

ФОТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ InAs_{1-x}Sb_x ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 3–5 МКМ

© М. П. Михайлова, Н. М. Стусь, С. В. Слободчиков, Н. В. Зотова,
Б. А. Матвеев, Г. Н. Талалахин

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
(Получена 30 августа 1995 г. Принята к печати 3 октября 1995 г.)

Фотодиодные структуры на основе твердых растворов InAs_{1-x}Sb_x ($x = 0.12-0.14$) были выращены жидкофазной эпитаксией на подложке InAs (111) с рассогласованием решеток $\Delta a/a \leq 1\%$.

Спектральная чувствительность, вольт-амперные характеристики, дифференциальное сопротивление R_0 и детектирующая способность D^* были исследованы в температурном диапазоне 77–300 К. Шумы фотодиодов были рассчитаны и сравнены с экспериментом; показано, что генерационно-рекомбинационный шум преобладает в интервале температур 77–200 К. Достигнуто высокое значение детектирующей способности в масимуме спектра $D_\lambda^* = 3 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ при $\lambda = 3.8 \text{ мкм}$ (77 К) и $D_\lambda^* = 5 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ при $\lambda = 4.35 \text{ мкм}$ (200 К).

Фотодетекторы на основе твердых растворов, выращенных на подложках GaSb и InAs, весьма перспективны для работы в окнах прозрачности атмосферы 3–5 мкм [1–5] и 8–12 мкм [6–7]. Стойкий интерес к созданию таких фотодиодов на протяжении последних 10 лет связан с появлением эффективных источников света на основе InAsSb [8–10], что позволяет использовать спектрально-согласованные оптоэлектронные пары в системах контроля окружающей среды и газового анализа. Как известно, в диапазоне 3–5 мкм лежат полосы поглощения многих промышленных газов, таких как CO₂, CO, NO₂, NH₃, CH₄ и др. [11]. В работах [1,3–5] сообщалось о фотодетекторах на основе InAsSb, обладающих высокой обнаружительной способностью при низких температурах, однако малая ширина запрещенной зоны ($E_g \leq 0.30 \text{ эВ}$) и, соответственно, большая темновая проводимость, приводящие к резкому падению чувствительности с ростом температуры, не позволяют использовать такие фотодиоды при температурах, близких к комнатной. До сих пор в литературе практически не приводилось данных об исследовании температурной зависимости основных параметров фотодетекторов на основе InAsSb.

Настоящая работа посвящена созданию фотодиодов на основе твердых растворов InAs_{1-x}Sb_x, работающих в спектральном диапазоне 3–5 мкм и исследованию их характеристик в диапазоне температур 77–250 К.

Эпитаксиальные слои твердых растворов $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ p - и n -типа проводимости выращивались методом жидкофазной эпитаксии на подложках n - InAs (111)В с концентрацией носителей $n = (1-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $u_n = 20\,000-25\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 300 \text{ К}$. Слои p -типа проводимости в процессе эпитаксии легировались Zn . Выращивание производилось в температурном интервале $720-650^\circ\text{С}$. Для создания фотодиодов использовались градиентные слои твердых растворов с составами $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, $x = 0.04-0.14$. Ширина запрещенной зоны твердых растворов определялась по исследованию спектров фотолюминесценции.

На рис. 1 представлен типичный спектр фотолюминесценции одного из эпитаксиальных слоев $\text{InAs}_{0.86}\text{Sb}_{0.14}$. Максимум спектра при $T = 77 \text{ К}$ соответствует энергии фотона $h\nu = 308 \text{ мэВ}$, что близко к ширине запрещенной зоны для данного состава $E_g = 0.30 \text{ эВ}$ [12]. При $T = 300 \text{ К}$ максимум спектра фотолюминесценции смещается до $h\nu = 255 \text{ мэВ}$, что соответствует длине волны излучения $\lambda = 4.86 \text{ мкм}$ ($E_g = 0.26 \text{ эВ}$). Интенсивность фотолюминесценции в интервале $77-200 \text{ К}$ уменьшалась на 1.5 порядка, а смещение максимума с температурой соответствовало коэффициенту изменения ширины запрещенной зоны $\Delta E_g/\Delta T = 2.6 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$.

