

Фотодиоды на основе InAsSbP для длин волн 2.6–2.8 μm

© Н.Д. Ильинская,¹ С.А. Карандашев,¹ А.А. Лавров,^{1,2} Б.А. Матвеев,¹ М.А. Ременный,¹
Н.М. Стусь,^{1,2} А.А. Усикова¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² ООО „ИоффеЛЕД“,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ioffeled@mail.ru

(Поступило в Редакцию 1 июня 2017г.)

Приведены результаты исследований фотоэлектрических, вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик фотодиодов (ФД) на основе гетероструктур InAsSbP/InAs, работающих при комнатной температуре и чувствительных в диапазоне длин волн 2.6–2.8 μm . Полученные характеристики ФД и анализ литературных данных позволяют судить о перспективности использования таких фотоприемников в ряде практических приложений.

DOI: 10.21883/JTF.2018.02.45414.2371

Оптоэлектронные пары, работающие в диапазоне длин волн 2.6–3 μm , представляют интерес в связи с возможностью создания на их основе абсорбционных анализаторов для определения содержания в атмосфере паров воды, углекислого газа и некоторых токсичных и взрывоопасных газов, например, таких как ацетилен и сероводород [1]. Первые светодиоды (СД) в указанном диапазоне длин волн были изготовлены на основе тройного твердого раствора InGaAs, полученного на подложке InAs [2], впоследствии исследователи сосредоточили свои усилия в основном на изучении согласованных по периоду решетки структур на основе четверных твердых растворов InAsSbP [3,4] и InGaAsSb [5,6], полученных на подложках InAs и GaSb соответственно. Работы по использованию твердого раствора InAsSbP для создания средневолновых фотодиодов (ФД) начались в 1988 г. [7,8], однако, как и в случае со СД, количество опубликованных работ по-прежнему невелико. Отчасти это объясняется невысокой прозрачностью в требуемом диапазоне спектра стандартных коммерчески выпускаемых подложек InAs, используемых для роста структур InAsSbP/InAs. Это создает трудности для создания наиболее востребованных на практике флип-чип диодов с выводом/вводом излучения через подложку. Близость p – n -перехода к теплоотводу и возможность иммерсионной стыковки с линзами существенно повышают эффективность и привлекательность использования флип-чип диодов в аналитической аппаратуре. Применение сильнолегированных подложек n^+ -InAs с вырождением электронов в зоне проводимости [9] частично решает проблему вывода/ввода излучения во флип-чип диодах на основе InAsSbP [4], однако энергия фотона в максимуме спектральной кривой в опубликованных флип-чип ФД не превышала 430 meV ($\lambda \geq 2.9 \mu\text{m}$, 300 К).

В настоящей работе мы сообщаем о получении и исследовании основных свойств ФД на основе

InAs_{1-x-y}Sb_xP_y с максимумом спектральной кривой при $\lambda = 2.6\text{--}2.8 \mu\text{m}$ (300 К).

Узкозонный слой n -InAsSbP толщиной 4–5 μm ($N = 10^{17} \text{cm}^{-3}$) и контактный слой P -InAsSbP (Zn) толщиной 1.5–2 μm ($P = 10^{17} \text{cm}^{-3}$) получали методом жидкофазной эпитаксии на подложках, ориентированных в плоскости (100) и легированных оловом ($n^+ = (2\text{--}3) \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$). Поглощающие слои в разных образцах имели различающийся состав твердого раствора и, соответственно отличные друг от друга спектральные характеристики. При этом ширина запрещенной зоны слоя p -типа (E_g) была на $\approx 20 \text{meV}$ больше, чем в слое n -типа проводимости. Чипы ФД с широким круглым анодом и подковообразным катодом были спроектированы для „перевернутого“ монтажа и тыльного облучения (флип-чип или BSI (back-side illuminated)), как показано на рис. 1, *a* и в работе [10]. В некоторых образцах с целью минимизации неопределенности в оптической площади ФД при вычислении токовой фоточувствительности подложка почти полностью удалялась при ее химическом травлении. Исследуемый образец в этом случае представлял собой диск с размерами, близкими к размеру мезы, с точечным контактом в центре мезы (рис. 1, *b*). Некоторые измерения были проведены также и в образцах с толстой подложкой, освещаемых со стороны слоя P -типа (геометрия FSI — front surface illumination — лицевое облучение ФД); в этом случае под оптически активной областью понималась площадь поверхности чипа размером $\approx 450 \times 550 \mu\text{m}$ за вычетом площади круглого анодного контакта диаметром 200 μm (рис. 1, *c*). Наиболее распространенным случаем в наших измерениях было примерное совпадение токовой фоточувствительности, измеренной в образцах типа BSI и FSI. Анализ проблемных аспектов, возникающих при определении оптической площади в ФД с прозрачной подложкой, и соответственно физически оправданных

