadji E., Bleuse J., Magnea N., Paustrat J.L. // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67 (18). P. 2591–2593.
- [4] Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А. и др. // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 1. С. 102–105.
- [5] Попов А.А., Степанов М.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 21. С. 24–31.
- [6] Parry M.K., Krier A. // Electron. Lett. 1994. Vol. 30 (23). P. 1968–1969.
- [7] Stein A., Puttjer D., Behres A., Heime K. // IEE Proc. Optoelectron. 1998. Vol. 145 (5). P. 257–260.
- [8] Grieteus B., Nemeth S., Borghs G. // Intern. Conf. Mid-infrared Optoelectronics. Materials and devices. Lancaster (UK), 1996.
- [9] Зотова Н.В., Кижаяев С.С., Молчанов С.С. и др. // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 12. С. 1462–1467.
- [10] Adachi S. // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 61 (10). P. 4869–4876.
- [11] Duncan W.J., Ali A.S.M., Marsh E.M., Spurdens P.C. // J. Cryst. Growth. 1994. Vol. 143. P. 155–161.
- [12] Аллаберенов А.А., Зотова Н.В., Наследов Д.Н., Нейүмина Л.Д. // ФТП. 1970. Т. 4 (10). С. 1939–1942.
- [13] Есина Н.П., Зотова Н.В. // ФТП. 1980. Т. 14 (2). С. 316–322.
- [14] Kane M.J., Braithwaite G., Emeny M.T. et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76 (8). P. 943–945.
- [15] Jou M.J., Cherng Y.T., Jen H.R., Stringfellow G.B. // J. Cryst. Growth. 1988. Vol. 93. P. 62–69.
- [16] Behres A., Puttjer D., Heime K. // J. Cryst. Growth. 1998. Vol. 195. P. 373–377.