Несмотря на некоторое различие в постоянных решетки слоя и подложки InAs ($\Delta a/a \leq 1\%$), плотность дислокаций в полученных эпитаксиальных слоях составляла $5 \cdot 10^4-10^5 \text{ см}^{-2}$.

Фотодиодные структуры создавались в виде мезадиодов с рабочей площадкой $(2-5) \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. Поверхность структур обрабатывалась методом электрохимического травления в растворе этиленгликоля с добавлением азотной и плавиковой кислот, либо в полирующем травителе $\text{Вг}_2 : \text{С}_2\text{Н}_5\text{ОН}$ в соотношении 1 : 4. Контакты к n -области создавались пайкой In , а к p -области — напылением слоев металлов Au-Zn-Au в вакууме с последующим вплавлением в атмосфере водорода.

2. Исследование основных характеристик InAsSb фотодиодов

Были исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ), спектральная фоточувствительность, дифференциальное сопротивление R_0 , интегральная (вольтовая) чувствительность S_u и детектирующая способность D^* в температурном интервале $77-300 \text{ К}$.

Исследуемые p - n -переходы были резкими, как было установлено из измерения вольт-амперных характеристик.

На рис. 2 представлены ВАХ одного из типичных образцов InAsSb -фотодиодов при температурах 77 , 169 и 204 К . Анализ прямых ветвей ВАХ (кривые 1-3) показал, что в области температур выше 77 К ток аналитически может быть представлен зависимостью

$$I \approx \exp(-qV/nkT), \quad (1)$$

где коэффициент n растет с повышением температуры: $n = 1.4$ при $T = 169 \text{ К}$ и 1.8 при $T = 204 \text{ К}$. Это свидетельствует о росте вклада

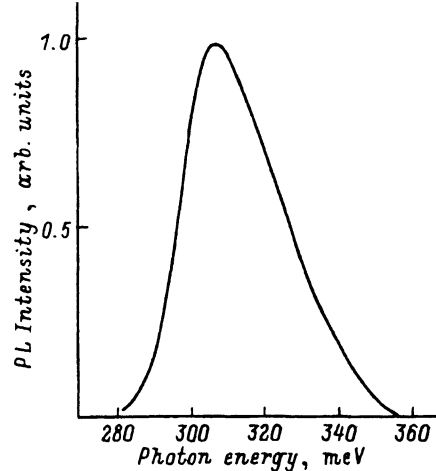


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции твердого раствора $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ $T = 77$ К.

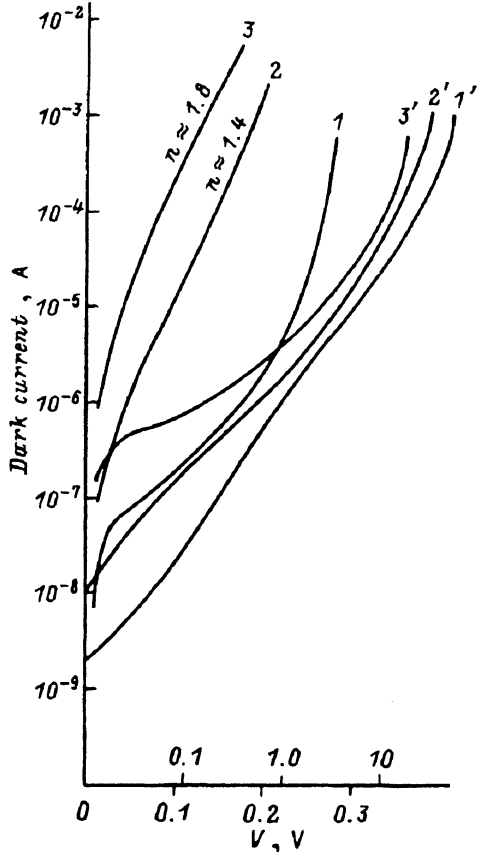


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики фотодиода $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$. 1-3 — прямые ветви ВАХ, T, K : 1 — 77, 2 — 169, 3 — 204. 1'-3' — обратные ветви ВАХ (верхняя шкала по оси абсцисс), T, K : 1' — 77, 2' — 169, 3' — 204.

