

06.2;06.3;07;12

## НЕОХЛАЖДАЕМЫЕ ФОТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ InAsSbP/InAs ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 3–5 МКМ

© М.П.Михайлова, С.В.Слободчиков, Н.Д.Стойнов,  
Н.М.Стусь, Ю.П.Яковлев

Фотодетекторы на основе тройных и четверных твердых растворов  $A^3B^5$ , выращенных на подложках GaSb и InAs методами как жидкофазной, так и молекулярной эпитаксии, перспективны для работы в окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм  $[1-5]$ . В связи с созданием в последние годы эффективных полупроводниковых источников излучения в данной области спектра открылись широкие возможности для разработки спектрально-согласованных оптоэлектронных пар для использования в системах контроля окружающей среды и газового анализа. С целью создания портативных и в тоже время высокоэффективных приборов такого экологического контроля необходимы фотодетекторы, работающие при комнатной температуре или неглубоком термоэлектрическом охлаждении. Особенно важен диапазон длин волн 4–5 мкм, где лежат полосы поглощения таких газов, как  $CO_2$  (4.2 мкм) и CO (4.7 мкм).

В настоящем сообщении представлены первые результаты работы по созданию фотоприемников на новой узкозонной гетероструктуре с варизонным слоем InAsSbP, работающих при комнатной температуре.

Эпитаксиальные слои InAsSbP выращивались методом жидкофазной эпитаксии в температурном интервале 650–630°C на подложках  $n$ -InAs (111)A с концентрацией носителей  $n = (1-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и их подвижностью  $\mu_n = 20\,000-25\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при  $T = 300 \text{ К}$ . Состав слоя вблизи границы с подложкой InAsSb $_{0.09}$ P $_{0.18}$ , по данным фотолюминесценции соответствовал ширине запрещенной зоны  $E_g = 0.49 \text{ эВ}$  при комнатной температуре. Градиент ширины запрещенной зоны в варизонном слое составлял  $\sim 10 \text{ эВ/см}$ , а толщина выращенного слоя — 80 мкм.  $p$ - $n$ -переход был сформирован на глубине 3 мкм от поверхности эпитаксиального слоя путем легирования цинком в соответствующей фазе эпитаксии. Фоточувствительные структуры создавались с помощью стандартной фотолитографии в виде меза-диодов с диаметром 300 мкм. Были созданы структуры фотодиодов, освещаемые как с узкозонной стороны эпи-

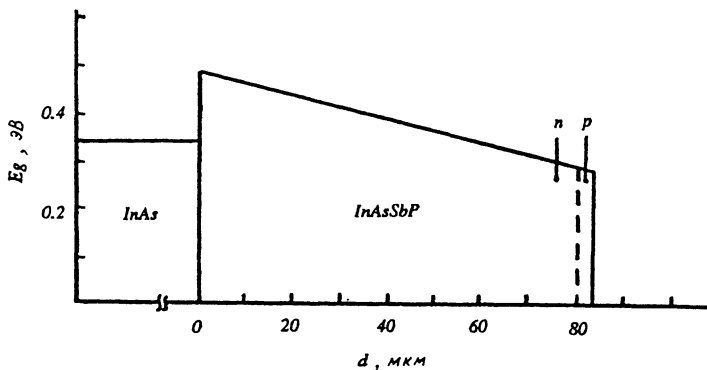


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой структуры.

таксиальной структуры (тип А), так и с широкозонной (тип В), для чего подложка удалялась химическим травлением. Структура фотодиода схематически представлена на рис. 1.

Были исследованы спектральные и вольтамперные характеристики, а также дифференциальное сопротивление в нуле смещения  $R_0$  при  $T = 77$  и  $300$  К. На рис. 2, а представлены спектральные характеристики фотодиодов, освещаемых как с узкозонной стороны ( $p$ -InAsSbP) — (тип А, кривая 1), так и с широкозонной стороны ( $n$ -InAsSbP) — (тип В, кривая 2). Максимум спектральной чувствительности для диодов типа А лежал при  $\lambda_{\max} = 4.4$  мкм, а длина волны полуспада фотоответа была  $\lambda_{1/2 \max} = 4.8$  мкм, что соответствовало ширине запрещенной зоны узкозонного  $p$ -слоя  $E_g = 0.26$  эВ при  $300$  К.

Спектральная кривая фотодиода типа В имела почти ровное плато в интервале длин волн  $4.2$ – $4.5$  мкм и крутой длинноволновый спад. В то же время для фотодиодов, освещаемых со стороны узкозонного слоя, длинноволновый край спектра был более пологим, что связано, вероятно, с добавочным поглощением в  $p$ -области вблизи поверхности.

На рис. 2, б представлены вольтамперные характеристики одного из типичных образцов фотодиодов с варизонным слоем InAsSbP при температурах  $77$  и  $300$  К. Дифференциальное сопротивление  $R_0 = dU/dI|_{v=0}$  достигало значение  $2 \cdot 10^7$  Ом при  $T = 77$  К, а при  $T = 300$  К,  $R_0$  составляло несколько десятков Ом.

