

УДК 621.383.4/5
EDN: AYNHNEPACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,
07.57.Kp, 85.60.Dw

Исследование времени жизни и темнового тока в поглощающих слоях на основе тройных соединений сурьмы

Н. И. Яковлева, В. С. Ковшов

Исследуются параметры фотоприемных устройств на основе фоточувствительных барьерных структур и фотодиодов с поглощающими слоями из тройных растворов $InAs_{1-x}Sb_x$ и $In_{1-x}Ga_xSb$ средневолнового инфракрасного диапазона спектра. Проведены расчеты температурных зависимостей времени жизни и темнового тока в слоях $InAs_{1-x}Sb_x$ и $In_{1-x}Ga_xSb$. Определено отношение сигнал/шум в рабочем температурном диапазоне. Моделирование параметров показало, что для ФПУ на основе $InAs_{0,8}Sb_{0,2}$ с граничной длиной волны $\lambda_{0,5} \sim 4,8$ мкм обнаружительная способность при $T = 100$ К составит $D^ \approx 10^{12}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}; для фотодиодов на основе $In_{0,7}Ga_{0,3}Sb$ с граничной длиной волны $\lambda_{0,5} \sim 5,2$ мкм обнаружительная способность при $T = 100$ К составит $D^* \approx 10^{11}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}, что соответствует высокотемпературным применениям.*

Ключевые слова: MWIR, InAsSb, InGaSb, время жизни, темновой ток, фотодиод.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-1-61-73

1. Введение

Целью разработчиков фотоэлектроники является создание высокочувствительных и относительно недорогих фотоприемных устройств (ФПУ) большого формата. В связи с этим в отечественной фотоэлектронике и за рубежом проводятся исследования в направлении совершенствования дизайна структур, содержащих двойные, тройные и многокомпонентные соединения на основе сурьмы

с целью создания ФПУ средневолнового ИК диапазонов спектра [1, 2]. Рассматриваемые в работе тройные растворы $InAs_{1-x}Sb_x$ и $In_{1-x}Ga_xSb$ обладают полным набором свойств, необходимых для создания перспективных изделий фотоэлектроники, к которым относятся: высокая подвижность электронов, высокий коэффициент поглощения, малая скорость тепловой генерации, алмазоподобная кристаллическая решетка и зонная структура, позволяющая конструировать сложные многослойные конфигурации с заданными свойствами.

Поэтому исследование рекомбинационных и токовых механизмов в материалах $InAs_{1-x}Sb_x$ и $In_{1-x}Ga_xSb$, используемых в качестве поглощающих слоев в фотодиодах и барьерных устройствах является актуальной задачей [3–5].

При всех положительных свойствах материалов на основе сурьмы имеется и ряд недостатков, одним из которых является повышенный темновой ток в фотодиодных структурах и напряженных сверхрешетках

Яковлева Наталья Ивановна¹, гл.н.с., д.т.н.

Ковшов Владимир Сергеевич^{1,2}, вед. инженер,

к.ф.-м.н.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 9.02.2024

После доработки 19.02.2024

Принята к публикации 26.02.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11.

© Яковлева Н. И., Ковшов В. С., 2024

второго типа (T2SL) [6]. Причиной повышенного темнового тока считается малое время жизни неосновных носителей заряда по механизму Шокли-Рид-Холла (SRH) [7]. Однако в последнее время, благодаря совершенствованию методов выращивания и созданию барьерных ФПУ на основе тройных растворов InAsSb и InGaSb, влияние рекомбинационных процессов удалось существенно уменьшить [8–13].

В данной работе исследуются свойства и характеристики тройных растворов InAs_{1-x}Sb_x и In_{1-x}Ga_xSb, представлен расчет температурных зависимостей времени жизни, темнового тока отношения темнового тока и фототока, что позволяет прогнозировать фотоэлектрические параметры будущих приборов для создания инфракрасных формирователей изображения средневолнового диапазона спектра.

2. Свойства материалов InAs_{1-x}Sb_x и In_{1-x}Ga_xSb

Тройное соединение InAs_{1-x}Sb_x имеет кристаллическую структуру цинковой обманки и является прямозонным полупроводником, ширина запрещенной зоны которого определяется уравнением [14]

$$E_g(x, T) = 0,411 - \frac{3,4 \cdot 10^{-4} T^2}{210 + T} - 0,876x + 0,7x^2 + 3,4 \cdot 10^{-4} xT(1-x).$$

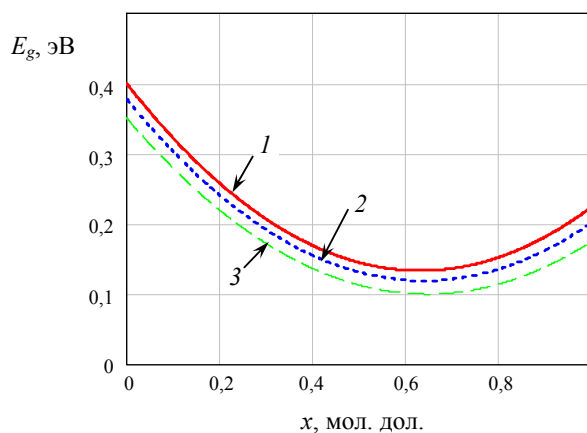
На рисунке 1 (а, б) показана зависимость ширины запрещенной зоны от состава (а) и температуры (б) для тройного раствора InAs_{1-x}Sb_x.

Настройка граничной длины волны и выбор желаемой границы fotocувствительности для InAs_{1-x}Sb_x достигается изменением состава x . Если выбрать состав $x \approx 0,09$ мол. дол., то граничная длина волны сдвигается в область коротких значений и составит $\lambda_{0,5} \sim 4,1$ мкм при $T = 150$ К, что важно для создания высокотемпературных ФПУ при больших значениях состава $x = 0,5-0,7$ мол. дол. ФПУ на основе InAs_{1-x}Sb_x могут детектировать излучение и в длинноволновом ИК диапазоне спектра, что весьма перспективно для LWIR-применений.

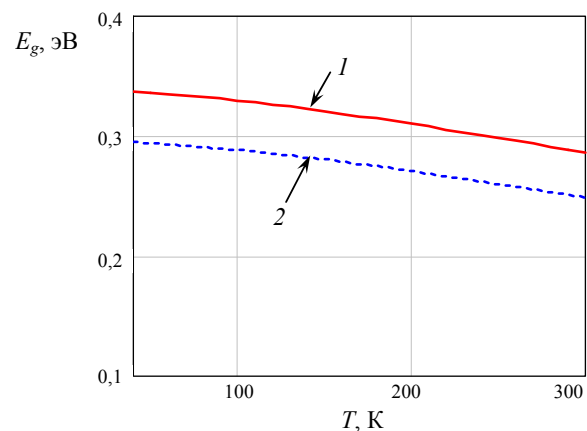
Собственная концентрация носителей заряда n_i в InAs_{1-x}Sb_x рассчитывается как функция от состава x и температуры T в соответствии с уравнением [15]

$$n_i = (1,35 + 8,5x + 4,22 \cdot 10^{-3} T - 1,53 \cdot 10^{-3} xT - 6,73x^2) \cdot 10^{14} T^{3/2} E_g^{3/4} \exp(-E_g / 2kT).$$

На рисунке 2 (а, б) показаны зависимости собственной концентрации от состава и температуры для тройного раствора InAs_{1-x}Sb_x.