генерационно-рекомбинационного тока, для которого значение показателя $n = 2$. Следует отметить слабое изменение обратного тока в области больших смещений при низких температурах (рис. 2, кривые 1-3, верхняя шкала по оси абсцисс). Это может свидетельствовать о преобладающем вкладе туннельной компоненты.

Отметим, что хотя пробой был мягким, величина напряжения пробоя, определенная при величине обратного тока $i = 1$ мА, составляла 8-12 В в исследуемых фотодиодных структурах при $T = 77$ К. В целом же роль процессов генерации и рекомбинации в слое объемного заряда исследуемых фотодиодов остается весьма существенной при нулевом и малом смещении, что подтверждается также описанными далее исследованиями шумов.

На рис. 3 представлены кривые спектральной чувствительности $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ фотодиода при трех температурах — 77, 196, 296 К. Спектры снимались на монохроматоре SPM-2 с призмой LiF и глобаром в качестве источника излучения. Регистрация спектра производилась методом синхронного детектирования. Стрелками на рис. 3 показаны полосы поглощения некоторых газов и паров, лежащих в спектральном диапазоне 3-5 мкм. Отметим, что при $T = 196$ К максимум спектра лежит в области $\lambda = 4.25-4.35$ мкм, важной для регистрации двуокси углерода. Красная граница фотоответа (10% от λ_{max}) при этом

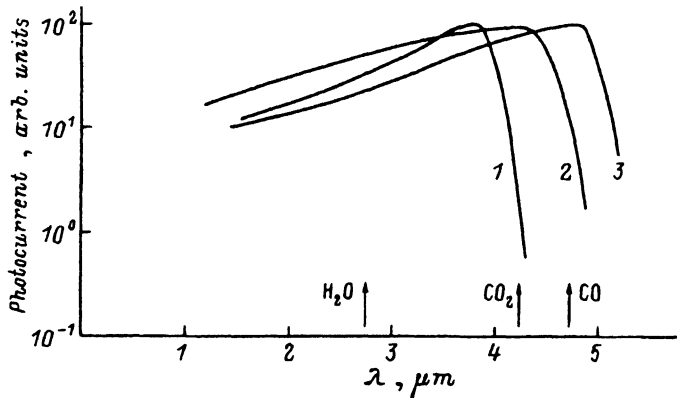


Рис. 3. Спектральные характеристики фотодиодов $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ при трех температурах: T, K : 1 — 77, 2 — 196, 3 — 296. Стрелками показано положение полос поглощения некоторых газов.

составляет $\lambda_{\text{th}} = 4.92 \text{ мкм}$. При комнатной температуре максимум фоточувствительности лежит при $\lambda = 4.85 \text{ мкм}$, а красная граница — при $\lambda_{\text{th}} = 5.10 \text{ мкм}$.

Дифференциальное сопротивление в нуле смещений $R_0 = \left. \frac{dV}{dT} \right|_{v=0}$ достигало значений $R_0 = 10^4 - 10^6 \text{ Ом}$. Отметим, что эти величины того же порядка, что были получены в [5] для фотодиодных структур $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs и Si.

На рис. 4 (кривая 1) приведена температурная зависимость R_0 в диапазоне 77–250 K для одного из InAsSb -фотодиодов. Как видно из рис. 4, в области $T = 77 - 120 \text{ K}$ R_0 слабо зависит от температуры, что свидетельствует о туннельном механизме протекания тока. При $T > 120 \text{ K}$ наблюдается резкое падение R_0 . Тем не менее в области температур 180–200 K значение $R_0 \sim 5 \cdot 10^2 - 8 \cdot 10^2 \text{ Ом}$, что позволяет использовать такие фотодиоды при термоэлектрическом охлаждении без большой потери чувствительности. На этом рисунке представлены также температурные зависимости детектирующей способности D^* и интегральной (вольтовой) чувствительности S_v (кривые 2 и 3 соответственно), экспериментально измеренные по излучению абсолютно черного тела, нагретого до 500 K.

