

УДК 621.383.4/5

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

Барьерная *pVn*-структура на основе GaAsSb/AlAsSb/InAsSb для детектирования ИК-излучения в диапазоне спектра 3,1–4,2 мкм

П. А. Ваганова, Н. И. Яковлева

*В работе исследована новая *pVn*-архитектура на основе гетероструктуры GaAsSb/AlAsSb/InAsSb группы материалов A_3B_5 , с барьерным слоем AlAsSb *n*-типа, поглощающим слоем InAsSb *n*-типа, коллекторным слоем GaAsSb *p*-типа проводимости, предназначенная для детектирования излучения в ИК-диапазоне спектра 3,1–4,2 мкм. У представленной структуры не имеется разрыва в валентной зоне, что позволяет работать в широком диапазоне напряжений смещения, не обедняя базовый активный слой InAsSb *n*-типа. Барьер в зоне проводимости, благодаря наличию в структуре широкозонного слоя AlAsSb составляет $\sim 1,0$ эВ, что достаточно для блокирования электронной составляющей тока. Проведен анализ темновых токов и основных параметров *pVn*-структуры, получено, что при рабочей повышенной температуре $T \approx 150$ К и плотности темнового тока $J \leq 6 \times 10^{-10}$ А/см² значение обнаружительной способности достигает значения $D^* \geq 2,5 \times 10^{12}$ (см Вт⁻¹Гц^{1/2}).*

Ключевые слова: барьер, *pVn*-структура, MWIR, InAsSb, матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ), темновой ток.

Ссылка: Ваганова П. А., Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 2. С. 109.

Reference: P. A. Vaganova and N. I. Iakovleva, Usp. Prikl. Fiz. **8** (2), 109 (2020).

Введение

В настоящее время за рубежом проводятся обширные исследования в направлении совершенствования структур на основе двойных, тройных и четверных соединений группы антимонидов, таких как: InSb, InAsSb, GaInAsSb [1, 2].

В работе рассматривается новая архитектура на основе гетероструктуры GaAsSb/

AlAsSb/InAsSb группы материалов A_3B_5 , с барьерным слоем AlAsSb *n*-типа, поглощающим слоем InAsSb *n*-типа, коллекторным слоем GaAsSb *p*-типа проводимости, предназначенная для детектирования излучения в диапазоне спектра 3,1–4,2 мкм при $T = 150$ К. Тройное соединение InAsSb используется для области поглощения и считается альтернативой материалу HgCdTe (МСТ) в средневолновой области спектра.

Представленная структура не имеет барьера в валентной зоне и работает в широком диапазоне напряжений смещения, не обедняя базовый активный *n*-слой InAsSb. Благодаря наличию в структуре широкозонного слоя AlAsSb барьер в зоне проводимости составляет $\sim 1,0$ эВ, что достаточно для блокирования электронной составляющей тока и подавления темновых токов генерации-рекомбинации ШРХ и туннелирования. Как следствие фотоприемные устройства (ФПУ) на основе барьер-

Ваганова Полина Андреевна^{1,2}, студент.

Яковлева Наталья Ивановна¹, г.н.с., к.т.н.

¹ АО «НПО «Орион»».

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

Тел. (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 23 марта 2020 г.

© Ваганова П. А., Яковлева Н. И., 2020

ерной структуры GaAsSb/AlAsSb/InAsSb работают при более высокой температуре $T \sim 150$ К по сравнению с традиционными фотодиодами на основе объемного материала InSb, детектирующими излучение при азотной температуре.

Особенности фотоприемных устройств на основе InSb

Антимонид индия (InSb) является прямозонным, устойчивым химическим соединением, что обуславливает высокую температурную стабильность. ФПУ на основе InSb имеют высокий коэффициент поглощения и высокую чувствительность, необходимую для преобразования инфракрасного (ИК) излучения в электрический сигнал в средневолновой области спектра.

Основными узлами ФПУ на основе InSb являются: матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ), сформированных в поглощающем слое *n*-типа проводимости методом ионной имплантации и меза-травления, и кремниевая БИС считывания, осуществляющая накопление и считывание сигналов с МФЧЭ.

