

06.2:07

## Улучшение параметров фотодиодных структур GaSb/GaInAsSb/AlGaAsSb с тонкой активной областью для спектрального диапазона 1.0–2.5 $\mu\text{m}$

© А.П. Астахова, Б.Е. Журтанов, А.Н. Именков, М.П. Михайлова, М.А. Сиповская, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
E-mail: dap@iropt4.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 2 марта 2007 г.

Исследованы фотодиодные гетероструктуры с красной границей fotocувствительности 2.5  $\mu\text{m}$  на основе GaSb/GaInAsSb/AlGaAsSb с активной областью  $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}$  различной толщины и отражающим излучение контактом на тыльной стороне структуры. Показано, что уменьшение толщины активной области и отражение излучения на тыльной стороне позволяют улучшить параметры фотодиодов и термофотовольтаических преобразователей в спектральном диапазоне 1.0–2.5  $\mu\text{m}$ . Получена обнаружительная способность  $D_\lambda^* = (3-6) \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$  и фотоэдс разомкнутой цепи  $V_{oc} = 0.2 \text{ V}$ .

PACS: 85.60.DW

**1. Введение.** Фотодиоды на основе гетероструктуры GaInAsSb/AlGaAsSb, работающие в спектральном диапазоне 1.0–2.5  $\mu\text{m}$ , находят широкое применение в системах газового анализа и охраны окружающей среды [1–3], а также перспективны для фотовольтаических преобразователей [4]. Ранее мы сообщали о широкополосных фотодиодах [5] на основе двойной гетероструктуры  $n\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ , работающих в спектральных диапазонах 1.0–2.5 и 1.0–4.8  $\mu\text{m}$ , при комнатной температуре.

В настоящей работе мы сообщаем об улучшении параметров фотодиодных структур с красной границей чувствительности до 2.5  $\mu\text{m}$  на основе GaSb– $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}$ –GaSb–AlGaAsSb с активной областью различной толщины и отражающим излучение контактом на тыльной стороне структуры.

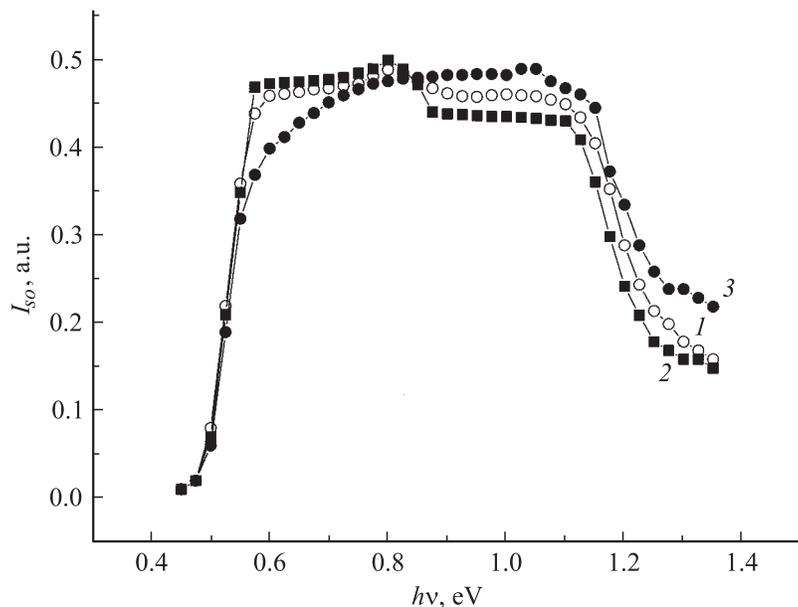
**2. Методика создания и исследования фотодиодов.** Фотодиодные структуры создавались методом жидкофазной эпитаксии на подложке  $n$ -GaSb (100) и последовательным выращиванием рабочих слоев  $n$ -Ga<sub>0.76</sub>In<sub>0.24</sub>As<sub>0.22</sub>Sb<sub>0.78</sub>,  $p$ -GaSb,  $p$ -Al<sub>0.34</sub>Ga<sub>0.66</sub>AsSb и подконтактного слоя  $p$ -GaSb. Наличие промежуточного слоя  $p$ -GaSb отличало выращенную структуру от ранее исследованных в работе [5].