Детектирующая способность в максимуме спектра определялась нами с учетом расчетного коэффициента использования фотоприемником излучения абсолютно черного тела [13]: $D_{\lambda}^*(\lambda_{\text{max}}, 1000, 1) = 12.4 D^*(500 \text{ K}, 1000, 1)$ для фотодиода, охлаждаемого до $T = 77 \text{ K}$, и $D_{\lambda}^* = 7 D_{500 \text{ K}}^*$ для $T = 196 \text{ K}$.

Как следует из рис. 4, в области неглубокого охлаждения величина $D_{500 \text{ K}}^* \approx 5 \cdot 10^8 - 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$, а детектирующая способность в максимуме спектра $D_{\lambda}^* = 3.5 \cdot 10^9 - 7 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$, что показывает перспективность использования таких фотоприемников при термоэлектрическом охлаждении.

В лучших наших фотодиодных структурах были получены следующие значения детектирующей способности: $D_{\lambda}^* = 3 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$

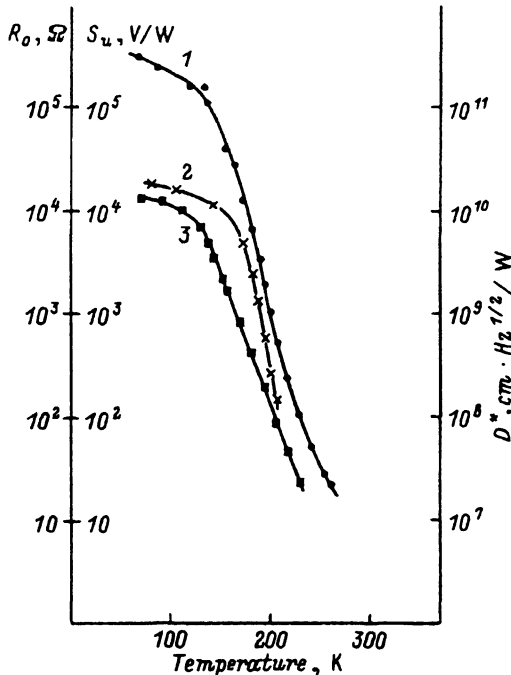


Рис. 4. Температурная зависимость дифференциального сопротивления R_0 , интегральной чувствительности S_u и детектирующей способности D^* по излучению черного тела с $T = 500$ К.

($T = 77$ К), что близко к теоретическому пределу [6], и $D_\lambda^* \sim (3-5) \times 10^9$ см \cdot Гц $^{1/2}$ /Вт ($T \sim 200$ К).

Быстродействие фотодиодов при засветке их коротковолновыми импульсами GaAs-лазера составило $\sim 10^{-6}-10^{-7}$ с при $T = 77$ К, что соответствовало излучательному времени жизни неравновесных носителей в p -области.

Для выяснения характера шумов, ограничивающих предельную чувствительность фотоприемников, нами были измерены и рассчитаны шумы InAsSb-фотодиодов. Шумы измерялись на частоте 1 кГц в полосе $\Delta f = 100$ Гц при $T = 77$ К и сравнивались с расчетными данными для тепловых и генерационно-рекомбинационных (Γ -Р) шумов, ограниченных флуктуациями фона.

Напряжение тепловых шумов рассчитывалось по известной формуле Найквиста-Джонсона

$$\bar{U}_T = \sqrt{4kTR\Delta f}. \quad (2)$$

Расчет Γ -Р шумов проводился по методике, приведенной в [14].