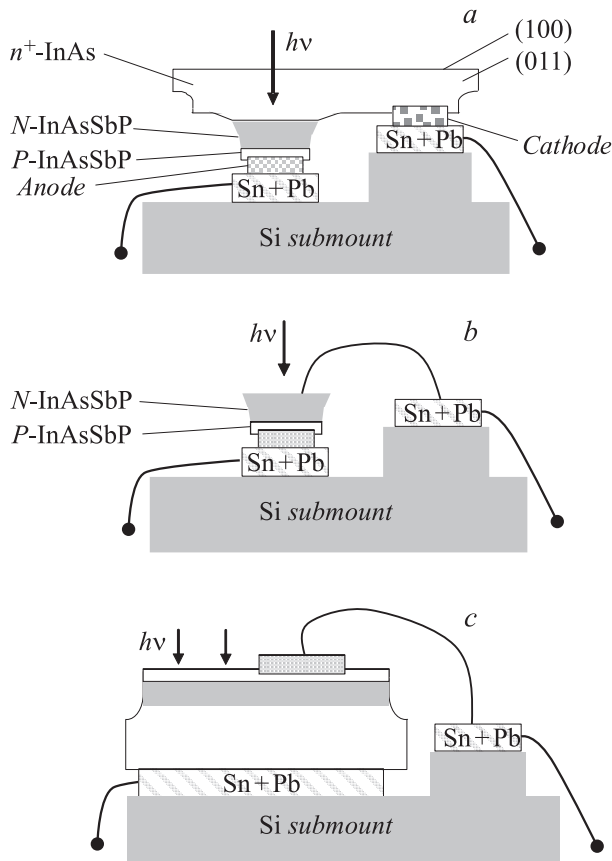


Рис. 1. Схемы сечений ФД: облучаемого с тыльной стороны (геометрия BSI) (a), с полностью удаленной подложкой (b) и облучаемого с лицевой стороны (геометрия FSI) (c).

параметров ФД, был проведен нами ранее, например, в [10,11].

Темновой ток имел хорошо выраженное насыщение в обратной ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) и экспоненциальный рост прямого тока при увеличении смещения (см. рис. 2, где приведены данные для типичного образца). При этом фактор идеальности ВАХ составлял $\beta = 1.06$ (штриховая линия на рис. 2), что указывало на доминирование диффузионного тока; значение предэкспоненциального множителя в модифицированной формуле Шокли I_0 (и соответственно плотности обратного тока) было в несколько раз меньше, чем в [8], рассматривающей близкую по составу гетероструктуру.

На рис. 3 приведена типичная вольт-фарадная ($C-V$) характеристика ФД, полученная при частоте модуляции 2 МГц при 300 К. Видно, что характеристика спрямляется в координатах $(C^{-3})-V$, демонстрируя линейность распределения примеси в области слоя пространственного заряда. Удельная емкость при напряжении -1 В ($4 \cdot 10^{-8}\text{ Ф} \cdot \text{см}^{-2}$) оказалась близкой к значению для диода на основе InAsSbP диаметром $90\ \mu\text{m}$ ($4 \cdot 10^{-8}\text{ Ф} \cdot \text{см}^{-2}$), предназначенного для регистрации и передачи сигналов со скоростью 140 Мбит/с [8]. При этом ожидаемая постоянная времени RC-цепочки для

ФД диаметром $208\ \mu\text{m}$ при использовании стандартного нагрузочного сопротивления $50\ \Omega$ составила 0.7 нс.