Вид вольтамперных характеристик и характер их изменения с температурой, так же как и аналитические зависимости обратного тока от напряжения типа  $I \sim U^{1/2}$  в интервале  $0.2$ – $1.5$  В при  $T = 300$  К, свидетельствовали о преобладающем вкладе генерационно-рекомбинационного механиз-

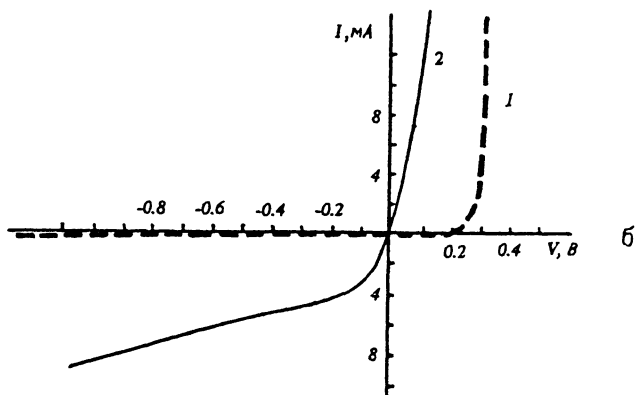
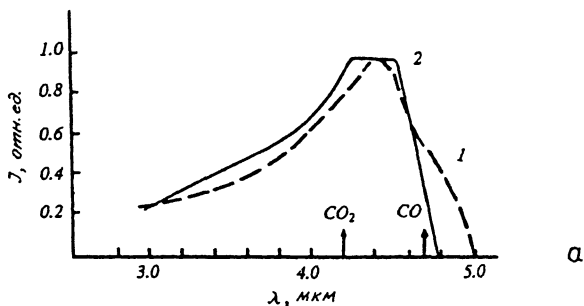


Рис. 2. а) Спектральные характеристики двух типов InAsSbP/InAs фотодиодных структур при  $T = 300$  К. 1 — тип А, 2 — тип Б. б) Вольтамперные характеристики фотодиодной структуры InAsSbP/InAs: 1 —  $T = 77$  К, 2 —  $T = 300$  К.

ма токопрохождения. В этом случае темновой ток может быть записан как:

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

где  $q$  — заряд электрона,  $A$  — площадь структуры,  $W$  — ширина слоя объемного заряда и  $\tau_{\text{eff}}$  — эффективное время жизни носителей заряда в слое. Резкая зависимость  $R_0$  от температуры в диапазоне 77–300 К определяется в основном изменением концентрации собственных носителей —  $n_i$ , то есть температурным изменением ширины запрещенной зоны  $E_g$  твердого раствора.

Приближенная оценка  $\tau_{\text{eff}}$  по (1) с учетом параметров структуры, где  $A = 7 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>, а  $W$  порядка  $10^{-5}$  см при обратном смещении 0.5 В, дает значение  $\tau_{\text{eff}} \sim 5$  нс. Напряжение отсечки вольтамперной характеристики при

прямом смещении составило  $0.29 \text{ В}$  ( $T = 77 \text{ К}$ ), что согласуется со значением ширины запрещенной зоны варизонного слоя в области  $p$ - $n$ -перехода. При температурах, близких к комнатной, в фотодиодных структурах преобладали тепловые шумы и соответствующий шумовой ток составил  $\langle i_n \rangle = (4kT\Delta f/R_0)^{1/2} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ А} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$  при  $R_0 = 20 \text{ Ом}$ . Фоточувствительность на длине волны  $\lambda_{\text{max}} = 4.7 \text{ мкм}$ , была оценена как  $R_\lambda = I_p/P = 2.65 \text{ А/В}$ , где  $P$  — падающая на прибор мощность излучения, а  $I_p$  — фототок. При этом пороговая чувствительность или мощность, эквивалентная шуму, была оценена как  $NEP = \langle i_n \rangle R_\lambda = 1.1 \cdot 10^{-10} \text{ В} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ . Отсюда удельная обнаружительная способность в максимуме спектра составляет  $D_\lambda^*(4.7, 1000, 1) = A^{1/2}/NEP = 3 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{В}$  при  $T = 300 \text{ К}$ . При использовании неглубокого охлаждения (до  $196 \text{ К}$ ) это значение может быть улучшено на 1.5 порядка.

Полученное для исследуемых  $\text{InAsSbP/InAs}$  фотодиодов значение обнаружительной способности при комнатной температуре сравнимо с фоторезисторами на основе  $\text{PbSe}$ , работающих в том же спектральном диапазоне [6]. Однако представленные  $\text{InAsSbP/InAs}$  фотодиоды имеют низкий уровень шумов, высокое быстродействие и работают в фотовольтаическом режиме.

Дальнейшее улучшение технологии (снижение концентрации носителей в активном слое) и оптимизация конструкции позволяют далее улучшать параметры  $\text{InAsSbP/InAs}$  фотодиодов.

### Список литературы

- [1] *Bubulac L.O., Andrews A.M., Gerther E.R. and al. // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. P. 734.*
- [2] *Gertner E.R., Andrews A.M., Bubulac L.O. and al. // J. Electron. Mat. 1979. V. 8. P. 545.*
- [3] *Андреев И.А., Афраилов М.А., Баранов А.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. С. 27.*
- [4] *Андреев И.А., Баранов А.Н., Михайлова М.П. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. С. 50.*
- [5] *Dobbelaere W., De Boeck J., Heremans P. and al. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. P. 3256.*
- [6] *Infrared Photodetectors, Hamamatsu Catalog No. KIPD0001E03. Ser. 94. T, Japan.*

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

Поступило в Редакцию  
19 июня 1996 г.