Согласно [14], дисперсия фотонов, поглощаемых приемником от фона при температуре T определяется как

$$\langle \Delta n^2 \rangle = \frac{2\pi Q \eta A}{c^2 \Delta t} \int_{\nu_0}^{\infty} \bar{\nu}^2 e^{-\frac{h\nu}{kT}} d\nu, \quad (3)$$

$$\int_{\bar{\nu}_0}^{\infty} \bar{\nu}^2 e^{-\frac{h\bar{\nu}}{kT}} d\bar{\nu} = \left(\frac{kT}{h}\right)^3 e^{-\frac{h\bar{\nu}_0}{kT}} \left[\left(\frac{h\bar{\nu}_0}{kT}\right)^2 + 2\left(\frac{h\bar{\nu}_0}{kT}\right) + 2 \right]. \quad (3a)$$

В (3) η — квантовая эффективность, A — размер чувствительной площадки, $\bar{\nu}_0$ — граничная частота, $Q = 1/2$ при угле зрения $\Theta = 180^\circ$, c — скорость света, h — постоянная Планка, $\Delta t = 1/2\pi\Delta f$. При выборе параметров фотодиода — $A = 2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$, $h\bar{\nu}_0 = 0.3 \text{ эВ}$ ($\lambda = 4 \text{ мкм}$), $T = 77 \text{ К}$, температура фона $T_B = 296 \text{ К}$, ширина полосы $\Delta f = 100 \text{ Гц}$ — получим $\langle \Delta n^2 \rangle = 7.3 \cdot 10^{14} (\text{квант})^2/\text{с}$. Если каждый фотон приводит к возникновению одного носителя заряда, то среднеквадратичное значение напряжения генерационно-рекомбинационного шума определится из соотношения

$$\bar{u}_{G-R} = \langle \Delta n^2 \rangle e R_0 = 6.8 \cdot 10^{-12} R_0,$$

где e — заряд электрона.

В таблице приведены полученные расчетные значения тепловых u_T и Г-Р шумов u_{G-R} , а также экспериментальные величины, измеренные при $T = 77 \text{ К}$.

Дифференциальное сопротивление и шумы InAsSb фотодиодов при $T = 77 \text{ К}$

$R_0, \text{ Ом}$	10^4	10^5	10^6
$\bar{u}_{G-R}, \text{ В}$	$4.5 \cdot 10^{-8}$	$4.5 \cdot 10^{-7}$	$4.5 \cdot 10^{-6}$
$\bar{u}_T, \text{ В}$	$6.5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2.1 \cdot 10^{-7}$
$\bar{u}_{\text{exper}}, \text{ В}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$6.3 \cdot 10^{-7}$

Как видно из таблицы, при $R_0 \sim 10^4 \text{ Ом}$ тепловой шум слегка превышает генерационно-рекомбинационный, при $R_0 \sim 10^5 \text{ Ом}$ становится заметным преобладание Г-Р шумов, а при $R_0 \sim 10^6 \text{ Ом}$ этот вид шума уже на порядок превышает величину теплового шума. Экспериментальные значения шумов измеренные при $T = 77 \text{ К}$, были близки к величине Г-Р шума.

Отметим, что при подсветке фотодиодов немодулированным инфракрасным излучением величина напряжения шумов увеличивалась, что подтверждает также ее зависимость от температуры фона. Сужение угла зрения фотоприемника понижало величину шума так, что при малом угле зрения ($\Theta \rightarrow 0$) они были близки к тепловым.

Дальнейшее улучшение параметров фотоприемников на основе InAsSb может быть достигнуто за счет понижения концентрации примесей в активной области, использования материала p -типа проводимости (большая диффузионная длина неосновных носителей), а также при использовании эффекта «окна», создаваемого с помощью накрывающего широкозонного слоя, например InAsSbP [15].

В данной работе приведены результаты создания и исследования фотодиодов на основе твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, выращенных на подложках InAs с близкими параметрами решетки. Эти фотодиоды обладают высокими значениями интегральной чувствительности и детектирующей способности $D_\lambda^* = 3 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$, близкой к теоретическому пределу при $T = 77 \text{ К}$. Достаточно высокое значение детектирующей способности сохраняется и при $T \approx 200 \text{ К}$ ($D_\lambda^* = 5 \times 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$), что позволяет использовать InAsSb -фотодетекторы при термоэлектрическом охлаждении. Все это, а также широкий спектральный диапазон чувствительности ($\lambda \approx 2\text{--}5 \text{ мкм}$) делает такие фотодетекторы перспективными для задач экологического мониторинга и газового анализа, применения в системах лазерной диодной спектроскопии, пирометрии, тепловидения.