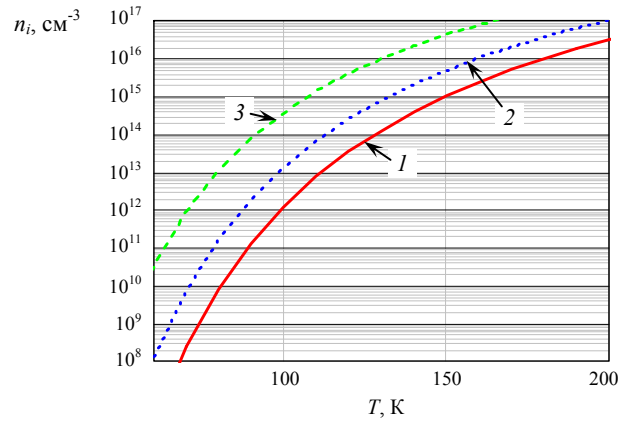
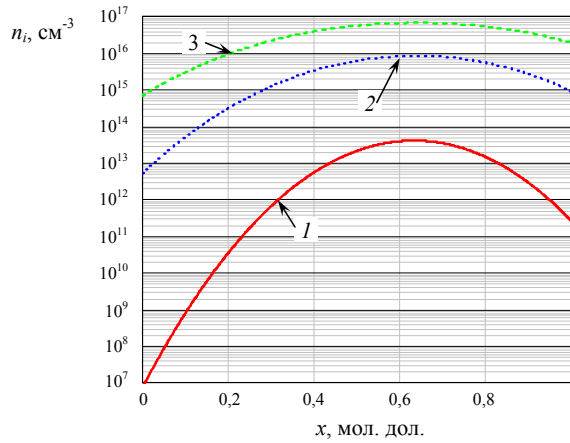


а) зависимость E_g от состава для температур: (1) – $T = 100$ К; (2) – $T = 200$ К; (3) – $T = 300$ К



б) зависимость E_g от температуры для двух составов: (1) $x = 0,15$ мол. дол.; (2) $x = 0,09$ мол. дол.

Рис. 1. Ширина запрещенной зоны E_g материала InAs_{1-x}Sb_x: а) – от состава; б) – от температуры



а) зависимость n_i от состава при температурах:
 (1) – $T = 100$ К; (2) – $T = 200$ К;
 (3) – $T = 300$ К

б) зависимость n_i от температуры для трех значений
 состава: (1) $x = 0,09$ мол. дол.; (2) $x = 0,15$ мол. дол.;
 (3) $x = 0,25$ мол. дол.

Рис. 2. Собственная концентрация n_i материала $InAs_{1-x}Sb_x$: а) – зависимость от состава при $T = 100, 200, и 300$ К; б) – зависимость от температуры при $x = 0,09, 0,15, 0,25$ мол.дол.

В таблице 1 представлены параметры $In_{1-x}As_xSb$, для сравнения показаны параметры бинарных соединений InAs и InSb [16].

В полупроводниковом материале $In_{1-x}Ga_xSb$ ширина запрещенной зоны в зависимости от состава и температуры для $Ga_xIn_{1-x}Sb$ задается уравнением [17]

$$E_g(x, T) = E_g(0) - \frac{6,2 \cdot 10^{-4} T^2 x}{(T + 260)} - \frac{3,8 \cdot 10^{-4} T^2 (1-x)}{(T + 200)} + 5,0 \cdot 10^{-5} T x (1-x).$$

Таблица 1

Параметры тройного раствора $In_{1-x}As_xSb_x$ и бинарных соединений InAs и InSb

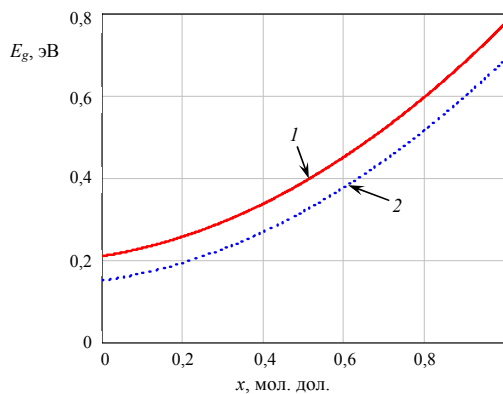
Параметр/материал	InAs	InSb	$InAs_{1-x}Sb_x$
Кристаллическая структура	цинковой обманки	цинковой обманки	цинковой обманки (сфалерит)
Кристаллическая группа	$\bar{F}43m$	$\bar{F}43m$	$\bar{F}43m$
Число атомов в 1 см^3	$3,59 \cdot 10^{22}$	$2,94 \cdot 10^{22}$	$(3,59 - 0,65x) \cdot 10^{22}$
Температура Дебая, К	280	160	
Плотность, г/см ³	5,68	5,77	$5,68 + 0,09x$
Диэлектрическая постоянная:			
– статическая	15,15	16,8	$15,15 + 1,65x$
– высокочастотная	12,3	15,7	$12,3 + 3,4x$
Эффективная масса электрона	0,023	0,014	$0,023 - 0,039x + 0,03x^2$
Эффективная масса дырки:			
– тяжелая дырка	0,41	0,43	$0,41 + 0,02x$
– легкая дырка	0,026	0,015	$0,026 - 0,0011x$
Сродство к электрону, эВ	4,9	4,59	$4,9 - 0,31x$
Постоянная кристаллической решетки, Å	6,0583	6,479	$6,0583 + 0,4207x$ при $x = 0,15, a = 6,12 \approx \alpha_{GaSb}$; при $x \geq 0,8 a = 6,39 \approx \alpha_{InSb}$
Энергия запрещенной зоны, эВ при $T = 0$ К	0,354	0,172	$0,351 - 0,774x + 0,598x^2$
Собственная концентрация, см ⁻³	$1,0 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{16}$	см. рис. 2
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости, см ⁻³	$8,7 \cdot 10^{16}$	$4,2 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,023 - 0,039x + 0,003x^2)^{3/2}$
Эффективная плотность состояний в валентной зоне, см ⁻³	$6,6 \cdot 10^{18}$	$7,1 \cdot 10^{18}$	$2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,41 + 0,02x)^{3/2}$

На рисунке 3а показана зависимость ширины запрещенной зоны $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ от состава; на рисунке 3б – зависимость ширины запрещенной зоны от температуры.

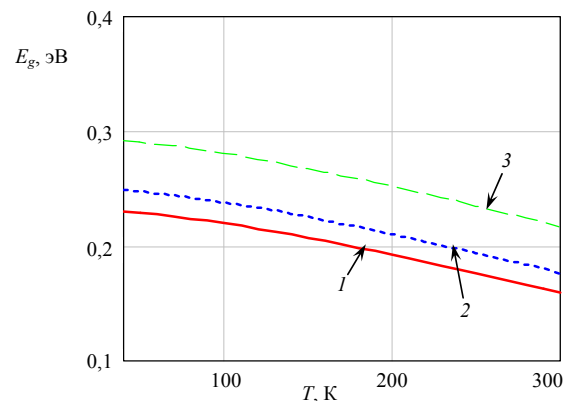
В соответствии с рисунком 3а отметим, что при $x \approx 0,25$ мол. дол. и $T = 80$ К ширина запрещенной зоны составит $E_g \approx 0,28$ эВ, ей соответствует длинноволновая граница $\lambda_{0,5} = 1,24/E_g = 1,24/0,28 = 4,42$ мкм; при $x \approx 0,3$ мол. дол. и $T = 100$ К $E_g \approx 0,238$ эВ, ей соответствует длинноволновая граница $\lambda_{0,5} = 1,24/E_g = 1,24/0,238 = 5,2$ мкм. Для гранич-

ной длины волны $\lambda_{0,5} \sim 5,2$ мкм постоянная кристаллической решетки $a = 6,479 - 0,383x = 6,479 - 0,383 \cdot 0,3 \approx 6,36$ Å, поэтому для материала $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ при небольших x предпочтительна подложка InSb. Из рисунка 3б видно, что при повышении температуры ширина запрещенной зоны $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ уменьшается, т. е. сдвигается в длинноволновую область спектра.