Толщины рабочих слоев варьировались в широких пределах: толщина узкозонного слоя  $n$ -GaInAsSb менялась от 1 до 3.5  $\mu\text{m}$ , промежуточного слоя  $p$ -GaSb — от 0.5 до 1.5  $\mu\text{m}$ , оптического широкозонного „окна“ AlGaAsSb от 1 до 2  $\mu\text{m}$ . Подконтактный слой  $p$ -GaSb имел толщину 0.5  $\mu\text{m}$ . Вне омического контакта к  $p$ -области он удалялся.

Из выращенных структур изготавливались мезафотодиоды с фоточувствительной площадкой 0.4  $\text{mm}^2$ , смонтированные на кристаллодержателях ТО-18 с плоским столиком. Антиотражающее покрытие не использовалось во избежание искажения спектра фоточувствительности. Омический контакт на лицевой освещаемой стороне имел площадь 0.04  $\text{mm}^2$ , на задней стороне был сплошным, отражающим излучение, падающее на него со стороны кристалла [6].

В данной работе нами исследовались спектры фототока созданных фотодиодов, спектры люминесцентного излучения, вольт-амперные характеристики, а также фототок и фотоэдс при импульсном освещении галогенной лампой с частотой 100 Hz и скважностью 60. Измерения проводились при температуре фотодиода 300 K.

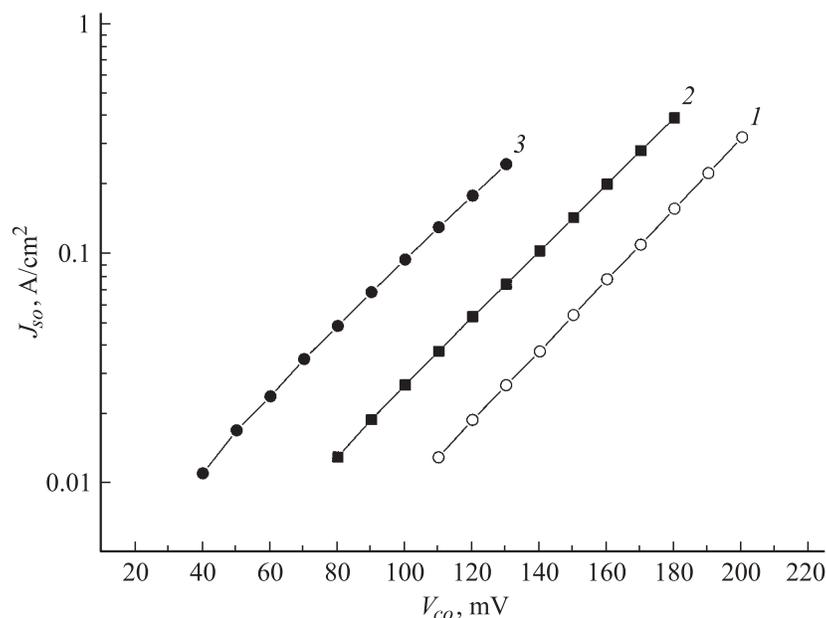
**3. Результаты эксперимента.** Как видно из рис. 1, спектры фототока были широкополосными. Длинноволновая и коротковолновая границы чувствительности на уровне 0.5 от максимальной фоточувствительности были расположены при энергиях фотона 0.53 и 1.24 eV и связаны с краями спектров поглощения узкозонного слоя и оптического окна. Максимальная квантовая фоточувствительность составляет 0.4–0.5 электрона на фотон. За пределами длинноволновой границы она падает практически до нуля при уменьшении энергии фотона уже до 0.45 eV, тогда как за пределами коротковолновой границы фоточувствительность составляет 0.1–0.15 электрона на фотон. Это связано с поглощением излучения в области оптического окна. Промежуточный слой GaSb гораздо более фотоактивен и обеспечивает высокую фоточувствительность до 0.9 от максимальной в интервале энергий фотона 0.45–0.76 eV. В этом интервале она достигает максимальной величины около 0.5 электрона на фотон для фотодиодных структур с толщиной



**Рис. 1.** Спектры фототока  $I_{so}$  фотодиода  $n\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$  при различных толщинах узкозонного слоя,  $\mu\text{m}$ : 1 — 1, 2 — 1.6, 3 — 3.5.  $T = 300\text{ K}$ .