На рис. 1 показан охлаждаемый узел ФПУ, состоящий из МФЧЭ и кремниевой БИС считывания, помещенных на сапфировый растр.

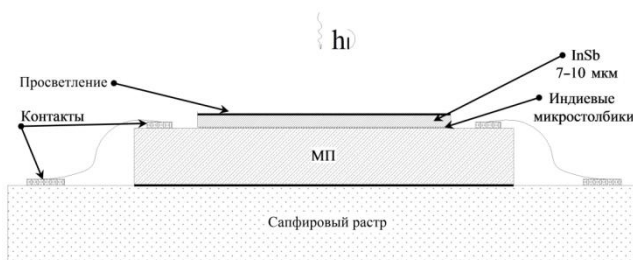


Рис. 1. Охлаждаемый узел МФЧЭ и кремниевой БИС считывания.

Технология имплантации бериллия (Be) позволяет создавать области *p*⁺-типа в материале InSb *n*-типа и формировать двумерные массивы фотодиодов. МФЧЭ размещается в холодной зоне криостатируемого корпуса в фокальной плоскости оптической системы. МФЧЭ и БИС считывания образуют фоточувствительную сборку таким образом, что каждый фотодиод подсоединен In-микростолбиком ко входу своей ячейки БИС считывания.

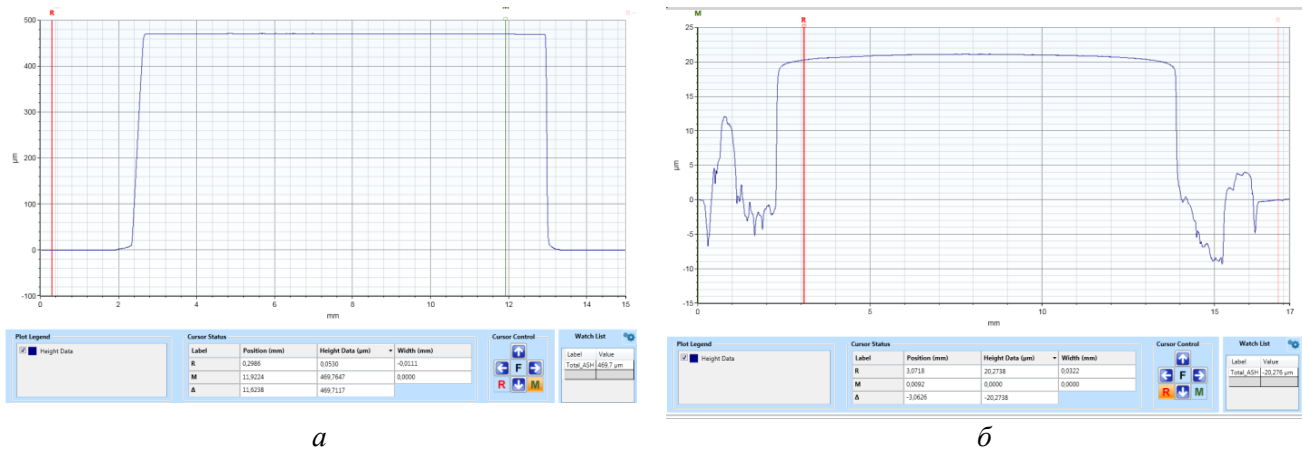
Фоточувствительная сборка располагается на сапфировом растре, размещаемом на охлаждаемой поверхности криостатируемого корпуса. При этом сигнальный поток ИК-излучения направляется на МФЧЭ со стороны подложки. Матрица ФЧЭ из InSb формата 640×512 элементов с размером элемента 12×12 мкм и шагом 15 мкм имеет габаритные размеры 9,6×7,8 мм², охлаждаемый узел МФПУ не выходит за габариты 14 мм.

Одной из ключевых технологических операций при изготовлении ФПУ является утоньшение объемного материала InSb для уменьшения толщины области поглощения, а, следовательно, для достижения высоких фотоэлектрических параметров. Сложность технологии утоньшения объемного InSb после гибридизации с БИС считывания состоит в том, что толщина объемного кристалла должна быть уменьшена от ~ 550 мкм до 10 мкм, при этом утоньшается не просто отдельно кристалл InSb, а уже готовая гибридизованная сборка, что является сложной и прецизионной операцией в технологии изготовления ФПУ. На рис. 2 (а, б) приведены фотографии охлаждаемого узла до и после технологической операции утоньшения.