Параметры материала $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ представлены в таблице 2, для сравнения показаны характеристики бинарных соединений InSb и GaSb.



а) E_g от состава для температур:
(1) $T = 80$ К; (2) $T = 300$ К



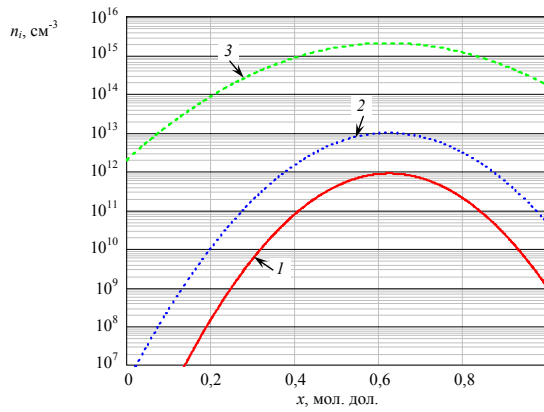
б) E_g от температуры для составов: (1) $x = 0,25$ мол. дол.;
(2) $x = 0,3$ мол. дол.; (3) $x = 0,4$ мол. дол.

Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны E_g материала $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ от состава и температуры

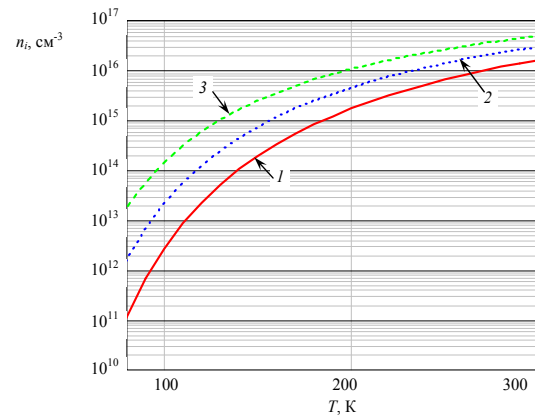
Таблица 2

Параметры материала $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ и бинарных соединений InSb и GaSb

Параметр/Материал	InSb	GaSb	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$
Кристаллическая структура	цинковой обманки (сфалерит)	цинковой обманки (сфалерит)	цинковой обманки (сфалерит)
Кристаллическая группа	$\bar{F}43m$	$\bar{F}43m$	$\bar{F}43m$
Число атомов в 1 см^3	$2,94 \cdot 10^{22}$	$3,53 \cdot 10^{22}$	$(2,94 + 0,59x) \cdot 10^{22}$
Температура Дебая, К	160	266	
Плотность, г/см^3	5,77	5,61	$5,77 - 0,16x$
Диэлектрическая постоянная:			
– статическая	16,8	15,7	$16,8 - 1,1x$
– высокочастотная	15,7	14,4	$15,7 - 1,3x$
Эффективная масса электрона	0,014	0,041	$0,014 + 0,0178x + 0,0092x^2$
Эффективная масса дырки:			
– тяжелая дырка	0,43	0,4	$0,43 - 0,03x$
– легкая дырка	0,015	0,05	$0,015 + 0,01x + 0,025x^2$
Сродство к электрону, эВ	4,59	4,06	$4,59 - 0,53x$
Постоянная кристаллической решетки, Å	6,479	6,096	$6,479 - 0,383x$
Энергия запрещенной зоны, эВ при $T = 0$ К	0,172	0,736	$0,172 + 0,139x + 0,415x^2$
Собственная концентрация, см^{-3}	$2,0 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	см. рис. 4
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости, см^{-3}	$4,2 \cdot 10^{16}$	$2,1 \cdot 10^{17}$	$2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,014 + 0,0178x + 0,00092x^2)^{3/2}$
Эффективная плотность состояний в валентной зоне, см^{-3}	$7,3 \cdot 10^{18}$	$1,8 \cdot 10^{19}$	10^{19}



а) зависимость n_i от состава при температурах: (1) – $T = 80$ К; (2) – $T = 100$ К; 3 – $T = 200$ К



б) зависимость n_i от температуры для трех значений состава: (1) $x = 0,3$ мол. дол.; (2) $x = 0,4$ мол. дол.; (3) $x = 0,6$ мол. дол.

Рис. 4. Собственная концентрация n_i в $In_{1-x}Ga_xSb$: (а) зависимость от состава при $T = 80, 100, 200$ К; (б) зависимость от температуры при $x = 0,3, 0,4, 0,6$ мол. дол.

На рисунке 4 (а, б) представлены зависимости собственной концентрации от состава и температуры для тройного раствора $In_{1-x}Ga_xSb$.

На рисунке 5 показана зависимость постоянной кристаллической решетки материала $In_{1-x}Ga_xSb$ от состава при температуре $T = 300$ К.

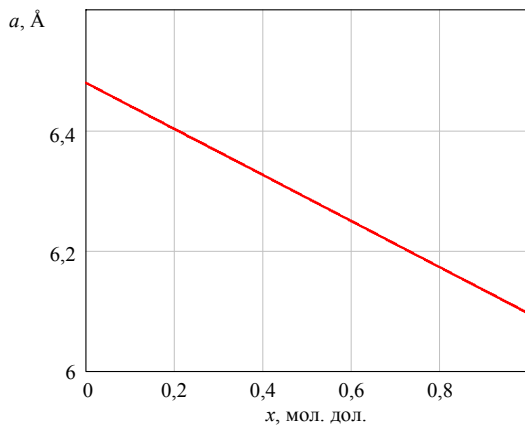


Рис. 5. Зависимость постоянной решетки $In_{1-x}Ga_xSb$ от состава при $T = 300$ К

График подтверждает, что при небольших значениях состава постоянная кристаллической решетки $In_{1-x}Ga_xSb$ соответствует постоянной кристаллической решетки $InSb$ ($a \approx 6,4$ Å).

3. Моделирование времени жизни в материалах группы A_3B_5

Работа ФПУ на основе $InAs_{1-x}Sb_x$ и $In_{1-x}Ga_xSb$ определяется процессами генерации-рекомбинации (G-R) в оптически актив-

ных областях приборной структуры. Процессы генерации-рекомбинации зависят от уровня концентрации носителей заряда в слоях и от мощности оптического излучения, поступающего в поглощающий слой. Рассматривая процессы генерации-рекомбинации в объеме полупроводниковых слоев $InAs_{1-x}Sb_x$ и $In_{1-x}Ga_xSb$, будем учитывать три основных механизма: Шокли-Рида-Холла (SRH), радиационный и Оже. Для расчета темнового тока выполним оценку времени жизни носителей заряда, учитывая их характеристические параметры (п. 2).

3.1. Время жизни по механизму излучательной рекомбинации

Время жизни в материалах группы A_3B_5 в случае излучательной рекомбинации определяется уравнением

$$\tau_{Rad} = \frac{1}{B(n_0 + p_0)},$$

где n_0 и p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок в области поглощения; B – коэффициент излучательной рекомбинации B ($см^3/с$), который задается формулой в соответствии с работами [18–20]

$$B = 5,8 \cdot 10^{-13} \cdot \epsilon_\infty^{1/2} \cdot \left(\frac{m_0}{m_e^* + m_h^*} \right)^{3/2} \times \left(1 + \frac{m_0}{m_e^*} + \frac{m_0}{m_h^*} \right) \left(\frac{300}{T} \right)^{3/2} \cdot E_g^2,$$

здесь E_g – ширина запрещенной зоны в эВ, T – температура в К, ϵ_∞ – высокочастотная диэлектрическая постоянная; а m_e и m_h – удельные эффективные массы электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне; m_0 – масса свободного электрона.