узкозонного слоя 1.0–1.6  $\mu\text{m}$  (рис. 1, кривые 1 и 2). При толщине узкозонного слоя 3.5  $\mu\text{m}$  такая же фоточувствительность достигается при энергии фотона 1 eV (рис. 1, кривая 3). Коротковолновый край фоточувствительности в фотодиодных структурах с малой толщиной узкозонного слоя круче, чем с большой. Это обусловлено вкладом рециркуляции излучения за счет отражения от омического контакта, нанесенного на тыльную сторону структуры.

Исследовались также спектры электролюминесценции при пропускании через фотодиод прямого тока от 10 до 100 mA. Наблюдалась одна полоса излучения с энергией фотонов в максимуме полосы, возрастающей от 0.51 до 0.53 eV с увеличением толщины узкозонного слоя от 1 до 3.5  $\mu\text{m}$ . Полуширина спектра лежала в пределах 53–59 meV. Форма полосы соответствует межзонной рекомбинации дырок, инжектированных в узкозонный слой  $n\text{-GaInAsSb}$  из промежуточного слоя  $p\text{-GaSb}$ . Ширина запрещенной зоны активной области GaInAsSb,



**Рис. 2.** Зависимость плотности фототока  $J_{sc}$  от фотоэдс  $V_{oc}$  при различных толщинах узкозонного слоя GaInAsSb,  $\mu\text{m}$ : 1 — 1, 2 — 1.6, 3 — 3.5.

определенная из спектров излучения, составляет 0.49 eV при толщине слоя  $1\mu\text{m}$  и возрастает до 0.51 eV с увеличением толщины слоя до  $3.5\mu\text{m}$ . По ширине спектра излучения была оценена концентрация электронов в узкозонной области  $(2 - 8) \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ .

Фототок короткого замыкания  $I_{sc}$  связан с фотоэдс разомкнутой цепи  $V_{oc}$  при фиксированной освещенности логарифмической зависимостью (рис. 2) при фотоэдс  $V_{oc} \gg kT/q$ , где  $kT$  — квант тепловой энергии, а  $q$  — заряд электрона. Фотоэдс тем больше, чем меньше толщина узкозонного слоя.  $V_{oc}$  достигает 0.2 V при освещенности  $2 \cdot 10^{19}$  фотон/ $\text{cm}^2$  от глобара с температурой 1200 K. При этом плотность фототока  $J_{sc} = 0.33 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  при толщине активной области  $1\mu\text{m}$ . Плотность насыщения темнового тока  $J_0$ , определенная из зависимости  $I_{sc}$  от  $V_{oc}$ , в этих фотодиодах также минимальна  $J_0 = 2.6 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Наблюдался также сверхлинейный рост  $J_0$  с увеличением толщины активной области, возможно, вызванный уменьшением содержания атомов As по мере роста узкозонного слоя. Из

**Таблица 1.** Параметры GaSb/GaIn<sub>0.24</sub>AsSb/AlGaAsSb фотодиодных структур с различной толщиной узкозонного слоя и отражающим контактом на тыльной стороне ( $T = 300$  К)

	Толщина узкозонной области $d$	$\mu\text{m}$	1	1.6	3.5
Детектирование	Энергия фотона в максимуме чувствительности $h\nu_\lambda$	eV	0.6	0.6	0.6
	Чувствительность $R_\lambda$	A/W	0.77	0.78	0.68
	Плотность темнового тока $J_0$	A/cm <sup>2</sup>	0.00026	0.001	0.0044
	Сопротивление в нуле смещения $R_0$	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	100	26	5.9
	Обнаружительная способность $D_\lambda^*$	$\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$	$6 \cdot 10^{10}$	$3.1 \cdot 10^{10}$	$1.3 \cdot 10^{10}$
Преобразование	Максимальная квантовая эффективность $\eta_{\text{max}}$		0.49	0.5	0.48
	Диапазон энергий фотона $h\nu_{\text{max}}$	eV	0.53–1.23	0.53–1.22	0.53–1.26
	Плотность фототока $J_{s0}$	A/cm <sup>2</sup>	0.33	0.4	0.25
	Фотоэдс $V_{oc}$	V	0.2	0.18	0.13

темновых вольт-амперных характеристик получают такие же значения плотности тока насыщения.