Утоньшение проводится с помощью технологических операций химико-механического полирования (ХМП) и химико-динамического полирования (ХДП), после данных операций неплоскостность гибридных узлов составляет ≤ 4 мкм на диаметре 14 мкм, шероховатость соответствует $\nabla 14$ классу, высота микронеровностей $\sim 0,01$ мкм.

Охлаждаемые узлы ФПУ на основе фотодиодов характеризуются незначительной рассеиваемой электрической мощностью, а также (ввиду высокого дифференциального сопротивления) высоким отношением сигнал/шум. В процессе эксплуатации ФПУ на основе объемного InSb для достижения высоких пороговых характеристик должны охлаждаться до температуры жидкого азота, что существенно повышает габаритные размеры, мощностные параметры и стоимость изделий.

Таким образом, разработанная технологическая операция утоньшения объемного InSb для гибридного узла InSb/БИС позволяет уменьшить толщину поглощающего слоя InSb до ~ 10 мкм, и, следовательно, улучшить мощностные параметры.



а б

Рис. 2. Контроль профиля охлаждаемого узла: а – до утоньшения; б – после утоньшения.

Теоретические основы расчета параметров полупроводникового материала InAsSb

Для уменьшения габаритов, рассеиваемой мощности и увеличения рабочей температуры без ухудшения параметров ФПУ на основе InSb в работе предложена и исследована *pVn*-структура GaAsSb/AlAsSb/InAsSb с барьерным слоем AlAsSb. Для достижения высоких фотоэлектрических параметров в качестве поглощающего слоя выбрано тройное соединение InAsSb, которое широко используется в различных сложных гетероэпитаксиальных структурах и является аналогом HgCdTe в приборах средневолнового ИК-диапазона спектра. На рис. 3 (а, б) представлены зонная диаграмма (а) и зависимость ширины запрещенной зоны InAsSb (б) от состава.

Материал InAsSb является прямозонным во всем диапазоне составов. Тройное соеди-

нение InAs_{1-x}Sb_x состава $x_{InSb} = 0,09$ мол. дол. имеет ширину запрещенной зоны $\sim 0,28$ эВ при $T = 300$ К, что позволяет детектировать излучение с граничной длиной волны $\lambda_{гр} = 4,2$ мкм при $T = 150$ К.

Для определения параметров тройных соединений A₃B₅ наиболее часто используется квадратичная интерполяция

$$T(x) = xB_{AC} + (1-x)B_{BC} + x(1-x)C_{AB} \equiv a + bx + cx^2,$$

где $T(x)$ – вычисляемый параметр, x – состав; B_{AC} и B_{BC} – значения параметров элементов III-й и V-й групп, образующих тройное соединение, C – коэффициент нелинейности, характеризующий отклонение от закона линейной интерполяции.