Эффективную массу электрона в зависимости от состава можно рассчитать по формулам: для тройного раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ $m_e^*(x) = 0,023 - 0,039x + 0,03x^2$; для тройного раствора $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ $m_e^*(x) = 0,014 + 0,0178x +$

$+ 0,0092x^2$. На рисунке 6 (а, б) представлены зависимости массы электрона от состава: (а) в $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и (б) в $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ (Adachi S., 2005 [21]) при $T = 300$ К.

На рисунке 7 (а, б) представлены зависимости времени жизни от обратной температуры для излучательного механизма рекомбинации в поглощающих слоях n -типа проводимости с концентрацией доноров $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$: (а) в $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и (б) в $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$.

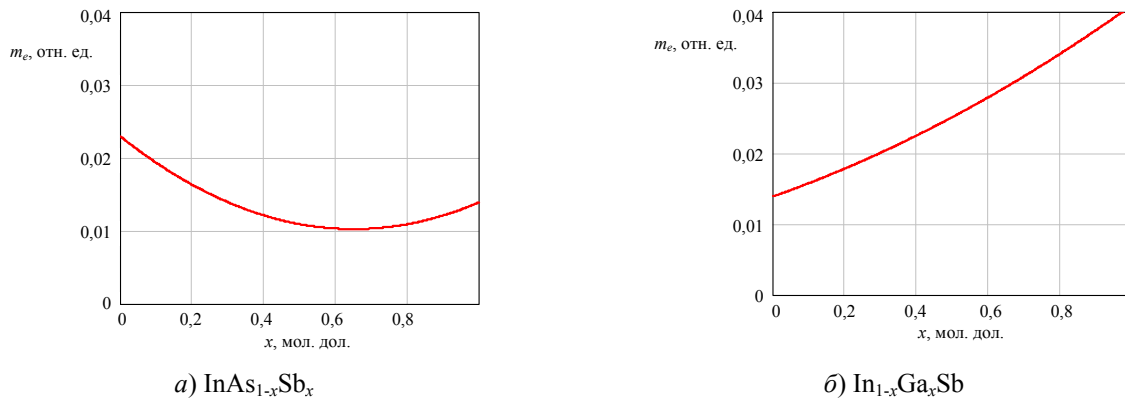


Рис. 6. Зависимость массы электрона от состава в тройных растворах $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ при $T = 300$ К

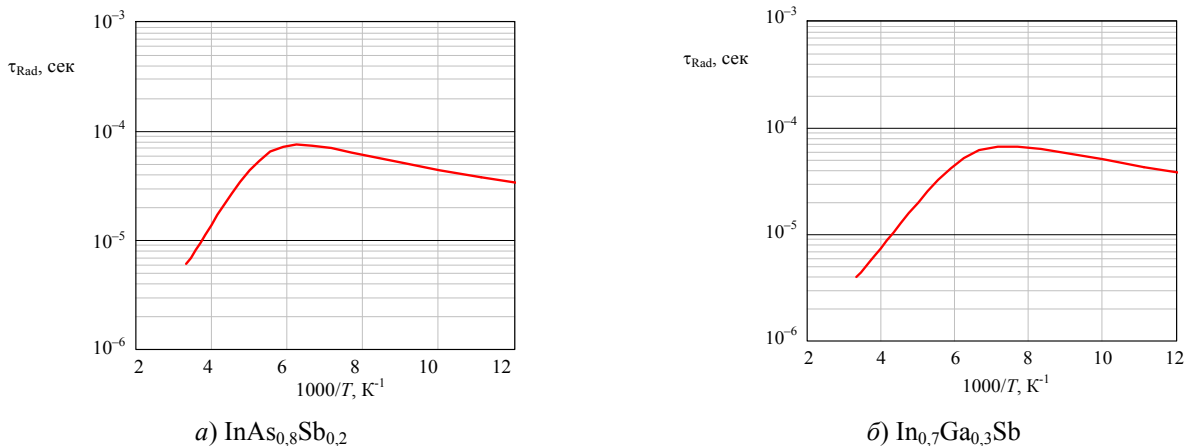


Рис. 7. Время жизни от обратной температуры для излучательного механизма рекомбинации в материалах $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и в $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ n -типа проводимости с концентрацией доноров $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$

3.2. Время жизни по механизму Оже

Время жизни по механизму Оже-1 в областях поглощения n -типа проводимости материалов группы A_3B_5 определяется выражением

$$\tau_{A1} = \frac{2\tau_{A1i}n_i^2}{n_0(n_0 + p_0)},$$

где

$$\tau_{A1}^i = 3,8 \cdot 10^{-18} \epsilon_\infty^2 \frac{m_0}{m_e^*} \left(1 + \frac{m_e^*}{m_h^*}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{2m_e^*}{m_h^*}\right) \left(\frac{E_g}{k_B T}\right)^{3/2} \times$$

$$\times \exp\left[\left(1 + \frac{2m_e^*}{m_h^*}\right) \cdot \left(1 + \frac{m_e^*}{m_h^*}\right)^{-1} \left(\frac{E_g}{k_B T}\right)\right] \cdot |F_1 F_2|^{-2} - \text{время}$$

жизни в собственном материале; E_g – ширина запрещенной зоны; k_B – постоянная

Больцмана; T – температура в K , ε_∞ – высокочастотная диэлектрическая постоянная; m_e^* и m_h^* – удельные эффективные массы электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне; $\frac{m_e^*}{m_h^*}$ – отношение эффективных масс электрона и тяжелой дырки; $|F_1 F_2|$ – произведение интегралов перекрытия волновых

функций. Для легированных прямозонных полупроводниковых материалов группы A_3B_5 в точке Γ ($k = 0$), как правило, произведение интегралов перекрытия $[F_1 F_2] = 0,25$ (Landsberg P. T., 1973 [22]). На рисунке 8 представлены зависимости времени жизни носителей заряда от температуры для механизма Оже-1, рассчитанные в материалах $InAs_{1-x}Sb_x$ и $In_{1-x}Ga_xSb$ n -типа проводимости с концентрацией доноров $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

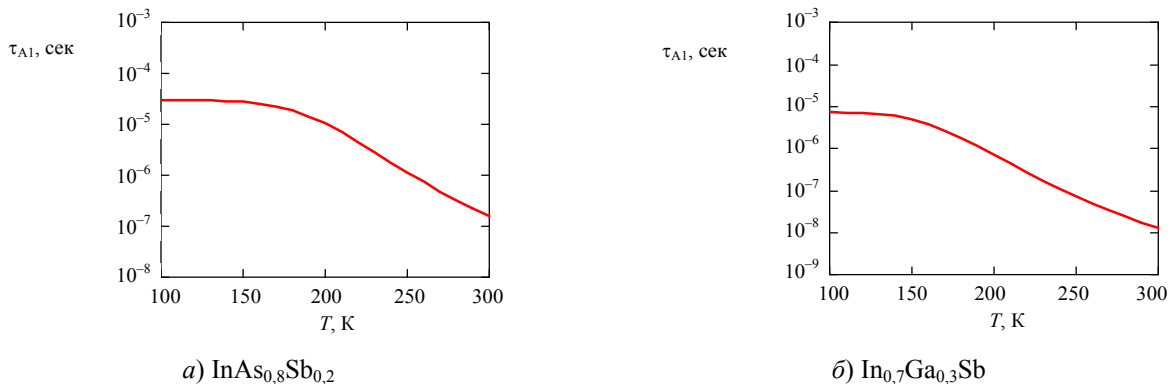


Рис. 8. Время жизни по механизму Оже-1 от температуры в материалах $InAs_{1-x}Sb_x$ и в $In_{1-x}Ga_xSb$ n -типа проводимости с концентрацией доноров $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$

3.3. Время жизни по механизму ШРХ

Механизм Шокли-Рида-Холла типичен для материалов группы A_3B_5 n -типа проводимости. Для тепловой генерации-рекомбинации ШРХ рассматривается случай, при котором концентрация центров захвата меньше, чем концентрация основных и неосновных носителей заряда $N_t < n, p$. Уравнение для скорости генерации ШРХ в равновесных условиях имеет вид

$$G_{th} = \frac{np - n_i^2}{(n + n_1) \cdot \tau_{p0} + (p + p_1) \cdot \tau_{n0}},$$

где n_1, p_1 – концентрации равновесных электронов и дырок, расположенных на центрах захвата.

