

Длинноволновые ($\lambda_{0.1} = 10 \mu\text{m}$, 296 К) инфракрасные фотоприемники на основе твердого раствора $\text{InAsSb}_{0.38}$

© Р.Э. Кунков, А.А. Климов, Н.М. Лебедева, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, А.А. Усикова

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: romunkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

В окончательной редакции 29.09.2023 г.

Принята к публикации 30.10.2023 г.

Исследованы фотоприемники на основе диодной гетероструктуры с fotocувствительной областью из твердого раствора InAsSb_x ($x = 0.38$) с длинноволновой границей fotocувствительности $\lambda_{0.1}$ около $10 \mu\text{m}$ (296 К). Исследованы зависимости плотности темновых токов и обнаружительной способности в интервале температур 200–425 К. Показано, что экспериментальные образцы характеризуются значениями плотности темновых токов около 500 A/cm^2 при комнатной температуре, обнаружительной способностью $1.2 \cdot 10^9$ и $5 \cdot 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ при комнатной температуре и 250 К соответственно и диффузионным механизмом токопротекания в интервале температур 200–350 К.

Ключевые слова: длинноволновые фотоприемники, полупроводники $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, твердые растворы InAsSb , фотодиоды.

DOI: 10.61011/OS.2023.11.57013.5109-23

Введение

Приемники инфракрасного излучения, работающие в длинноволновой области спектра ($8\text{--}14 \mu\text{m}$), являются ключевыми компонентами как тепловизионных и теплопеленгационных систем, так и газоаналитического оборудования в системах безопасности жизнедеятельности и медицинском оборудовании. Фотоприемники на основе диодных гетероструктур с активным слоем из твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ являются перспективной альтернативой как наиболее распространенным фотоприемникам на основе полупроводников Кадмий–Ртуть–Теллур (КРТ) [1,2], так и фотоприемникам из полупроводников $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ на основе сверхрешеток [3,4]. В зависимости от состава fotocувствительного слоя фотоприемники из InAsSb могут работать как в средневолновой ($3\text{--}5 \mu\text{m}$) [5], так и длинноволновой ($8\text{--}14 \mu\text{m}$) инфракрасных областях спектра [6].

Экспериментальные результаты

Эпитаксиальные структуры $\text{N-InAsSb/InAsSb/P-InAsSbP}$ были получены на подложках нелегированного $n^0\text{-InAs}$, ориентированного в плоскости (100) методом жидкофазной эпитаксии ЖФЭ и содержали буферный градиентный слой N-InAsSb толщиной $2.5\text{--}3.0 \mu\text{m}$, fotocувствительную область $\text{InAsSb}_{0.38}$ толщиной $3.0\text{--}3.2 \mu\text{m}$ и контактный слой P-InAsSbP толщиной $1.5\text{--}2 \mu\text{m}$, легированный Zn до концентрации $p \geq 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. В данной работе представлены результаты для гетероструктуры с номером № 2052. Экспериментальные образцы чипов фотоприемников были полу-

чены методами многостадийной химической фотолитографии. Образцы конструкции „флип-чип“ имели квадратную форму размером $250 \times 250 \mu\text{m}$ и круглую мезу диаметром $100 \mu\text{m}$, ограничивающую площадь fotocувствительной области. Для получения экспериментальных образцов фотоприемников производилась иммерсионная стыковка полученных чипов с линзами из германия с просветляющим покрытием диаметром 3.5 mm .

На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики (а) и плотности темновых токов (б) в интервале температур 200–425 К для образца из гетероструктуры с номером № 2052. Также на рис. 1, б нанесены результаты для образца из гетероструктуры с номером № 1511z из работы [7] (2021 г.) по разработке и исследованию фотоприемников с близким составом fotocувствительной области.