При комнатной температуре нескорректированный на поглощение парами воды и CO_2 спектр электролюминесценции (ЭЛ), выходящей через подложку $n^+\text{-InAs}$ толщиной $60\text{--}70\ \mu\text{m}$ из гетероструктуры $P\text{-InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.13}\text{P}_{0.25}/N\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.14}\text{P}_{0.23}/n^+\text{-InAs}$, имел максимум при энергии фотона 450 meV , что близко к значению ширины запрещенной зоны в активной области n -типа проводимости, полученной интерполяцией: $E_g^{300\text{ K}} = 444\text{ meV}$ (данные, представленные круглыми точками BSI на рис. 4). Максимум спектра фотоответа при тех же условиях (толстая линия BSI) располагался в более коротковолновой области спектра при $h\nu = 460\text{ meV}$ (заметим в скобках, что небольшое плато в области высоких энергий фотона/низкой фоточувствительности связано, вероятней всего, с боковой засветкой ФД и поэтому не учитывается в нашем рассмотрении).

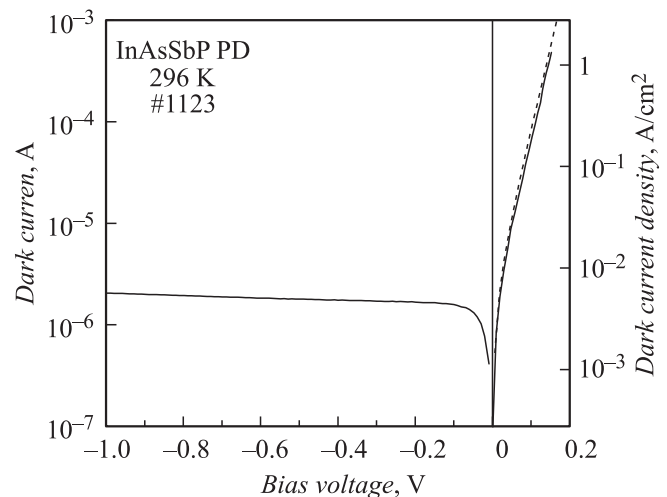


Рис. 2. ВАХ ФД при комнатной температуре. Штриховая линия — функция $I = I_0(\exp(eV/bkT) - 1)$, где e — заряд электрона, V — приложенное смещение, k — постоянная Больцмана, T — температура, β — фактор идеальности ВАХ, I_0 — константа.

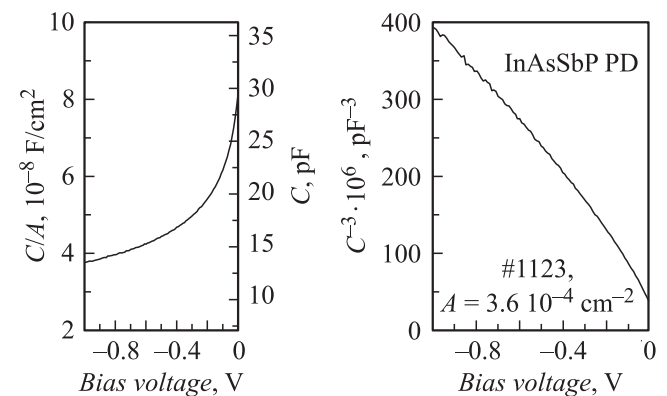


Рис. 3. Вольт-фарадная характеристика ФД при комнатной температуре и частоте модуляции 2 МГц.

