

06;07;12

## Выращивание InAs фотодиодных структур из металлорганических соединений

© С.С. Кижаяев, М.П. Михайлова, С.С. Молчанов,  
Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 15 октября 1997 г.

Выращены слои InAs методом эпитаксии из металлорганических соединений на *p*-InAs подложках. На основе полученных *p-n*-структур изготовлены фотодиоды. Исследованы вольт-амперные, вольт-емкостные и спектральные характеристики фотодиодных структур.

Арсенид индия представляет интерес как материал, используемый для создания инфракрасных оптоэлектронных приборов. На основе InAs в сочетании с многокомпонентными твердыми растворами (InAsSb, InAsSbP и др.) могут быть созданы фотодиоды, светодиоды, лазеры, работающие в диапазоне 2–5  $\mu\text{m}$ , важном для газового анализа и охраны окружающей среды [1–3]. Выращивание материалов осуществлялось в основном жидкофазной эпитаксией (ЖФЭ), а также методом эпитаксии из металлорганических соединений (МОС) [4–10]. В данной работе приведены результаты исследований слоев InAs, полученных методом эпитаксии из МОС на подложках InAs, а также результаты измерений электрических и фотоэлектрических свойств полученных структур.

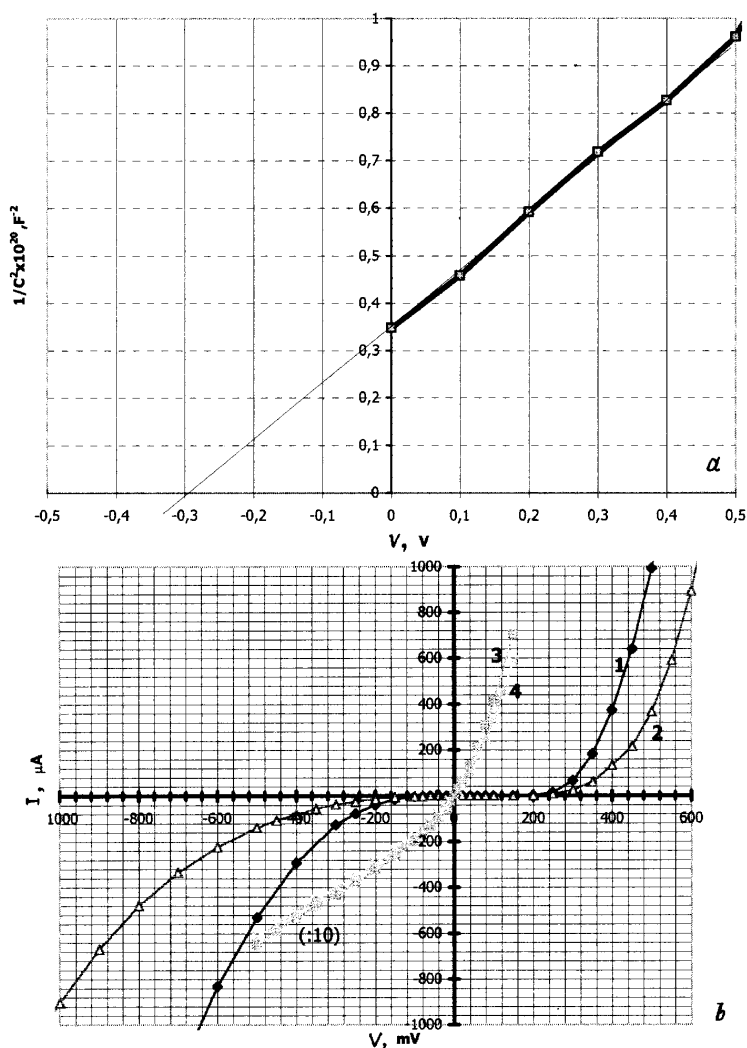
Выращивание слоев InAs проводилось эпитаксией из МОС при атмосферном давлении в плоском реакторе диаметром 30 см. Нагрев подложкодержателя осуществляется трехзонным резистивным нагревательным устройством, отделенным от внутреннего объема камеры