Время жизни носителей заряда по механизму ШРХ определяется как

$$\tau_{SRH} = \frac{\tau_{n0}(p_0 + p_1) + \tau_{p0}(n_0 + n_1)}{n_0 + p_0},$$

где n_0, p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок; τ_{n0} и τ_{p0} – время жизни электронов и дырок на ловушках в ОПЗ.

Время жизни электронов и дырок на ловушках определяется в соответствии с уравнениями

$$\tau_{n0} = (\sigma_n v_{th} N_t)^{-1}, \quad \tau_{p0} = (\sigma_p v_{th} N_t)^{-1},$$

где σ_n, σ_p – эффективные площади захвата электронов и дырок; v_{th} – тепловая скорость, N_t – концентрация ловушек. Энергетический уровень центров захвата считаем расположенным на уровне $E_t \sim \frac{1}{4} E_g$ эВ ниже дна зоны проводимости. Результаты расчета времени жизни для механизма ШРХ представлены на рисунке 9.

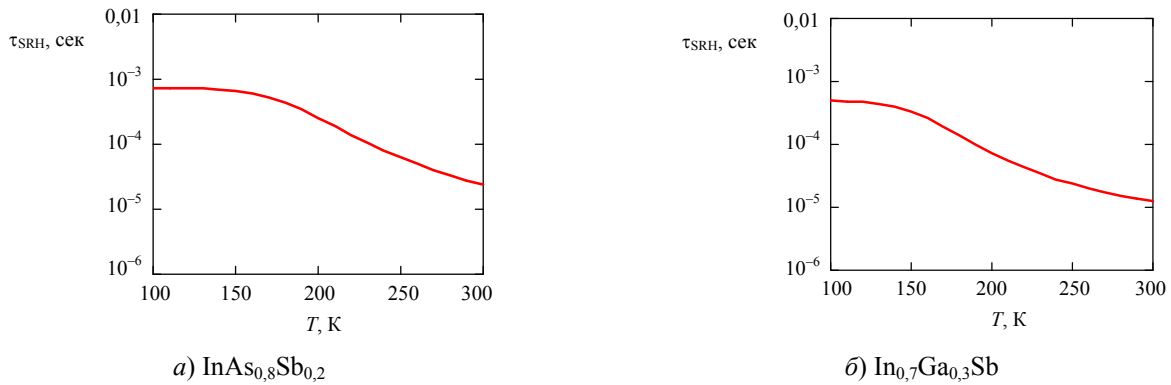


Рис. 9. Время жизни от температуры по механизму рекомбинации ШРХ в материалах $InAs_{1-x}Sb_x$ и в $In_{1-x}Ga_xSb$ n -типа проводимости с концентрацией доноров $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Эффективное время жизни носителей заряда ($\frac{1}{\tau_{Eff}} = \frac{1}{\tau_{Rad}} + \frac{1}{\tau_{Aug}} + \frac{1}{\tau_{SRH}}$) в материалах $InAs_{1-x}Sb_x$ и $In_{1-x}Ga_xSb$ n -типа проводимости с концентрацией доноров $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ с учетом выше представленных механизмов рекомбинации показано на рисунке 10 (а, б).

Характер графиков эффективного времени жизни для обоих материалов $InAs_{1-x}Sb_x$ и $In_{1-x}Ga_xSb$ идентичен, поскольку расчет проводился для алмазоподобных материалов, которые представляют собой антимонид индия с добавлением в кристаллическую решетку заданного количества $InAs$ или $GaSb$.

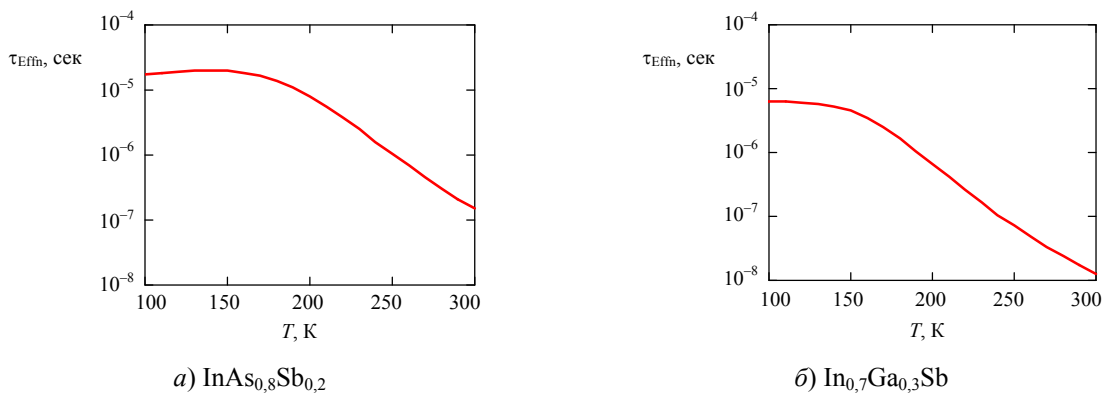


Рис. 10. Эффективное время жизни от температуры в материалах $InAs_{1-x}Sb_x$ и в $In_{1-x}Ga_xSb$ n -типа проводимости с концентрацией доноров $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$

4. Моделирование тока и отношения сигнал/шум

Рассчитаем темновой ток фотодиода на основе $p+/n$ -перехода, дизайн которого представлен на рисунке 11. Структура фоточувствительного элемента состоит из высоколегированной оптически прозрачной подложки (~ 300 мкм) с антиотражающим покрытием, на которой располагается базовый слаболегированный слой n -типа проводимости с концентрацией доноров $N_D \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$, поверх которого формируется коллекторный высоколегированный p -слой с концентрацией акцепторов $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщина базового эпи-

таксиального слоя $InAsSb$ составляет ~ 4–5 мкм.