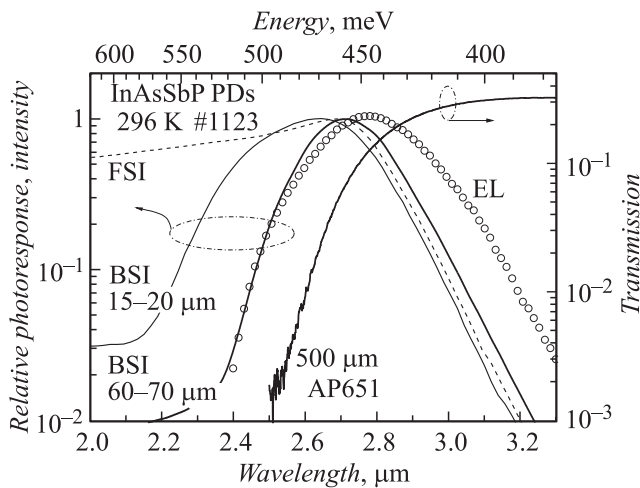


Рис. 4. Спектральные зависимости относительной фоточувствительности ФД с подложкой толщиной 400 (FSI), 60–70 и 15–20 μm (BSI), а также спектр электролюминесценции ФД (левая шкала) и пропускания подложки толщиной 500 μm (правая шкала).

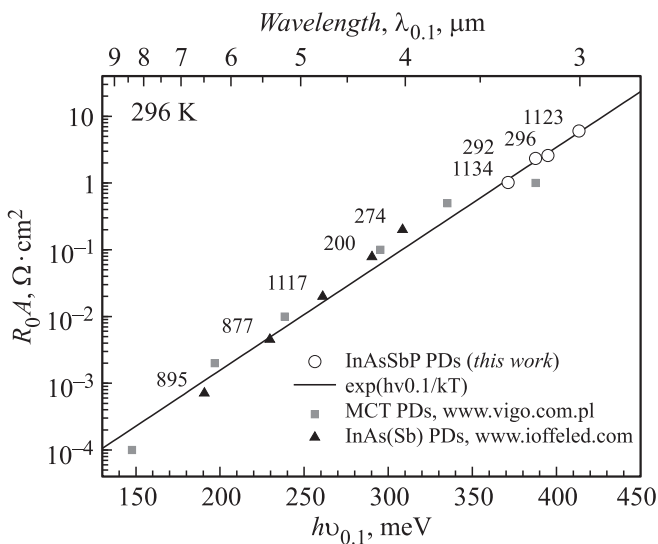


Рис. 5. Зависимость произведения сопротивления в нуле смещения на площадь диодов при комнатной температуре в настоящей работе и из литературных данных от энергии длинноволнового края фоточувствительности.

Фотоответ ФД при облучении с лицевой стороны (FSI, штриховая линия) имел примерно то же, что и указанное выше значение максимума, но был расширен по сравнению с ФД типа BSI в коротковолновой части спектра за счет небольшой глубины залегания p – n -перехода ($1.5\mu\text{m}$), благодаря которой основная часть фотовозбужденных носителей в ФД типа FSI доходит до области пространственного заряда. Узость же спектральной характеристики ФД типа BSI связана прежде всего с резким падением пропускания подложки при увеличении энергии фотона (спектр пропускания подложки

толщиной $500\mu\text{m}$, приведен на рис. 4). Из последнего можно заключить, что для получения эффективных ФД в конструкции BSI следует максимально утонять подложку. Действительно, как видно из рис. 4, уменьшение толщины подложки до 15 – $20\mu\text{m}$ привело к расширению спектра фоточувствительности в область коротких длин волн. При этом увеличение чувствительности в максимуме спектра согласно нормировке спектра по длинноволновому краю составило 1.7 раза.