кварцевым колпаком. Подача парогазовой смеси осуществлялась с периферии колпака к центру. Подложки вращались относительно центральной оси. Источниками мышьяка и индия являлись соответственно арсин ( $\text{AsH}_3$ ), разбавленный до 20% в водороде, и триметилиндий (ТМІ). Температура испарителя с ТМІ была  $+18^\circ\text{C}$ . Во избежание паразитных реакций подача  $\text{AsH}_3$  и ТМІ в реактор осуществлялась по отдельным каналам и смешение происходило в реакторной камере. Для уменьшения паразитного осаждения на стенках камеры во всех экспериментах использовался добавочный поток водорода (30 l/min) из верхней зоны камеры, перпендикулярно подложкам. Во всех экспериментах использовались  $p$ -InAs (100) подложки, легированные цинком (концентрация носителей —  $p = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  при  $T = 300 \text{ K}$  и  $p = 6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  при  $T = 77 \text{ K}$ ). Перед каждым процессом подложки промывались в четыреххлористом углероде и изопропиловом спирте, обрабатывались в травителе [11], промывались в дистиллированной воде, просушивались и немедленно загружались в реакционную камеру. Эксперименты проводились в диапазоне температур  $450$ – $600^\circ\text{C}$ . Потоки  $\text{AsH}_3$  менялись в интервале  $10$ – $125 \text{ ml/min}$ , а потоки водорода через испаритель с ТМІ — в интервале  $200$ – $400 \text{ ml/min}$ . Отношение мольных долей  $\text{AsH}_3/\text{ТМІ}$  составляло от 2.5 до 50. Подача ТМІ осуществлялась спустя 2 минуты после пуска  $\text{AsH}_3$ .

При температурах подложек ниже  $500^\circ\text{C}$  поверхность слоев была рыхлой, вероятно из-за слабого разложения арсина при низких температурах. Слои, выращенные при температурах, близких к  $600^\circ\text{C}$ , были блестящими. Средняя скорость роста слоев не превышала  $0.5 \mu\text{m/h}$ .

Из измерений коэффициента Холла был установлен  $n$ -тип проводимости. Выращенные  $p$ - $n$ -структуры были использованы для создания фотодиодов. Фоточувствительные структуры были изготовлены методом стандартной фотолитографии в виде мезодиодов с  $n$ -слоем. Диаметр чувствительной площадки составлял  $600$ – $800 \mu\text{m}$ . Были исследованы вольт-амперные, вольт-емкостные и спектральные характеристики фотодиодных структур при температурах  $77$  и  $300 \text{ K}$ . Емкость измерялась стандартным мостовым методом на частоте  $1 \text{ MHz}$ . Спектры фотоответа снимались на монохроматоре SPM-2 с призмой LiF и глобаром в качестве источника излучения.

Зависимость емкости от напряжения соответствовала закону  $1/C^2 \sim V$  (рис. 1,  $a$ ) и свидетельствовала о наличии резкого  $p$ - $n$ -перехода. Величина емкости была намного ниже, чем в обычных InAs фотоди-



**Рис. 1.** *a* — зависимость емкости от обратного смещения для InAs фотодиодной структуры № 96 при  $T = 77$  К; *b* — вольт-амперные характеристики InAs фотодиодных структур № 95 и 96 при  $T = 77$  К (кривые 1, 2 соответственно) и при  $T = 300$  К (кривые 3, 4).