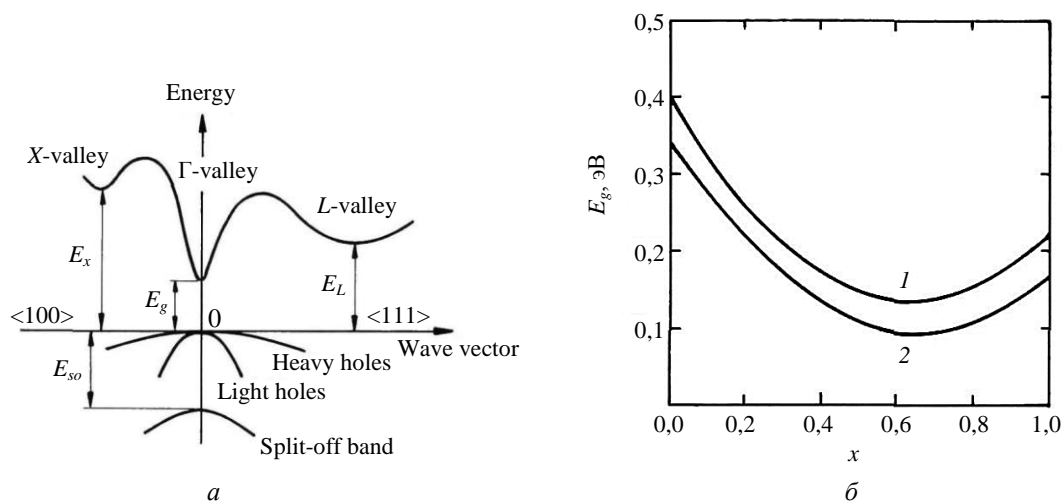


Рис. 3. Параметры зонной структуры InAsSb: а – зонная диаграмма; б – зависимость ширины запрещенной зоны от состава (кривая 1 – $T = 77$ К; кривая 2 – $T = 300$ К).

Коэффициент нелинейности C для элементов группы A_3B_5 находится экспериментально и обычно имеет положительное значение. Физическим объяснением нелинейности является эффект разупорядоченности структуры из-за различия составляющих ее кристаллических подрешеток двойных соединений.

Дополнительно, при моделировании параметров материалов A_3B_5 необходимо учитывать зависимость от температуры. Энергия запрещенной зоны материалов группы A_3B_5 с учетом влияния температуры рассчитывается по формуле Varshni [3].

$$E_g(T) = E_0 - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

где α и β – коэффициенты материала.

В табл. 1 представлены параметры и температурная зависимость энергии запрещенной зоны двойного соединения InSb, в табл. 2 – то же для InAs в соответствии с работами [4–6]. Значения, представленные в табл. 1 и 2 необходимы для оценки характеристик тройных соединений выбранной pVn -структуры GaAsSb/AlAsSb/InAsSb.

На рис. 4 (а, б) представлены температурные зависимости энергии запрещенной зоны двойных соединений InSb и InAs.

Таблица 1

Параметры и температурная зависимость энергии запрещенной зоны двойного соединения InSb

Параметр	Обозначение	Значение	Диапазон	Температура T , К	Энергия запрещенной зоны $E_g(T)$
Постоянная кристаллической решетки	a (Å)	$6,4794+3,48 \times 10^{-5}$ ($T-300$)		60	0,229
Ширина запрещенной зоны	E_g (эВ)	0,235		80	0,226
Температурный коэффициент	$\alpha(\Gamma)$ (мэВ/К)	0,32	0,299–0,6	100	0,223
Температурный коэффициент	$\beta(\Gamma)$ (К)	170	106–500	120	0,219
Спин-орбитальное расщепление	Δ_{SO} (эВ)	0,81	0,8–0,9	140	0,214
Масса электрона	m_e^* (г)	0,0135	0,012–0,015	160	0,210
Параметр Латтинжера	γ_1	34,8	32,4–38,5	180	0,205
Параметр Латтинжера	γ_2	15,5	13,4–18,1	200	0,200
Параметр Латтинжера	γ_3	16,5	15,15–18	220	0,195
Масса дырки в зоне спин-орбитального расщепления	m_{so}^*	0,11		240	0,190
Матричный элемент	E_p (эВ)	23,3		260	0,184
Параметр Кейна	F	-0,23		280	0,179
Смещение валентной зоны	VBO (эВ)	0		300	0,173

Таблица 2

Параметры и температурная зависимость энергии запрещенной зоны двойного соединения InAs

Параметр	Обозначение	Значение	Диапазон	Температура T , К	Энергия запрещенной зоны $E_g(T)$
Постоянная кристаллической решетки	a (Å)	$6,0583+2,74 \times 10^{-5}$ ($T-300$)		60	0,410
Ширина запрещенной зоны	E_g (эВ)	0,417	0,410–0,450	80	0,406