При варьировании состава твердого раствора N -InAsSbP в активной области ФД фоточувствительность в максимуме спектра менялась слабо, находясь в пределах от 0.9 до 1.1A/W . Гораздо более сильное влияние изменение ширины запрещенной зоны оказывало на значение динамического сопротивления в нуле смещения, что демонстрируют данные, приведенные на рис. 5, где в качестве аргумента выступает значение энергии фотона в области 90% спада фототовета (длинноволновый край, $\lambda_{0,1}$), обычно полагаемое близким к значению ширины запрещенной зоны полупроводника, используемого в ФД. Действительно, совокупность данных настоящей работы (пустые круглые точки) и литературных данных для ФД на основе материалов A_3B_5 и A_2B_6 хорошо описывается экспоненциальной зависимостью $\propto \exp(E/kT)$, где параметр E понимается, как ширина запрещенной зоны полупроводника и/или энергия длинноволнового края фоточувствительности. В нашем случае для ФД с длиной волны в максимуме чувствительности $2.7\mu\text{m}$ ($\lambda_{0,1} = 3\mu\text{m}$) обнаружительная способность составила $D_{2.7\mu\text{m}}^{*300\text{K}} = 1.7 \cdot 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, что примерно вдвое выше, чем значение аналогичного параметра для ФД на основе InGaAs [4] и более, чем в 10 раз больше, чем в ФД на основе InAsSbP с $\lambda_{0,1} = 2.9\mu\text{m}$ в [12].

Заключение

Таким образом, созданы фотодиоды на основе InAsSbP с максимумом фоточувствительности 2.6 – $2.8\mu\text{m}$, имеющие обнаружительную способность $D_{2.7\mu\text{m}}^{*300\text{K}} = 1.7 \cdot 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, превышающую опубликованные значения для аналогов. Малое значение ожидаемой постоянной времени (0.7ns) позволяет отнести разработанные ФД к разряду быстродействующих, что открывает перспективы их использования для регистрации быстропротекающих процессов и для передачи информации по оптическому каналу.

Авторы выражают благодарность А.С. Петрову (ОАО ЦНИИ „Электрон“) за полезные обсуждения.

Работа, выполненная в ООО „ИоффелеД“, поддержана проектом ФЦП „Разработка технологии получения полупроводниковых фоточувствительных материалов для матричных инфракрасных фотоприемников и тепловизоров“ (код контракта 14.576.21.0057, ID: RFMEFI57614X0057).

Список литературы

- [1] Hodgkinson J.P., Tatam R.P. // Meas. Sci. Technol. 2013. Vol. 24. P. 012004.
- [2] Malinen J., Hannula T., Zotova N.V., Karandashov S., Markov I.I., Matveev B.A., Stus' N.M., Talalakin G.N. // Proc. SPIE. 1993. Vol. 2069. P. 95–101.
- [3] Данилова Т.Н., Именков А.Н., Мусеев К.Д., Тимченко И.Н., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 10. С. 20–24.
- [4] Matveev B.A., Aydaraliev M., Zotova N.V., Karandashov S.A., P'inskaya N.D., Remennyy M.A., Stus' N.M., Talalakin G.N. // IEE Proc. J. 2003. Vol. 150. N 4. P. 356–359.
- [5] Попов А.А. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 20. С. 78–82.
- [6] Jung S., Suchalkin S., Westerfeld D., Kipshidze G., Golden E., Snyder D., Belenky G. // Semicond. Sci. Tech. 2011. Vol. 26. P. 085022.
- [7] Пенцов А.В., Слободчиков С.В., Стусь Н.М., Филаретова Г.М. // А.С. № 1 840979 // Б.И. 2014. № 32.
- [8] Garnham R.A., Learmouth M.D., Rimington J.J., Ali A.S.M., Robertson M.J., Stallard W.A. // Electron. Lett. 1988. Vol. 24. N 23. P. 1416–1417.
- [9] Комков О.С., Фирсов Д.Д., Ковалишина Е.А., Петров А.С. // Прикладная физика. 2014. Вып. 4. С. 93–96.
- [10] Закгейм А.Л., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Лавров А.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Усикова А.А., Черняков А.Е. // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 2. С. 269–275.
- [11] Матвеев Б. // Фотоника. 2015. Вып. 3. № 51. С. 152–164.
- [12] Shellenbarger Z., Mauk M., Cox J., South J., Lesko J., Sims P., Jhabvala M., Fortin M.K. // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3287. P. 138–145.