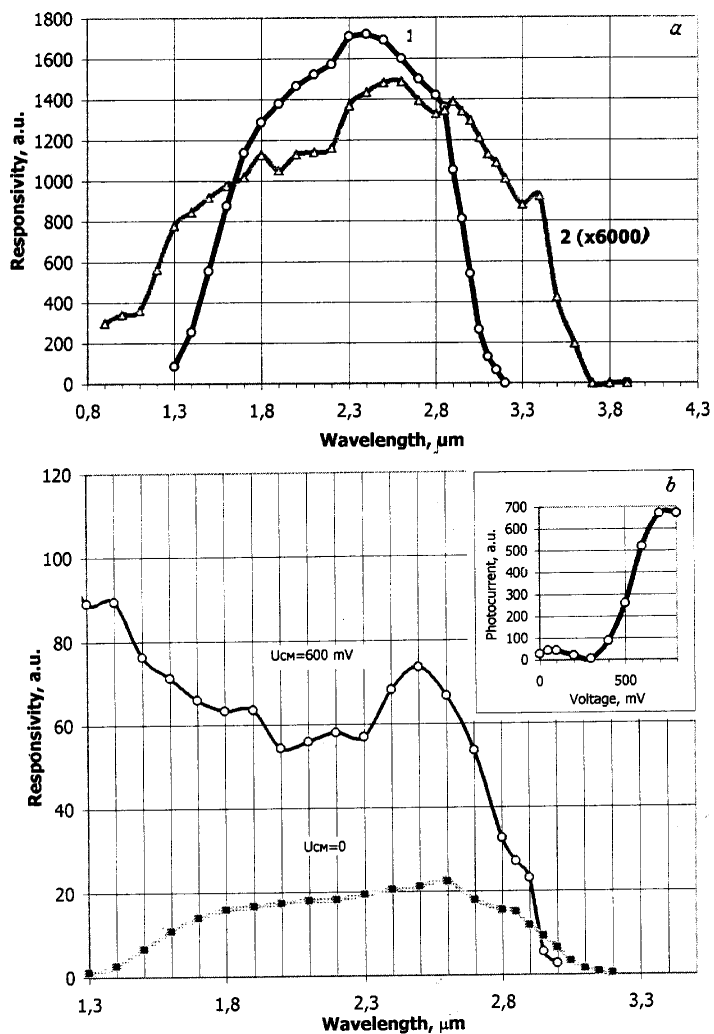
одах, полученных методом ЖФЭ, и лежала в интервале 100–200 pF при нулевом смещении для диодов с диаметром 1 mm<sup>2</sup>. Из этих данных были оценены величина концентрации носителей заряда в слое — 10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup> при  $T = 77$  К и ширина области объемного заряда —  $2 \cdot 10^{-5}$  cm ( $V = 0$ ). Исследуемая структура близка к  $p-i-n$ -фотодиоду и должна обладать высоким быстродействием  $\tau < 1$  ns, определяемым произведением  $RC$ , где  $R$  — последовательное сопротивление  $p-n$ -перехода.

На рис. 1, *b* представлены вольт-амперные характеристики для двух фотодиодов (№ 95 и 96) при  $T = 77$  К и  $T = 300$  К. При напряжениях до 100 mV ( $T = 77$  К) обратные токи составляли несколько наноампер. Напряжение отсечки на оси абсцисс для прямой ветви составило  $V = 0.3$  В. Дифференциальное сопротивление при нулевом смещении в исследуемых диодах лежало в интервале  $R_0 = 100–700$  kΩ (77 К) и  $R_0 = 30–55$  Ω (300 К) в зависимости от режимов выращивания. Обратный ток при низких температурах в области до 500 mV определялся генерацией-рекомбинацией в слое объемного заряда [13]:

$$I_{G-R} = qn_iWA/\tau_{eff}, \quad (1)$$

где  $q$  — заряд электрона,  $A$  — площадь  $p-n$ -перехода,  $n_i$  — собственная концентрация носителей заряда,  $\tau_{eff}$  — эффективное время жизни. Полученное значение  $\tau_{eff} = 6 \cdot 10^{-6}$  s хорошо соответствует времени излучательной рекомбинации в  $p$ -InAs [12].

На рис. 2, *a* представлены спектры fotocувствительности InAs фотодиодной структуры при двух температурах. Оценка значения ширины запрещенной зоны по полуспаду чувствительности от максимума дает величины:  $h\nu = 0.423$  eV ( $\lambda_{1/2} = 2.93$  μm) при 77 К и  $h\nu = 0.360$  eV ( $\lambda_{1/2} = 3.43$  μm) при 300 К. При 77 К получены высокие значения вольт-ваттной чувствительности, до 20 000 V/W. При повышении температуры до комнатной fotocувствительность уменьшалась в соответствии с уменьшением  $R_0$ . Было обнаружено, что фотоответ резко возрастал при приложении обратного напряжения (вставка на рис. 2, *b*) в интервале от 300 до 800 mV и освещении сильнопоглощаемым светом ( $\lambda = 1.5$  μm). Коэффициент усиления фототока при этом достигал 35–40. Этот эффект, скорее всего связан с лавинным умножением дырок из  $n$ -слоя в сильном поле области объемного заряда. Как было показано в [12], величина электрического поля для начала ударной ионизации в InAs для дырок из спин-орбитально отщепленной зоны невысока и составляет  $E \cong 4 \cdot 10^4$  V/cm.