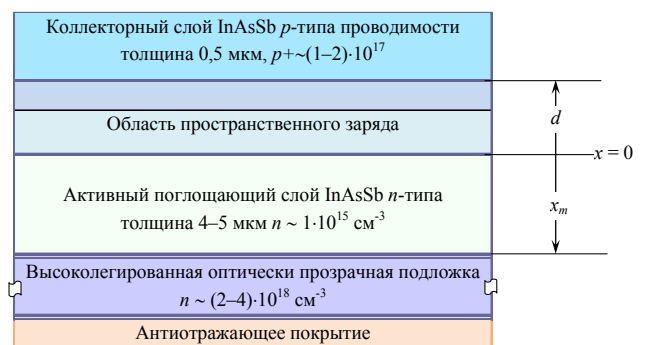


Рис. 11. Архитектура фотодиода на основе тройного раствора $InAsSb$

Излучение падает со стороны подложки и поглощается в базовом n -слое. Время жизни носителей заряда в n -объеме определяется тремя механизмами: излучательным, Оже и ШРХ. Ширина области пространственного заряда $d(x,T)$ фотодиода при нулевом напряжении смещения $V=0$ рассчитывается при известном значении концентрации в базе по формуле

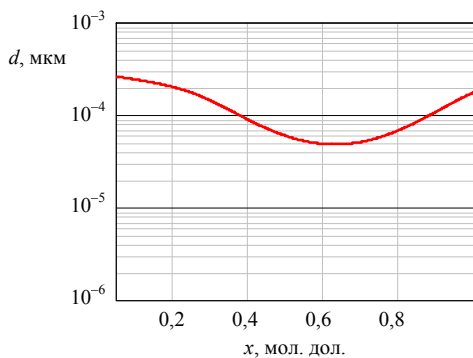
$$d(x,T) = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V_{bi}(x,T)}{qN}}$$

где x – состав тройного раствора; $V_{bi}(x,T)$ – встроенная разность потенциалов, N – кон-

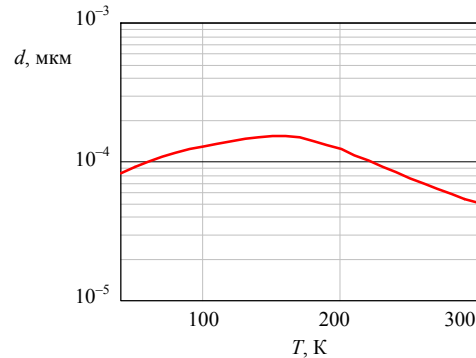
центрация носителей заряда в менее легированной (базовой) области, в данном случае $N = N_d$; ε – диэлектрическая постоянная; ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума. Встроенная разность потенциалов определяется как

$$V_{bi}(x,T) = k_B T \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i(x,T)^2}\right)$$

где k_B – постоянная Больцмана; $n_i(x,T)$ – собственная концентрация полупроводника. На рисунке 12 показана зависимость ширины ОПЗ от состава и температуры для фотодиода на основе InAsSb.



а) зависимость ширины ОПЗ от состава при температуре $T = 150$ К



б) зависимость ширины ОПЗ от температуры для состава $x = 0,2$ мол. дол.

Рис. 12. Зависимость ширины ОПЗ от состава и температуры для фотодиода на основе InAsSb

Ширина обедненной области распространяется почти исключительно в базовую область с низким содержанием концентрации из-за несимметричного легирования. Плотность темнового диффузионного тока в активном поглощающем слое InAsSb вычисляется с использованием скорости термической генерации (Martyniuk P., 2014, [23]), как

$$J_{dif} = qG_{th}t = qt \cdot \left(\frac{n_i^2}{N_D \tau_A} + \frac{n_i^2}{(N_D + n_i) \tau_{SRH}} \right),$$

где q – заряд электрона; G_{th} – скорость термической генерации; t – толщина области поглощения; τ_A – время жизни по механизму Оже; τ_{SRH} – время жизни по механизму ШРХ.

Из уравнения расчета темного тока видно, что ток зависит от концентрации легирующей примеси и времени жизни по механизмам Оже и ШРХ. Зависимость плотности темнового диффузионного тока для материала

InAsSb представлена на рисунке 13. Расчет проводился для концентрации донорной примеси $N_D \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; состава $x = 0,2$ мол. дол. и толщины слоя поглощения $t = 4$ мкм.

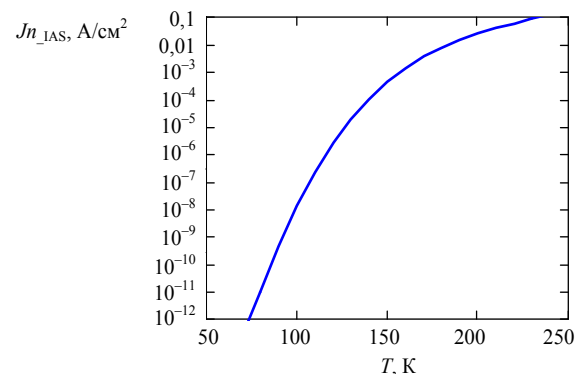


Рис. 13. Плотность темного тока в области поглощения InAsSb в зависимости от температуры при концентрации донорной примеси $N_D \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Процесс диффузии в слое поглощения вносит максимальный вклад в суммарный

темновой ток для $nВн$ -структур на основе InAsSb. Для фотодиодов оценку тока в ОПЗ проведем в соответствии с уравнением

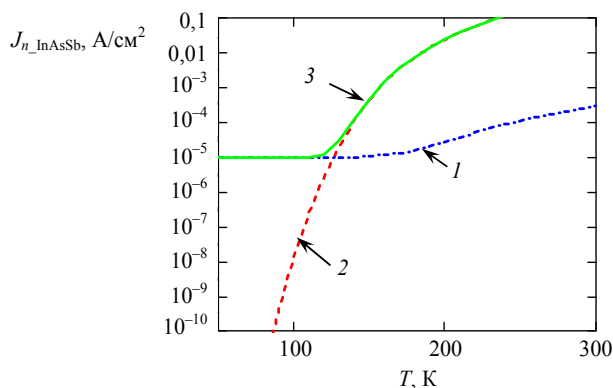
$$J_{dep} = \frac{q \cdot W_0 \cdot n_i^2}{n_1 \cdot \tau_{SRH}},$$

где W_0 – ширина области обеднения; n_1 – концентрация носителей заряда на дополнительном уровне вблизи $1/2E_g$, τ_{SRH} – время жизни по механизму ШРХ.

Наибольший вклад в темновой ток фотодиодов на основе материалов A_3B_5 вносит ток генерации-рекомбинации через центры захвата ШРХ, расположенные в ОПЗ вблизи собственного уровня энергии Ферми, поскольку обеспечивают наиболее вероятный переход носителей заряда при работе фотодиода.

С учетом тока генерации/рекомбинации в ОПЗ температурная зависимость плотности темнового тока, рассчитанная для $p+/n$ -перехода на основе InAsSb, представлена на рисунке 14а. На рисунке 14б показана измеренная температурная зависимость плотности тока фотодиода на основе InSb, вид которой близок к расчетной по уровню значений и характеру изменения (рис. 14а).

Из рисунка 14 видно, что ток генерации SRH в ОПЗ в большой степени определяет темновой ток при низких температурах, что ограничивает работу $p+/n$ -фотодиодов при $T \sim 80$ К, в то время как работа на высоких температурах, как правило, ограничена током диффузии.



а) расчетная плотность темнового тока для фотодиода на основе InAsSb с концентрацией донорной примеси $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$: (1) – ток G-R ШРХ; (2) – ток диффузии; (3) – суммарный темновой ток

Скорость генерации оптического излучения в заданном спектральном диапазоне длин волн можно оценить, используя уравнение Планка $M_e(\lambda, T)$, вычитая фоновую составляющую

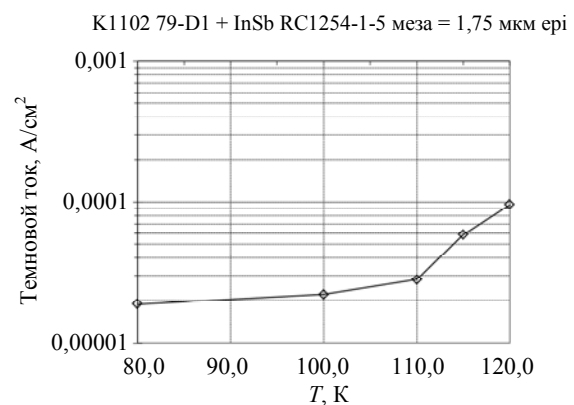
$$G_s(\lambda, T) = \frac{\lambda}{hc} [M_e(\lambda, T_s) - M_e(\lambda, T_b)],$$

где T_s – температура объекта наблюдения; T_b – температура фона.