Окончание табл. 2

Параметр	Обозначение	Значение	Диапазон	Температура T , К	Энергия запрещенной зоны $E_g(T)$
Температурный коэффициент	$\alpha(\Gamma)$ (мэВ/К)	0,276		100	0,402
Температурный коэффициент	$\beta(\Gamma)$ (К)	93		120	0,398
Спин-орбитальное расщепление	Δ_{SO} (эВ)	0,39	0,37–0,41	140	0,393
Масса электрона	m_e^* (г)	0,026	0,023–0,03	160	0,389
Параметр Латтинжера	γ_1	20	6,79–7,20	180	0,384
Параметр Латтинжера	γ_2	8,5	1,9–2,88	200	0,379
Параметр Латтинжера	γ_3	9,2	2,681–3,05	220	0,374
Масса дырки в зоне спин-орбитального расщепления	m_{so}^*	0,14	0,09–0,15	240	0,369
Матричный элемент	E_p (эВ)	21,5	21,5–22,2	260	0,364
Параметр Кейна	F	-2,9	0–(-2,90)	280	0,358
Смещение валентной зоны	VBO (эВ)	-0,59		300	0,353

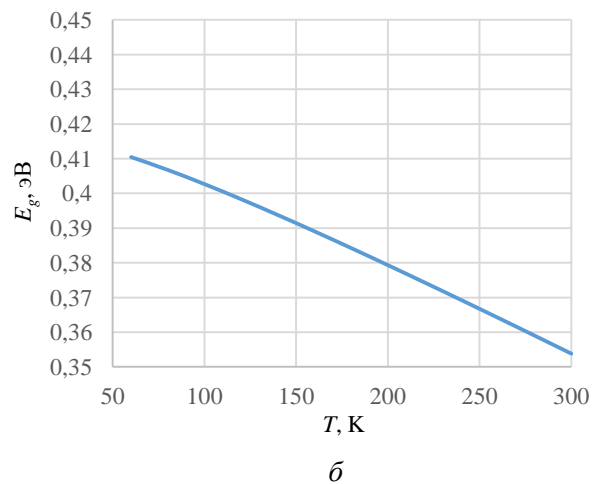
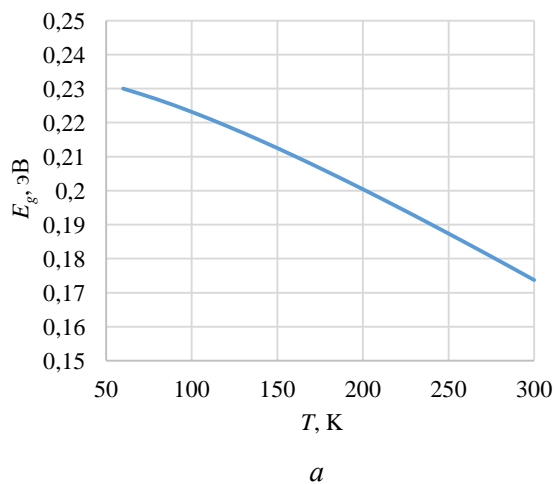


Рис. 4. Температурные зависимости энергии запрещенной зоны двойных соединений: а – InSb; б – InAs.

Расчет параметров полупроводниковой pVn -структуры

Представленная в работе pVn -структура (табл. 3) включает подложку (1) из высоколегированного InSb ($\sim 10^{18}$ см $^{-3}$), базовый слой InAs $_{1-x}$ Sb $_x$ (2), толщина которого, как правило,

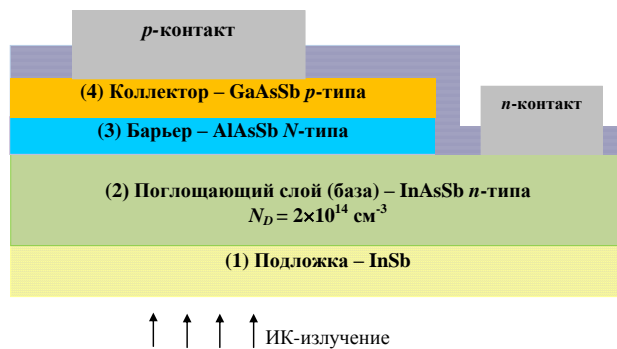
сопоставима с длиной волны поглощаемого излучения; барьерный слой AlSb $_{1-x}$ As $_x$ (3) для блокирования тока основных носителей заряда; контактный слой GaAs $_{1-x}$ Sb $_x$ (4) для подачи напряжения смещения. Состав антимонида в поглощающем слое составляет 0,09 мол. дол.

