

06.2

Фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP для спектрального диапазона 2.5–4.9 μm

© В.В. Шерстнев, Д. Старостенко, И.А. Андреев, Г.Г. Коновалов,
Н.Д. Ильинская, О.Ю. Серебренникова, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: igor@iropt9.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 11 августа 2010 г.

Созданы фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAs_{0.94}Sb_{0.06}/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP/InAs с диаметрами фоточувствительной площадки 0.3 mm, работающие при комнатной температуре в среднем ИК-диапазоне спектра 2.5–4.9 μm . Отличительной особенностью фотодиодов является токовая монохроматическая чувствительность в максимуме спектра ($\lambda_{\text{max}} = 4.0\text{--}4.6 \mu\text{m}$), достигающая значений 0.6–0.8 A/W, значение плотности обратных темновых токов $(1.3\text{--}7.5) \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ при напряжении обратного смещения 0.2 V. Дифференциальное сопротивление в нуле смещения достигает величины 700–800 Ω . По нашим оценкам, обнаружительная способность фотодиодов в максимуме спектральной чувствительности составляет $(5\text{--}8) \cdot 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$.

Фотодиоды для спектрального диапазона 2–5 μm могут использоваться для задач экологического мониторинга, газового анализа, для контроля продуктов горения и взрыва, для анализа продуктов питания и биологических объектов, в датчиках для измерения температуры, в системах слежения специального применения, в медицине.

По мере развития производства экологический мониторинг становится одним из важнейших направлений охраны окружающей среды. Такая проблема включает в себя различные задачи спектрального анализа атмосферы в диапазоне длин волн 2–5 μm , в котором существует множество линий поглощения воды, промышленных газов и других веществ, вредных для организма человека. Например, в среднем ИК-диапазоне находятся линии поглощения таких газов, как этилен, метан, ацетон, сернистый ангидрид, окись углерода, двуокись углерода

и т.д. Для медицинской диагностики человека, контроля выдыхаемых им газов медицине остро необходимы датчики CO_2 ($4.25 \mu\text{m}$) и CO ($4.7 \mu\text{m}$). В таких датчиках одним из основных элементов является фотоприемник, способный работать на данных длинах волн.

Твердые растворы InAsSb , перспективные для создания фотодиодов в данном спектральном диапазоне, могут выращиваться на подложках GaSb или InAs . Гетерофотодиоды со структурой $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{GaSb}$ ($0.10 < x < 0.14$) были созданы ранее [1]. При освещении через подложку $\text{InAs}_{0.86}\text{Sb}_{0.14}/\text{GaSb}$ фотодиоды продемонстрировали диапазон спектральной чувствительности $1.7\text{--}4.2 \mu\text{m}$. Фотодиоды с чувствительностью до $4.8 \mu\text{m}$ были созданы также на основе гетероструктуры $\text{GaSb}/\text{InGaAsSb}/\text{AlGaAsSb}$ [2]. Общим недостатком этих фотодиодов являлось низкое значение темнового сопротивления в нуле смещения R_0 — десятки Ω и, как следствие, малая величина обнаружительной способности фотодиодов.

Твердый раствор $\text{InAsSb}/\text{InAs}$ имеет большой потенциал для развития длинноволновых детекторов, работающих в диапазоне длин волн $2\text{--}5 \mu\text{m}$. Наиболее значительные успехи в создании фотодиодов для спектрального диапазона $2\text{--}5 \mu\text{m}$ продемонстрированы авторами [3–5]. В работе [3] используются гетероструктура $\text{InAs}/\text{InAsSb}_{0.08}/\text{InAsSbP}$ и флип-чип конструкция приемника излучения с засветкой через подложку InAs . Используемый в активной области твердый раствор InAsSb и освещение через вырожденную подложку позволили получить фотодиод с диапазоном спектральной чувствительности $2.6\text{--}4.6 \mu\text{m}$ и максимумом в $3.8\text{--}4.0 \mu\text{m}$. Высокая токовая монохроматическая чувствительность позволила достигнуть значений обнаружительной способности $2.8 \cdot 10^9 \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ на длине волны $4.3 \mu\text{m}$. Еще более длинноволновый фотодиод продемонстрирован на сайте [4]. Максимум спектральной чувствительности фотодиода приходится здесь на $4.55 \mu\text{m}$, а длинноволновая отсечка составляет $5.1 \mu\text{m}$. Надо отметить, что описанные фотодиоды обладали значениями токовой чувствительности $0.4\text{--}0.6 \text{ A/W}$ и значениями дифференциального сопротивления в нуле смещения $10\text{--}15 \Omega$. Обнаружительная способность фотодиодов достигала значения $5 \cdot 10^9 \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ на длине волны $4.55 \mu\text{m}$. Следует отметить, что этот результат обусловлен в значительной степени использованием иммерсионной линзы с диаметром 3.3 mm и отражательными свойствами тыльного контакта.