Проведенные исследования и наши оценки показывают, что оптимальная толщина узкозонного активного слоя для термоэлектрических преобразователей и фотодиодов (детекторов излучения) должна быть разная, поскольку наибольшая квантовая чувствительность ( $\eta$ ) получается при толщине узкозонного слоя  $d = 1.6 \mu\text{m}$  (табл. 1), а наименьший темновой ток  $J_0$  и соответственно наибольшая обнаружительная способность  $D_\lambda^*$  (табл. 1) при толщине  $d = 1 \mu\text{m}$ .

Нами были проведены теоретические оценки квантовой фоточувствительности.

**4. Теоретические вычисления.** Нами были выведены формулы для квантовой фоточувствительности в случае зеркального отражающего  $\eta_m$  металлического контакта на тыльной стороне структуры и в случае поглощающего слоя  $\eta_\alpha$ , а также формула для плотности темного тока  $J_0$ :

$$\eta_m = 2\alpha L(1 - R) \frac{(\alpha L \operatorname{sh} \alpha d - \operatorname{ch} \alpha d \operatorname{th} \frac{d}{L})}{(\alpha^2 L^2 - 1)(e^{\alpha d} - R e^{-\alpha d})}, \quad (1)$$

$$\eta_\alpha = \alpha L(1 - R) \frac{(\alpha L - \operatorname{th} \frac{d}{L} - \alpha L e^{-\alpha d} \operatorname{ch}^{-1} \frac{1}{L})}{(\alpha^2 L^2 - 1)}, \quad (2)$$

$$J_0 = q g_T L \operatorname{th} \frac{d}{L}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — коэффициент поглощения,  $L$  — диффузионная длина неосновных носителей заряда,  $R$  — коэффициент отражения от лицевой стороны,  $d$  — толщина узкозонного слоя,  $g_T$  — объемная скорость генерации электронно-дырочных пар тепловым излучением.

В случае прямой межзонной рекомбинации и независимости  $\alpha$  от  $h\nu$  при  $h\nu > E_g$ , как при экситонном поглощении, к которому надо стремиться, получаем выражение для объемной скорости тепловой генерации

$$g_T = (kT)^3 n^2 \alpha \pi^{-2} c^{-2} \hbar^3 (u_g^2 + 2u_d + 2) e^{-u_g}, \quad (4)$$

где  $n$  — коэффициент преломления,  $c$  — скорость света,  $\hbar$  — постоянная Планка,  $u_g = E_g/kT$ . Численные расчеты делались при  $\alpha = 5000 \text{ см}^{-1}$ . При независимости  $\alpha$  от  $h\nu$  чувствительность  $R_\lambda$  максимальна при  $h\nu = E_g$ :

$$R_\lambda = \frac{q\eta}{E_g}. \quad (5)$$

Обнаружительная способность вычислялась по формуле

$$D_\lambda^* = R_\lambda (4qJ_0 \Delta f)^{-0.5}. \quad (6)$$

В табл. 2 приведены результаты вычислений параметров фотодиодов при реальной диффузионной длине  $L = 2.4 \mu\text{м}$  и при возможной в более совершенном узкозонном слое  $L = 10 \mu\text{м}$  при двух значениях коэффициента отражения  $R = 0$  и  $R = 0.32$ .