С учетом тока фотосигнала, определяемого по скорости генерации оптического излучения, представим температурную зависимость отношения сигнал/шум на основании расчета диффузионной составляющей темнового тока для фоточувствительного элемента: (а) на основе $\text{InAs}_{0,8}\text{Sb}_{0,2}$ и (б) на основе $\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{Sb}$ (рис. 15а, б).

Из рисунка 15а следует, что прогнозируемое отношение сигнал/шум составит $\text{SNR} \sim 10^4$ отн. ед. для ФЧЭ на основе $\text{InAs}_{0,8}\text{Sb}_{0,2}$ при $T = 150$ К; из рисунка 15б следует, что прогнозируемое отношение сигнал/шум составит $\text{SNR} \sim 10^3$ отн. ед. для ФЧЭ на основе на основе тройного раствора $\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{Sb}$ при $T = 100$ К.

Температурную оценку обнаружительной способности проведем для матричных фоточувствительных элементов на основе $\text{InAs}_{0,8}\text{Sb}_{0,2}$ и на основе $\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{Sb}$ по диффузионному темновому току (рис. 16а, б).



б) измеренная плотность темнового тока для фотодиода на основе эпитаксиального InSb с концентрацией донорной примеси $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Рис. 14. Температурная зависимость плотности темнового тока: а) – расчетная для фотодиода на основе InAsSb; б) – измеренная для фотодиода с эпитаксиальным поглощающим слоем InSb

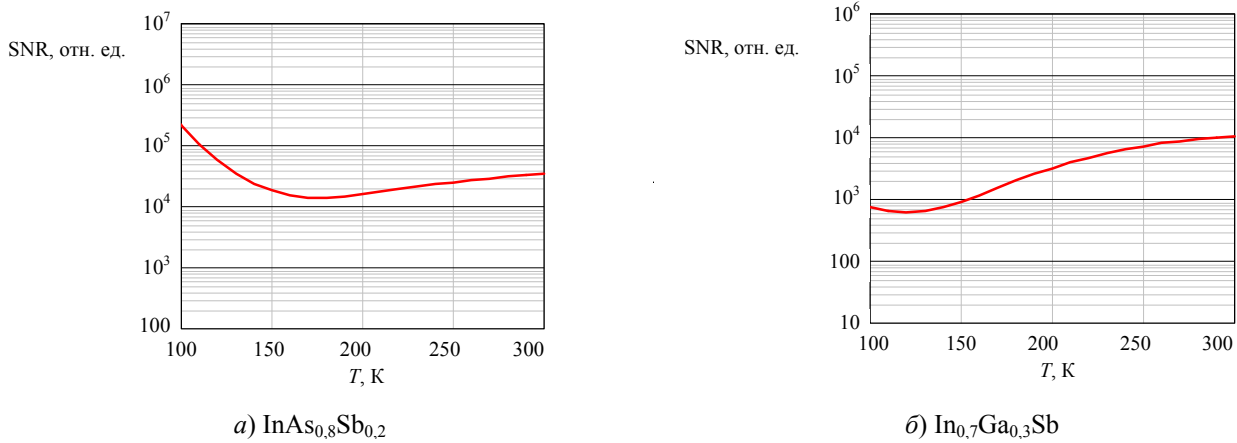


Рис. 15. Температурная зависимость отношения сигнал/шум для ФЧЭ: а) – на основе $\text{InAs}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}$; б) – на основе $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Sb}$

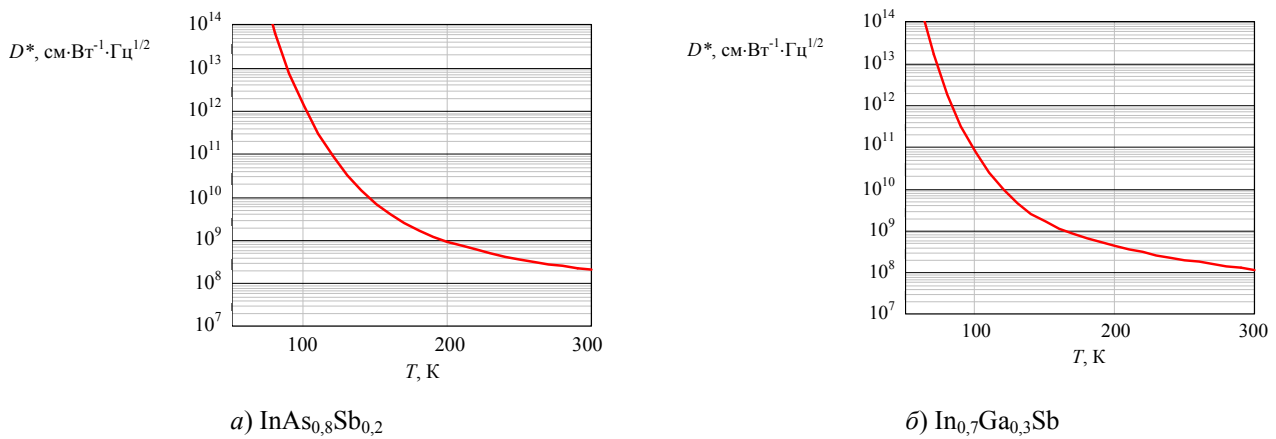


Рис. 16. Температурная зависимость обнаружительной способности D^* для ФЧЭ: а) – на основе $\text{InAs}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}$; б) – на основе $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Sb}$

Оценка показывает, что для ФЧЭ на основе $\text{InAs}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}$ с граничной длиной волны $\lambda_{0,5} = 4,8$ мкм при $T = 100$ К ожидаемое значение обнаружительной способности составит $D^* \approx 10^{12}$ $\text{см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$; для ФПУ на основе $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Sb}$ с граничной длиной волны $\lambda_{0,5} = 5,2$ мкм ожидаемое значение обнаружительной способности при $T = 100$ К составит $D^* \approx 10^{11}$ $\text{см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$. Таким образом, подтверждается возможность использования фотодиодных структур и сверхрешеток на основе соединений сурьмы для высокотемпературных применений в заданном диапазоне длин волн.