В настоящей работе мы сообщаем результаты исследований, направленных на создание высокоэффективных фотодиодов, работающих при комнатной температуре в среднем ИК-диапазоне $2-5 \mu\text{m}$. Отличительной особенностью нашего фотодиода является введение промежуточного буферного слоя $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$ между подложкой InAs и активной областью $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ для уменьшения количества дислокаций несоответствия между областями фотодиода с различными величинами постоянной решетки.

Для решения поставленной задачи были выращены фотодиодные гетероструктуры методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложках InAs . Структуры состоят из подложки InAs (100) с проводимостью n -типа ($n \sim 2 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$), на которой последовательно выращивался широкозонный эмиттерный слой InAsSbP толщиной $2.5 \mu\text{m}$. Далее наращивались активная область $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ толщиной $3.5 \mu\text{m}$ и широкозонный эмиттерный слой из твердого раствора InAsSbP толщиной $2.5 \mu\text{m}$. Для согласования постоянной решетки между этими слоями и подложкой был выращен слой $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$ толщиной $5 \mu\text{m}$. Сверху структуры в целях повышения качества омического контакта был выращен подконтактный слой InAs толщиной $0.3 \mu\text{m}$. Активный слой $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ преднамеренно не легировался, концентрация носителей в нем составила величину $n \sim 1 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$ [6,7]. Широкозонный эмиттерный слой InAsSbP и слой $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.06}$ легировались Si до концентрации $N = 5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$, P -типа широкозонный эмиттерный InAsSbP и контактный слой легировались цинком до концентрации $P = 2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ соответственно. Энергетическая диаграмма структуры приведена на рис. 1.

Фотодиодные чипы размером $500 \times 500 \mu\text{m}$ и диаметром фоточувствительной площадки $300 \mu\text{m}$ (вставка к рис.1) изготавливались методом стандартной фотолитографии с использованием химического травления. Омический контакт фотоприемника к эпитаксиальному слою создавался методом взрывной фотолитографии и методом вакуумного термического напыления Cr-Au-Ni-Au . Верхний контакт представляет собой круг диаметром $30 \mu\text{m}$. Дополнительно толщина контактного слоя золота увеличивалась до $\sim 2 \mu\text{m}$ электрохимическим осаждением. Со стороны подложки наносился сплошной многослойный Cr-Au-Ni-Au контакт методом вакуумного термического напыления. После создания контактов структура подвергалась термообработке в среде водорода для получения омического контакта. Чипы фотодио-