**Таблица 2.** Сравнительные расчетные значения параметров GaSb/GaIn<sub>0,24</sub>AsSb/ AlGaAsSb фотодиодных структур с отражающим и поглощающим покрытием на тыльной стороне ( $T = 300\text{ K}$ )

Тип контакта		Отражающий				Поглощающий			
Диффузионная длина $L, \mu\text{m}$		10		2.4		10		2.4	
Коэффициент отражения $R$		0	0.32	0	0.32	0	0.32	0	0.32
ФД	Оптимальная толщина $d_{opt}, \mu\text{m}$	1.34	0.84	1.08	0.75	2.52	2.52	1.94	1.94
	Обнаружительная способность $D_{\lambda}^*$ , $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{0.5}/\text{W}$	$4 \cdot 10^{11}$	$3.1 \cdot 10^{11}$	$3.9 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$2.8 \cdot 10^{11}$	$1.9 \cdot 10^{11}$	$2.6 \cdot 10^{11}$	$1.8 \cdot 10^{11}$
	Квантовая чувствительность $\eta$	0.707	0.45	0.62	0.41	0.7	0.47	0.53	0.36
ТФВ	Оптимальная толщина $d_{opt}, \mu\text{m}$	3	2.77	1.7	1.6	5.5	5.5	2.8	2.8
	Квантовая чувствительность $\eta_{opt}$	0.93	0.63	0.71	0.51	0.88	0.6	0.57	0.39
	Плотность темнового тока $J_0, \text{A}/\text{cm}^2$	$4.6 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$5.4 \cdot 10^{-5}$	$5.4 \cdot 10^{-5}$	$3.1 \cdot 10^{-5}$	$3.1 \cdot 10^{-5}$

Из табл. 2 видно, что оптимальная толщина  $d_{opt}$  в случае зеркально отражающего контакта в 2–3 раза меньше, чем в случае поглощающего, как в фотоприемниках, так и в фотовольтаических элементах. В фотоприемниках  $d_{opt}$  меньше, чем в термофотопреобразовательных элементах, что приводит к снижению квантовой фоточувствительности  $\eta$ . Наибольшая обнаружительная способность  $D_\lambda^*$  и квантовая фоточувствительность получаются при нулевом значении коэффициента отражения от лицевой стороны.

Теоретические вычисления удовлетворительно подтверждают экспериментальные результаты.

В результате проведенных исследований нами созданы фотодиодные структуры на основе  $n\text{-GaSb-}n\text{-GaInAsSb-}p\text{-GaSb-}p\text{-AlGaAsSb}$  для спектрального диапазона  $1.0\text{--}2.5\ \mu\text{m}$  с тонкой активной областью ( $1\text{--}1.6\ \mu\text{m}$ ) и отражающим контактом на тыльной стороне структуры. Исследованы спектры фоточувствительности и электролюминесценции в зависимости от толщины активной области. Показано, что использование отражающего контакта позволяет улучшить квантовую и обнаружительную способность до  $D_\lambda^* = 6 \cdot 10^{10}\ \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$  при комнатной температуре. Фотоэдс разомкнутой цепи достигла  $V_{oc} = 0.2\ \text{eV}$ , что перспективно для низкотемпературных термофотоэлектрических преобразователей. Произведенные нами теоретические оценки подтверждают данные эксперимента.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 06-02-01364 и 06-02-08279-офи.

## Список литературы

- [1] *Analytical Chemistry*. 1956. V. 28. N 8. P. 219–237.
- [2] Стоянов Н.Д., Михайлова М.П., Андрейчук О.В., Моисеев К.Д., Андреев И.А., Афраилов М.А., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2001. Т. 35. В. 4. С. 467–473.
- [3] Андреев И.А., Куницына Е.В., Михайлова М.П., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1999. Т. 33. В. 3. С. 249–253.
- [4] Mank M.G., Andreev V.M. // *Semicond. Sci. Technol.* 2003. V. 18. P. S191–S201.
- [5] Астахова А.П., Журтанов Б.Е., Именков А.Н., Михайлова М.П., Сиповская М.А., Стоянов Н.Д., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 1. С. 23–29.
- [6] Гребенищикова Е.А., Именков А.Н., Журтанов Б.Е., Данилова Т.Н., Сиповская М.А., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2004. Т. 38. В. 6. С. 745–752.