**Рис. 2.** *a* — спектры фоточувствительности InAs фотодиода (№ 95) при  $T = 77\text{ K}$  (кривая 1) и  $T = 300\text{ K}$  (кривая 2). *b* — спектр фоточувствительности диодной структуры № 95 без смещения (кривая 1) и при обратном смещении 600 mV (кривая 2). На врезке: зависимость фототока от обратного смещения при освещении монохроматическим светом  $\lambda = 1.5\ \mu\text{m}$ .

Нами были рассчитаны также тепловые шумы в исследуемых InAs фотодиодах ( $i^2 = 4kT\Delta f/R_0$ ) и оценена величина обнаружительной способности при длине волны в максимуме спектра по известной формуле [13]:

$$D^*(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}) = A^{1/2}/NEP, \quad (2)$$

где  $A$  — площадь фотодиода,  $NEP$  ( $\text{W}/\text{Hz}^{1/2}$ ) — мощность эквивалентного шума. Оценивая квантовую эффективность фотодиода с учетом коэффициента отражения от поверхности как  $\eta = 0.7$ , мы получили значения чувствительности  $S = 1.6 \text{ A/W}$  при 77 К и  $S = 1.42 \text{ A/W}$  при 300 К. Величина обнаружительной способности менялась от  $D_{\lambda}^* = 1.2 \cdot 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  при 77 К до  $D_{\lambda}^* = 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  (300 К). Эти данные сравнимы со стандартными коммерческими InAs фотодиодами (см. [14]).

Таким образом, изготовлены образцы фоточувствительных слоев  $n$ -InAs на объемных подложках  $p$ -InAs методом эпитаксии из МОС. Показана перспективность данной технологии для создания высокоэффективных фотодиодных структур. Дальнейшее совершенствование технологии позволит не только существенно улучшить характеристики InAs фотодиодов, но и создать основу для выращивания тройных и четверных соединений на базе арсенида индия.

Авторы благодарят М.Н. Мизерова и Б.В. Пушного за поддержку данной работы, а также А.С. Усикова за полезные советы.

## Список литературы

- [1] Данилова Т.Н., Ершов О.Г., Именков А.Н., Степанов М.В., Шерснев В.В., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1996. Т. 30. С. 1244.
- [2] Choi H.K., Turner G.W., Eglash S.J. // IEEE Photonics Technol. Lett. 1994. V. 6. P. 7.
- [3] Михайлова М.П., Слободчиков С.В., Стоянов Н.Д., Стусь Н.М., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. С. 63.
- [4] Baliga B., Gandhi K. // J. Electrochem. Soc. 1974. V. 121. P. 1642.
- [5] Fukui T., Horikoshi Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1979. V. 18. P. 2157.
- [6] Fukui T., Horikoshi Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1980. V. 19. L551.
- [7] Fukui T., Horikoshi Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1981. V. 20. P. 587.
- [8] Haywood S.K., Martin R.W., Mason N.J., Walker P.J. // J. Crystal Growth. 1989. V. 97. P. 489.

- [9] *Biefeld R.M., Baucom K.C., Kurtz S.R.* // J. Crystal Growth. 1994. V. 137. P. 231.
- [10] *Duncan W., Ali A.S.M., Marsh E.M., Spurdens P.C.* // J. Crystal Growth. 1994. V. 143. P. 155.
- [11] *Травление полупроводников*, М.: Мир, 1965.
- [12] *Handbook Series on Semiconductor Parameters. V. 1* / Ed. by M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur. World Scientific Publish. Co. Pte. Ltd.
- [13] *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. / Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
- [14] *Infrared Detectors* 1995. EG & G Optoelectronic JUDSON. 53 p.