Таблица 3

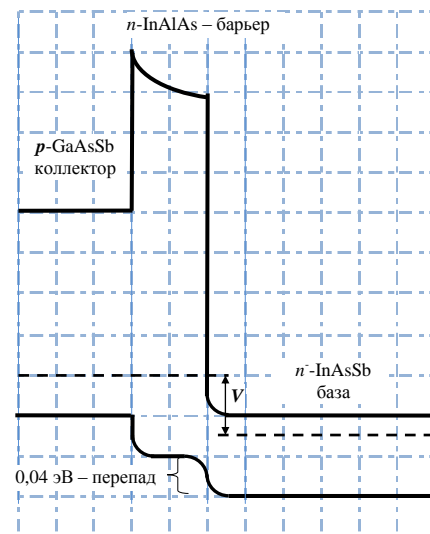
Последовательность слоев для pVn -структуры

Наименование слоев	Состав x , мол. дол.	Концентрация, см $^{-3}$	Толщина, мкм
(4) Коллектор GaAs $_{1-x}$ Sb $_x$	0,8	10^{15}	1–2
(3) Барьер AlSb $_{1-x}$ As $_x$	0,08	5×10^{16}	0,3
(2) Поглощающий слой (база) InAs $_{1-x}$ Sb $_x$	0,09	2×10^{14}	5–6
(1) Подложка InSb	–	1×10^{18} – 3×10^{18}	500–700

На рис. 5 (а, б) показан разрез барьерной pVn -структуры для средневолнового ИК-диапазона спектра и ее зонная диаграмма. Два слоя структуры имеют проводимость n -типа: $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и $\text{AlSb}_x\text{As}_{1-x}$. Верхний слой коллектора $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ имеет проводимость p -типа, что позволяет при небольшом напряжении смещения V убрать неоднородность валентной зоны и обеспечить беспрепятственный проход неосновных носителей заряда (дырок) к контакту.



а



б

Рис. 5. Барьерная pVn -структура: а – разрез барьерной pVn -структуры; б – зонная диаграмма.

Проведен расчет температурной зависимости разрыва в валентной зоне на границе слоев $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и $\text{AlSb}_{1-x}\text{As}_x$, который при рабочей температуре $T = 300$ К составил $0,04$ эВ.

Проведен детальный анализ характеристик ФПУ на основе pVn -гетероструктуры $\text{GaAsSb}/\text{AlAsSb}/\text{InAsSb}$ в зависимости от рабочей температуры и конструктивных параметров, что позволило найти наилучшие условия работы.

Для определения рабочей температуры используется характеристика Аррениуса, которая представляет собой температурную зависимость темнового тока, включающую диффузионную и генерационно-рекомбинационную составляющие.

Ток диффузии изменяется в зависимости от температуры по закону $\sim T^r \exp(-E_{\text{diff}}/k_B T)$, где значение энергии равно ширине запрещенной зоны полупроводника $E_{\text{diff}} = E_g$ при $T = 0$ К [6]

Ширина запрещенной зоны поглощающего слоя порядка $0,28$ эВ при $T = 300$ К, коллекторного слоя порядка $0,75$ эВ, а барьерного слоя – порядка $2,3$ эВ.

Зонная диаграмма барьерной структуры позволяет блокировать ток основных носителей заряда (электронов); уменьшить или исключить токовую составляющую генерационно-рекомбинации Шокли-Рида-Холла (ШРХ) и токов туннелирования, что приводит к увеличению фотоэлектрических параметров.

$$J_{\text{diff}} = T^{r_1} \exp(-E_{\text{diff}}/k_B T).$$

Ток генерации-рекомбинации ШРХ изменяется в зависимости от температуры по экспоненциальному закону $\sim T^r \exp(-E_{gr}/k_B T)$ – где значение энергии равно половине ширины запрещенной зоны полупроводника $-E_{gr} = 1/2 E_g$ при $T = 0$ К [6]

$$J_{gr} = T^{r_2} \exp(-E_{gr}/k_B T)$$

где $E_{\text{diff}} = E_g$; $E_{gr} = 1/2 E_g$; $r_1 \geq 3$; $r_2 \geq 1,5$; k_B – постоянная Больцмана.