Авторы благодарят Ю.П. Яковлева за интерес к работе и поддержку.

Список литературы

- [1] D.T. Cheung, A.M. Andrews, E.R. Gerther, G.M. Williams, J.E. Clark, J.G. Pasko, J.T. Longo. *Appl. Phys. Lett.*, **30**, 587 (1977).
- [2] Б.А. Матвеев, М.П. Михайлова, С.В. Слободчиков, Н.Н. Смирнова, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. *ФТП*, **13**, 498 (1979).
- [3] L.O. Bulubak, A.M. Andrews, E.R. Gerther, D.T. Cheung. *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 734 (1980).
- [4] J.L. Zuskind, A.K. Srivastava, J.C. De Winter, M.A. Pollak, J.W. Sulhoff. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 2898 (1987).
- [5] W. Dobbelaere, J. De Boeck, P. Heremans, R. Meretens, G. Borghs, W. Luyten, J. Van Landuyt. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 3256 (1992).
- [6] M.J. Jen, R. People, K.W. Wecht, A.J. Cho. *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 489 (1988).
- [7] S.R. Kurtz, L.R. Dawson, T.E. Zipperman, S.R. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 1581 (1988).
- [8] M. Aidaraliev, N.V. Zolova, S.A. Karandashov, B.A. Matveev, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *Phys. St. Sol. (a)*, **115**, k117 (1989).
- [9] M. Aidaraliev, N.V. Zolova, S.A. Karandashov, B.A. Matveev, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, 1575 (1993).
- [10] A.N. Baranov, A.N. Imenkov, V.V. Sherstnev, Yu.P. Yakovlev. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 248 (1994).
- [11] J.H. Park, L.S. Rothman, C.P. Rinslabd, H.M. Pickett, D.J. Richardson, J.S. Namkung. *Atlas of Absorption Lines from 0 to 17900 cm⁻¹* (NASA Reference Publication, 1987) p. 188.
- [12] J.C. Woolley, J. Warner. *Can. J. Phys.*, **46**, 1207 (1968).
- [13] Л.З. Криксунов. *Справочник по основам инфракрасной техники*. (М., Сов. радио, 1978).
- [14] Д.Э. Джэмисон, Р.Х. Мак-Фи, Дж.Н. Пласс, Р.Дж. Ричардс. *Физика и техника инфракрасного излучения*. [Пер. с англ.] (М., Сов. радио, 1965) с. 386.
- [15] И.А. Андреев, М.А. Афраилов, А.Н. Баранов, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлева. *ЖТФ*, **16**, 27 (1990).

Редактор В.В. Чалдышев

InAs_{1-x}Sb_x photodiodes for the spectral range of 3–5 μm.

M.P. Mikhailova, N.M. Stus', S.V. Slobodchikov, N.V. Zotova, B.A. Matveev, G.N. Talalakin.

A I Ioffe Physical Technical Institute, Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia.

High-performance InAs_{1-x}Sb_x photodiode structures ($x = 0.12-0.14$) have been grown near lattice-matched ($\Delta a/a \leq 1\%$) on InAs (111) substrates by liquid phase epitaxy. Spectral response, current-voltage characteristics, differential resistance, R_0 and detectivity, D^* , were studied.

Detector noises were calculated and compared with the experimental data. It was found that generation-recombination noises dominated at $T = 77-200$ K.

The peak of detectivity $D_\lambda^* = 3 \cdot 10^{11}$ cm · Hz^{1/2}/W at $\lambda = 3.8$ μm (77 K) and $D_\lambda^* = 5 \times 10^9$ cm · Hz^{1/2}/W at $\lambda = 4.35$ μm (200 K) were achieved.