Как видно из рисунка, полученные в ходе настоящей работы гетероструктуры, характеризуются меньшими значениями плотности темновых токов при комнатной температуре и менее резкой температурной зависимостью по сравнению с предыдущими результатами, полученными в [7]. В дополнение к этому температурная зависимость плотности темновых токов хорошо аппроксимируется в интервале температур 200–350 К при помощи следующего соотношения:

$$J_0(T) \propto e^{\left(\frac{-hv_{0.1}}{kT}\right)}, \quad (1)$$

что свидетельствует о доминировании диффузионного механизма токопротекания. В данной формуле $hv_{0.1}$ — энергия длинноволновой границы fotocувствительности по уровню 0.1 от максимума, значение которой близко к

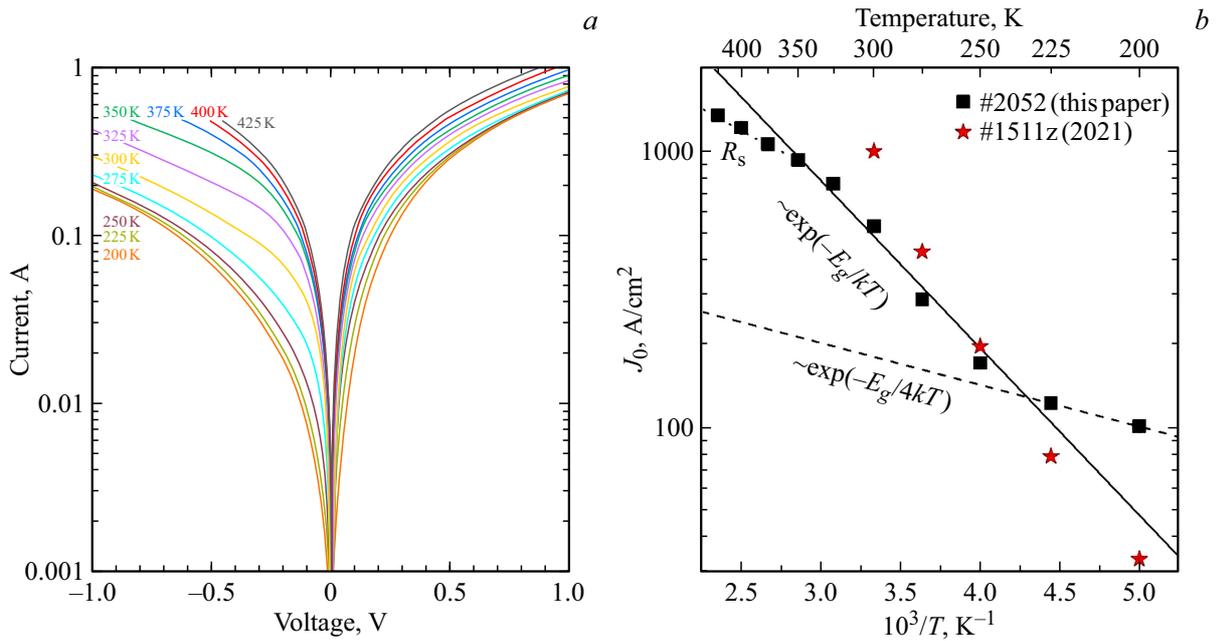


Рис. 1. Вольт-амперные зависимости в интервале температур 200–425 К (а) и зависимость плотности темновых токов от температуры (б).