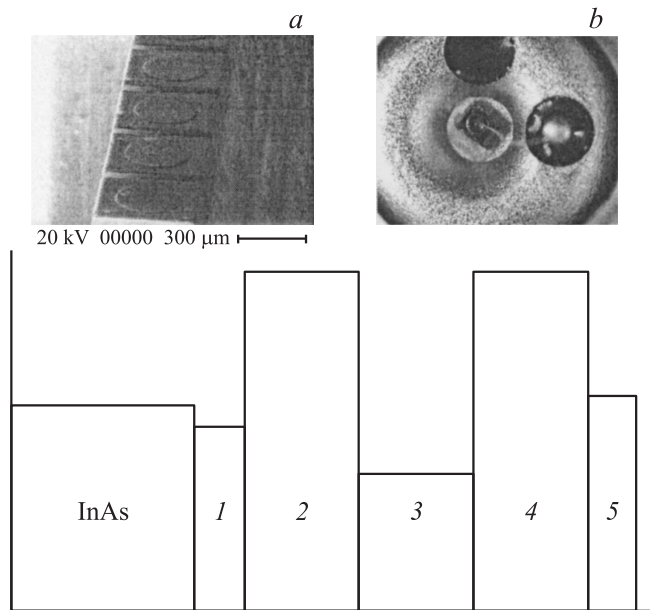


Рис. 1. Энергетическая диаграмма фотодиодных структур: 1 — $n\text{-InAs}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}$, $h = 5 \mu\text{m}$, 2 — $N\text{-InAsSbP}_{0.30}$, $h = 2.5 \mu\text{m}$, 3 — $n\text{-InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$, $h = 3.5 \mu\text{m}$, 4 — $P\text{-InAsSbP}_{0.30}$, $h = 2.5 \mu\text{m}$, 5 — $P^+\text{-InAs}$, $h = 0.3 \mu\text{m}$. На вставке микрофотографии фотодиодного чипа (a) и фотодиода, смонтированного на корпус ТО 18 (b).

дов спаивались на корпус ТО18. Фотографии собранных фотодиодов приведены на вставке b к рис. 1. Для повышения эффективности сбора излучения корпус ТО18 фотодиода помещался в параболический отражатель.

Была собрана и измерена серия фотодиодов, все они имели диодные характеристики (рис. 2) с напряжением отсечки $\sim 0.2 \text{ V}$ при $T = 300 \text{ K}$ и дифференциальным сопротивлением в нуле смещения $150\text{--}700 \Omega$, значение плотности обратных темновых токов $(1.3\text{--}7.5) \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$, при напряжении обратного смещения -0.2 V .

Для изучения спектров фотодиодов использовался монохроматор SPM2 (Carl Zeiss). Измерения проводились по схеме синхронного

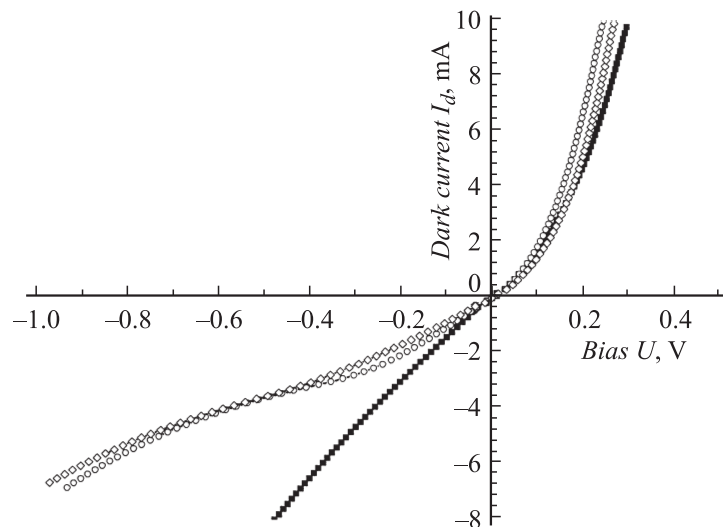


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики трех типичных образцов фотодиодных гетероструктур $\text{InAs/InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAsSbP/InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$.

детектирования с использованием прибора Stanford Research SR830. На рис. 3 показаны спектры распределения фоточувствительности диодов при температурах $T = 77$ и 300 К. Как видно из рисунка, диапазон чувствительности по уровню 10% от максимума лежит между 2.5 и $4.9 \mu\text{m}$. Отсечка длинноволновой чувствительности находится на уровне $4.9 \mu\text{m}$. На спектре присутствуют два провала, обусловленных поглощением излучения углекислым газом ($4.25 \mu\text{m}$) и слоем арсенида индия (менее $3.6 \mu\text{m}$). Пик чувствительности располагается на длине волны $4.4\text{--}4.5 \mu\text{m}$. Наши измерения показали, что токовая монохроматическая чувствительность фотодиодов в максимуме спектра ($\lambda_{\text{max}} = 4.0\text{--}4.6 \mu\text{m}$) достигает значений $0.6\text{--}0.8 \text{ A/W}$, что соответствует квантовой эффективности $15\text{--}20\%$. По нашим оценкам, обнаружительная способность фотодиодов в максимуме спектральной чувствительности с учетом токовой монохроматической чувствительности и величиной шумов, обусловленных дробовыми шумами сопротивления в $200\text{--}500 \Omega$, достигает значений $(5\text{--}8) \cdot 10^8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$.