5. Заключение

В работе представлены модели расчета времени жизни и темнового тока фоточув-

ствительных элементов на основе тройных растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ средневолнового ИК диапазона спектра, предназначенных для использования в качестве поглощающих слоев в составе барьерных структур и сверхрешеток. Оценка показывает, что для ФЧЭ на основе $\text{InAs}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}$ с граничной длиной волны $\lambda_{0,5} = 4,8$ мкм при $T = 100$ К ожидаемое значение обнаружительной способности составит $D^* \approx 10^{12}$ $\text{см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$; для ФПУ на основе $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Sb}$ с граничной длиной волны $\lambda_{0,5} = 5,2$ мкм ожидаемое значение обнаружительной способности при $T = 100$ К составит $D^* \approx 10^{11}$ $\text{см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$. Таким образом, подтверждается возможность использования фотодиодных структур и сверхрешеток на основе соединений сурьмы для высокотемпературных применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Razeghi M. / Eur. Phys. J. AP. 2003. № 23. P. 149–205.
2. Бакаров А. К., Гутаковский А. К., Журавлев К. С., Ковчавцев А. П., Торопов А. И., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А. / Журнал технической физики. 2017. Т. 87. Вып. 6. С. 900–904.
3. Rogalski A., Antoszewski J., Faraone L. / J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 091101.
4. Rogalski A. / Proc. SPIE. 2017. Vol. 10433. P. 104330L.
5. Philip Klipstein, Eran Armon, Eran Avnon, Yaël Benny, Maya Brumer et al. / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVIII. 2022. Vol. 12107. P. 121070Q.
6. Lackner D., Pitts O. J., Steger M., Yang A., Thewalt M. L. W., Watkins S. P. / Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95. P. 81906.
7. Steenbergen E. H., Connelly B. C., Metcalfe G. D., Shen H., Wraback M., Lubyshev D. I., Qiu Y., Faste-nau J. M., Liu A. W. K., Elhamri S. et al. / Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 99. P. 251110.
8. Rogalski A. / Prog. Quantum Electron. 1989. Vol. 13. P. 191–231.
9. Steenbergen E. H. InAsSb-Based Photodetectors. – Elsevier BV: Amsterdam, The Netherlands: 2020. P. 415–453.
10. Ting David, Fisher Anita, Pepper Brian, Hill Cory, Keo Sam et al. / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVIII. 2022. Vol. 12107. P. 121070O.
11. Ковшов В. С., Никонов А. В., Пашкеев Д. А., Лопатина Е. А. / Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 2. С. 97–111.
12. Суханов М. А., Бакаров А. К., Журавлёв К. С. / Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. Вып. 3. С. 37–39.
13. Кривобок В. С., Николаев С. Н., Пашкеев Д. А., Минаев И. И., Савин К. А., Ерошенко Г. Н., Клековкин А. В. Получение ХВп структур на основе InSb методом молекулярно-лучевой эпитаксии – Москва: ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН. Сборник тезисов Школы молодых ученых «Быстропротекающие электро-взрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (БПИО-2023). 2023. С. 33–37.
14. Wieder H., Clawson A. / Thin Solid Films. 1973. Vol. 15. P. 217–221.
15. Rogalski A., Jó'zwickowski K. / Infrared Phys. 1989. Vol. 29. P. 35–42.
16. HANDBOOK SERIES ON SEMICONDUCTOR PARAMETERS, edited by M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur. Vol. 2: Ternary and Quaternary A_3B_5 Semiconductors. – P. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1999. P. 132–152.
17. Roth A. P., Keeler W. J., Fortin E. / Canadian J. of Phys. 1980. Vol. 58. № 4. P. 560–564.
18. Landsberg P. T. / Nat. Cell Biol. 1978. Vol. 275. P. 270–271.
19. Shockley W., Read J. W. T. / Phys. Rev. 1952. Vol. 87. P. 835–842.
20. Hall R. N. / Phys. Rev. 1952. Vol. 87. P. 387.
21. Adachi S. Properties of Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 2005.
22. Landsberg P. T. Adams M. J. / Journal of Luminescence. 1973. Vol. 7. P. 3–34.
23. Martyniuk P., Rogalski A. / Proc. of SPIE. Infrared Technology and Applications XL. 2014. Vol. 9070. P. 907014.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Lifetime and dark current considerations in absorbing layers based on ternary antimonide alloys

N. I. Iakovleva¹ and V. S. Kovshov^{1,2}

¹Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institute per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received 9.02.2024; revised 19.02.2024; accepted 26.02.2024

The possibilities of high performance achieving in antimonide-based, low-dimensional barrier and photodiode structures using MWIR $InAs_{1-x}Sb_x$ and $In_{1-x}Ga_xSb$ absorbing layers have been considered in this work. Lifetime and dark current temperature dependences in ternary antimonide alloys have been calculated. The signal-to-noise ratio has been determined in the operating temperature range. It was received, that for photodiodes based on

InAs_{0.8}Sb_{0.2}, the expected detectivity will be $D^* \approx 10^{12} \text{ cm}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{Hz}^{1/2}$ at $T = 100 \text{ K}$ and for photodiodes based on In_{0.7}Ga_{0.3}Sb the expected detectivity will be $D^* \approx 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{Hz}^{1/2}$ at $T = 100 \text{ K}$.

Keywords: MWIR, InAsSb, InGaSb, lifetime, dark current, photodiode.

REFERENCES

1. Razeghi M., Eur. Phys. J. AP, № 23, 149–205 (2003).
2. Bakarov A. K., Gutakovsky A. K., Zhuravlev K. S., Kovchavtsev A. P., Toropov A. I., Burlakov I. D., Boltar K. O., Vlasov P. V. and Lopukhin A. A., Journal of Technical Physics **87** (6), 900–904 (2017).
3. Rogalski A., Antoszewski J. and Faraone L., J. Appl. Phys. **105**, 091101 (2009).
4. Rogalski A., Proc. SPIE **10433**, 104330L (2017).
5. Philip Klipstein, Eran Armon, Eran Avnon, Yael Benny, Maya Brumer et al., Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVIII **12107**, 121070Q (2022).
6. Lackner D., Pitts O. J., Steger M., Yang A., Thewalt M. L. W. and Watkins S. P., Appl. Phys. Lett. **95**, 81906 (2009).
7. Steenbergen E. H., Connelly B. C., Metcalfe G. D., Shen H., Wraback M., Lubyshev D. I., Qiu Y., Fastenau J. M., Liu A. W. K., Elhamri S. et al., Appl. Phys. Lett. **99**, 251110 (2011).
8. Rogalski A., Prog. Quantum Electron. **13**, 191–231 (1989).
9. Steenbergen E. H., InAsSb-Based Photodetectors, Elsevier BV: Amsterdam, The Netherlands, 2020, pp. 415–453.
10. Ting David, Fisher Anita, Pepper Brian, Hill Cory, Keo Sam et al., Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVIII **12107**, 121070O (2022).
11. Kovshov V. S., Nikonov A. V., Pashkeev D. A. and Lopatina E. A., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **9** (2), 97–111 (2021) [in Russian].
12. Sukhanov M. A., Bakarov A. K. and Zhuravlev K. S., Jour. Tech. Phys. Letters **47** (3), 37–39 (2021).
13. Krivobok V. S., Nikolaev S. N., Pashkeev D. A., Minaev I. I., Savin K. A., Eroshenko G. N. and Klekovkin A. V., Obtaining XBn structures based on InSb by molecular beam epitaxy – Moscow: Lebedev Institute of Biological Sciences of the Russian Academy of Sciences. Collection of abstracts of the School of Young Scientists "Fast-flowing electro-explosive, electronic and electromagnetic processes in pulsed electronics and optoelectronics" (BPIO-2023). 2023, pp. 33–37.
14. Wieder H. and Clawson A., Thin Solid Films **15**, 217–221 (1973).
15. Rogalski A. and Jóźwikowski K., Infrared Phys. **29**, 35–42 (1989).
16. HANDBOOK SERIES ON SEMICONDUCTOR PARAMETERS, edited by M. Levinshstein, S. Rumyantsev and M. Shur. - Vol. 2: Ternary and Quaternary A₃B₅ Semiconductors. P. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1999, pp. 132–152.
17. Roth A. P., Keeler W. J. and Fortin E., Canadian J. of Phys. **58** (4), 560–564 (1980).
18. Landsberg P. T., Nat. Cell Biol. **275**, 270–271 (1978).
19. Shockley W. and Read J. W. T., Phys. Rev. **87**, 835–842 (1952).
20. Hall R. N., Phys. Rev. **87**, 387 (1952).
21. Adachi S., Properties of Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors, New York, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
22. Landsberg P. T. and Adams M. J., Journal of Luminescence **7**, 3–34 (1973).
23. Martyniuk P. and Rogalski A., Proc. of SPIE. Infrared Technology and Applications XL **9070**, 907014 (2014).