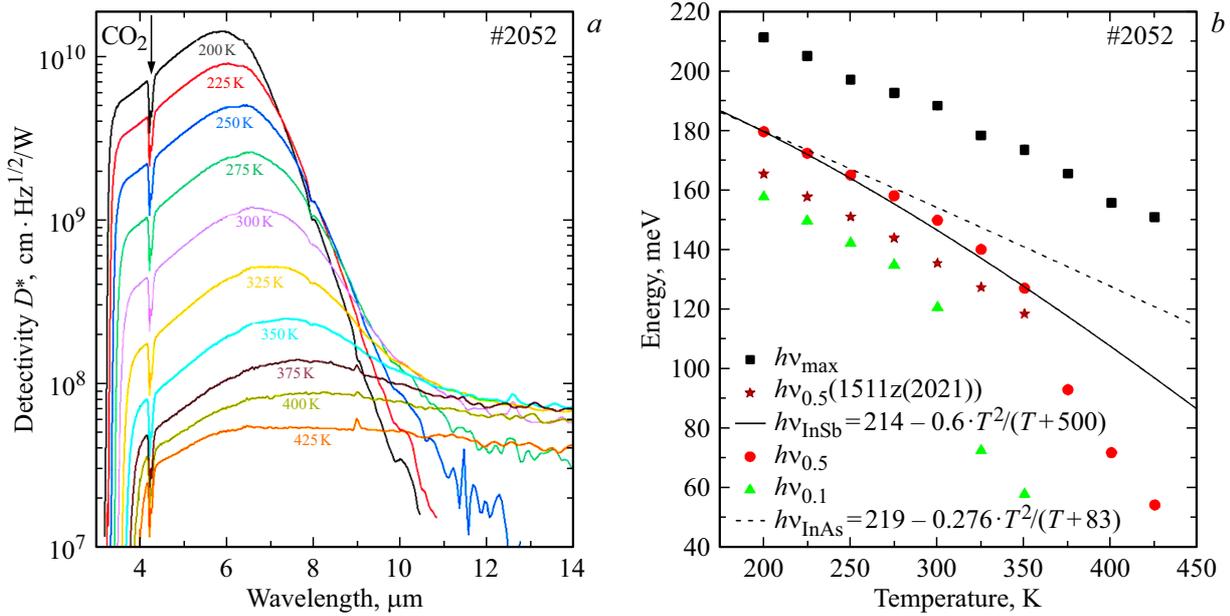


Рис. 2. Спектральная зависимость обнаружительной способности в интервале температур 200–425 К (а) и температурная зависимость энергии $h\nu$ длинноволновой границы фоточувствительности по уровням 0.5 и 0.1 от максимума (б).

ширине запрещенной зоны фоточувствительной области (E_g).

При дальнейшем понижении температуры наиболее вероятен переход к туннельному механизму токопротекания, о чем может свидетельствовать аппроксимация при помощи соотношения

$$J_0(T) \propto e^{\left(\frac{-h\nu_{0.1}}{4kT}\right)}. \quad (2)$$

Однако данный температурный диапазон выходит за рамки исследования.

На рис. 2 представлены спектры обнаружительной способности (а) и величин $h\nu_{max}$, $h\nu_{0.5}$ и $h\nu_{0.1}$ (б) в интервале температур 200–425 К. Как видно из рисунка, экспериментальные образцы характеризуются значениями обнаружительной способности около $1.2 \cdot 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ при комнатной температуре и

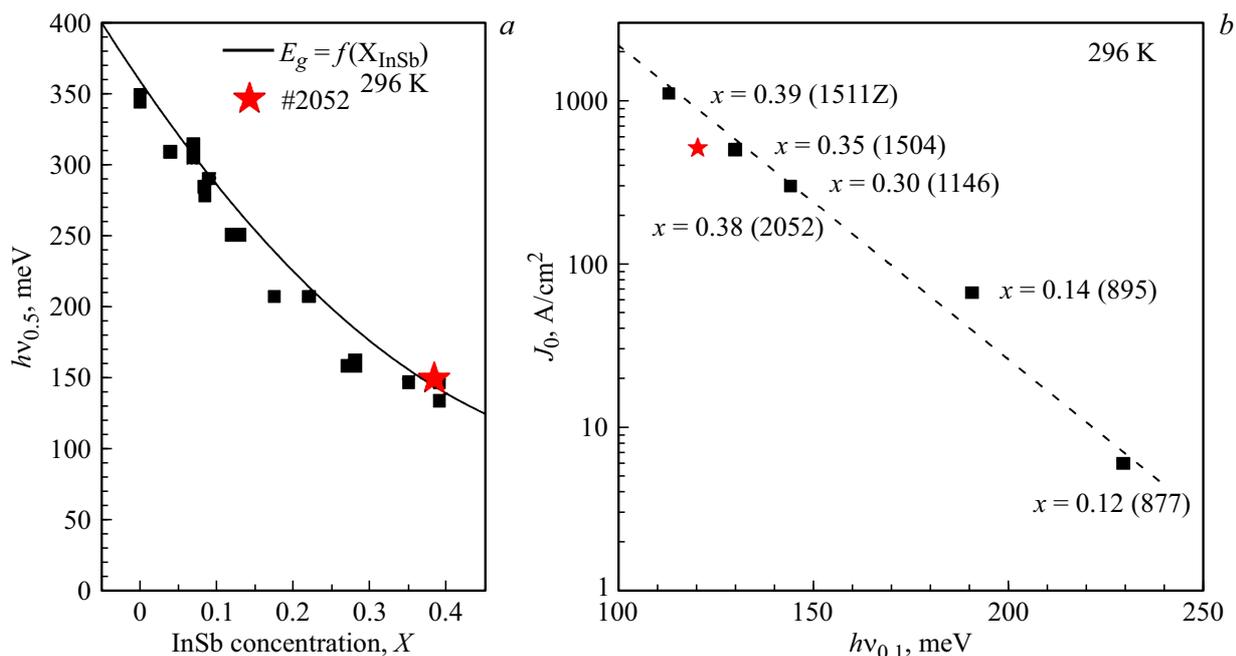


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны от состава (а) и зависимость плотности темновых токов от длинноволновой границы $h\nu_{0,1}$ (b) при 296 К в сравнении с данными из литературы: звездочки — настоящая работа, квадраты — предыдущие работы, в том числе [7], сплошная кривая (а) и штриховая прямая (b) — аппроксимации экспериментальных данных.