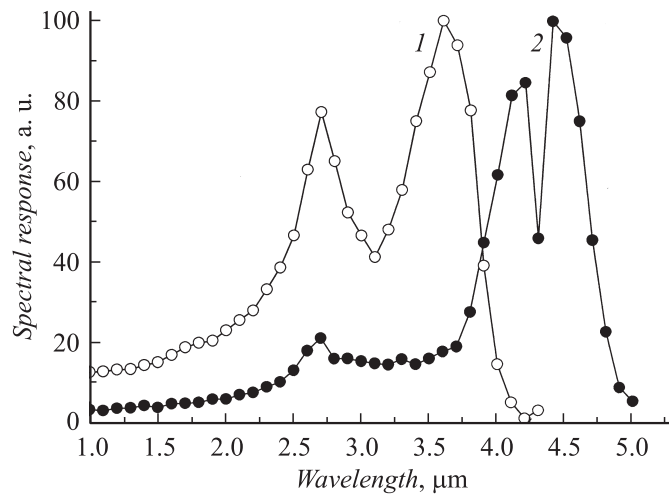


Рис. 3. Спектр фотоответа $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAsSbP}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$ гетерофотодиода при температуре $T = 77\text{ K}$ (1) и 300 K (2).

Таким образом, созданы фотодиоды на основе гетероструктур $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAsSbP}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$ с диаметрами фоточувствительной площадки 0.3 mm , работающие при комнатной температуре в среднем ИК-диапазоне $2.5\text{--}4.9\text{ }\mu\text{m}$. Гетероструктуры с активным слоем $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ выращивались методом ЖФЭ на подложках InAs . Для уменьшения количества дислокаций несоответствия между областями фотодиода с различными величинами постоянной решетки (подложки и активного слоя) введен буферный слой из твердого раствора $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$. В качестве широкозонного „окна“ использовался твердый раствор InAsSbP . Достигнута токовая монохроматическая чувствительность в максимуме спектра ($\lambda_{\text{max}} = 4.0\text{--}4.6\text{ }\mu\text{m}$) величиной $0.6\text{--}0.8\text{ A/W}$, значение плотности обратных темновых токов $(1.3\text{--}7.5) \cdot 10^{-2}\text{ A/cm}^2$ при напряжении обратного смещения -0.2 V . Дифференциальное сопротивление в нуле смещения достигает величины $700\text{--}800\text{ }\Omega$. Обнаружительная способность фотодиодов в максимуме спектральной чувствительности достигает величины $(5\text{--}8) \cdot 10^8\text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$.

Авторы выражают благодарность Е.А. Егоренко за монтаж чипов фотодиодов.

Работа частично поддержана программой президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ грантами РФФИ 10-02-93110-НЦНИЛ_а, 10-02-00548-а и 09-08-91224-СТ_а.

Список литературы

- [1] *Andreev I.A., Baranov A.N., Mikhailova M.P.* et al. // *Sov. Tech. Phys. Lett.* 1992. V. 18. N 9. P. 567–568.
- [2] *Журтанов Б., Ильинская Н.Д., Именков А.Н.* и др. // *ФТП.* 2008. Т. 42. В. 4. С. 468–472.
- [3] *Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д.* и др. // *ФТП.* 2009. Т. 43. В. 3. С. 412–417.
- [4] *Фотодиод PD45Sc* на сайте www.mirdog.spb.ru.
- [5] *Gao H.H., Krier A., Sherstnev V.V.* // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 77. N 6. P. 872–874.
- [6] *Voronina T.I., Logunova T.S., Moiseev K.D.* et al. // *Semiconductors.* 1999. V. 33. N 7. P. 719–725.
- [7] *Gao H.H., Krier A., Sherstnev V.V.* // *J. Appl. Phys.* 1999. V. 85. N 12. P. 8419–8422.