$5 \cdot 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ при 250 К, достижимые при помощи термоэлектрического охлаждения.

При повышении температуры выше 325–350 К наблюдается поведение длинноволновой границы, отличающееся от такового как у более коротковолновых фотодиодов, так и у близких по составу фотоприемников, описанных ранее [7]. Наиболее наглядно данное отличие иллюстрирует температурная зависимость энергии по уровню 0.5 и 0.1 от максимума фоточувствительности (рис. 2, b). Из рисунка видно значительное отклонение экспериментальных данных при повышенных температурах от аппроксимации с учетом зависимости ширины запрещенной зоны InSb от температуры [8].

На рис. 3 показано сравнение результатов данной работы с зависимостями ширины запрещенной зоны от состава и зависимостями плотностей темновых токов от длинноволновой границы фоточувствительности, взятыми из литературных источников, в том числе из наших предыдущих работ [5–7]. Полученные значения ширины запрещенной зоны при комнатной температуре согласуются с результатами прошлых работ, однако в настоящей работе наблюдается уменьшение плотности темнового тока до 2 раз [7]. Одной из вероятных причин уменьшения плотности тока является улучшение кристаллографического качества полученных слоев, в частности, уменьшение количества дислокаций несоответствия и их концентрации на границе между подложкой и широкозонным „буферным“ слоем, что приводит к уменьшению их влияния на оптические и

электрические характеристики фотоприемников на основе таких структур. Данное предположение основывается на исследовании полученных эпитаксиальных структур методом просвечивающей электронной микроскопии, результаты которого будут обсуждаться в отдельной публикации.

Заключение

Были получены экспериментальные образцы длинноволновых фотоприемников с активной областью из твердого раствора InAsSb_x ($x \approx 0.38$) с длинноволновой границей фоточувствительности $\lambda_{0,1}$ около $10 \mu\text{m}$ (300 К) и исследованы их фотоэлектрические свойства в интервале температур 200–425 К. По сравнению с результатами предыдущей работы продемонстрировано уменьшение плотности темновых токов в два раза и увеличение обнаружительной способности в полтора раза при комнатной температуре до значений $500 \text{ A}/\text{cm}^2$ и $1.2 \cdot 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ соответственно. При температуре 250 К было получено значение обнаружительной способности $5 \cdot 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, что позволяет использовать данные фотоприемники при термоэлектрическом охлаждении.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Rogalski. *Infrared Phys. Technol.*, **54** (3), 136 (2011). DOI: 10.1016/j.infrared.2010.12.003
- [2] A. Rogalski, P. Martyniuk, M. Kopytko, W. Hu. *Appl. Sci.*, **11** (2), 501 (2021). DOI: 10.3390/s23177564
- [3] D.H. Wu, A. Dehzangi, Y.Y. Zhang, M. Razeghi. *Appl. Phys. Lett.*, **112** (24), 241103 (2018). DOI: 10.1063/1.5035308
- [4] A. Rogalski, M. Kopytko, P. Martyniuk. *Antimonide-based infrared detectors* (SPIE press, Bellingham, 2018).
- [5] N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', A.A. Usikova. *Infrared Phys. Technol.*, **88**, 223(2018).
- [6] R.E. Kunkov, A.A. Klimov, N.M. Lebedeva, T.C. Lukhmyrina, B.A. Matveev, M.A. Remennyi. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1695** (1), 012077 (2020).
- [7] A.A. Klimov, R.E. Kunkov, A.A. Lavrov, N.M. Lebedeva, T.C. Lukhmyrina, B.A. Matveev, M.A. Remennyi. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1851** (1), 012019 (2021).
- [8] *New Semiconductor Materials. Biology systems. Characteristics and Properties* [Электронный ресурс]. URL: http://www.matprop.ru/InSb_bandstr