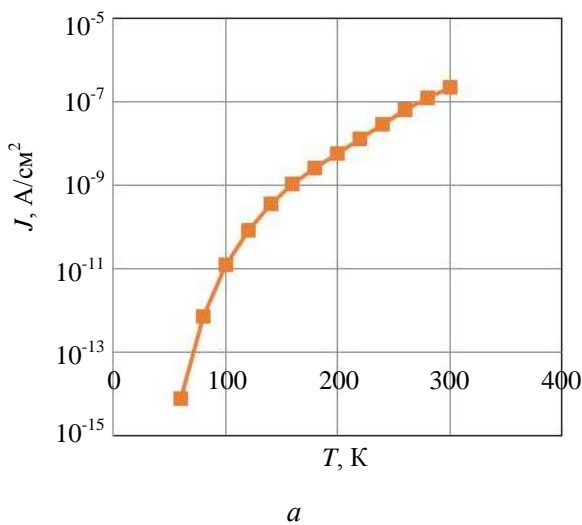
Поскольку в структуре не имеется области пространственного заряда (ОПЗ), вклад генерационно-рекомбинационного тока в темновой ток практически полностью отсутствует, поэтому темновой ток ограничивается только диффузионной составляющей.

В работе представлен расчет температурных зависимостей: темнового тока и обнаружительной способности.

Ток шума i_n включает тепловой шум Джонсона–Найквиста и шум темного тока [4]

$$i_n = \sqrt{\frac{4k_B T}{RA} + 2qJ_{\text{dark}}},$$

где k_B – постоянная Больцмана; R – дифференциальное сопротивление; A – площадь фоточувствительного элемента (ФЧЭ); q – заряд электрона; J_{dark} – плотность темного тока.



Обнаружительная способность бариода D^* определяется формулой

$$D^* = \frac{R_i}{i_g} \sqrt{A},$$

где R_i – токовая чувствительность.

На рис. 6 представлены температурные зависимости плотности темного тока и обнаружительной способности D^* ФПУ с шагом $l_{\text{ФЧЭ}} = 15$ мкм на основе pVn -структуры с поглощающим слоем InAsSb.

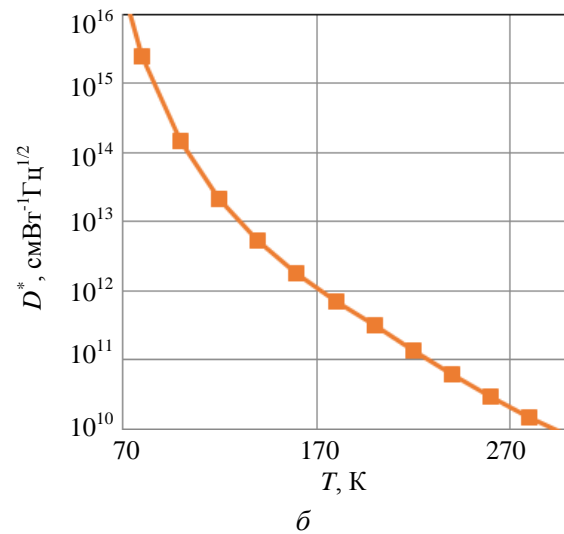


Рис. 6. Оценка параметров ФПУ с шагом $l_{\text{ФЧЭ}} = 15$ мкм на основе pVn -структуры с поглощающим слоем InAsSb: а – плотность тока шума; б – обнаружительная способность.

Анализ параметров pVn -структуры показал, что при рабочей температуре $T \approx 150$ К и плотности темного тока 6×10^{-10} А/см² значение обнаружительной способности достигает значений $D^* \geq 2,5 \times 10^{12}$ см Вг⁻¹ Гц^{1/2}.

Заключение

Для работы при повышенной температуре $T \approx 150$ К предложена pVn -архитектура на основе гетероструктуры GaAsSb/AlAsSb/InAsSb материалов группы A_3B_5 . Для pVn -структуры в качестве поглощающего слоя выбран тройной раствор InAsSb. Проведен расчет температурных зависимостей ширины запрещенной зоны слоев pVn -структуры, величина разрыва в валентной зоне составила 0,04 эВ при $T \approx 300$ К. По проведенным оценкам значение

обнаружительной способности превышает $D^* \geq 2,5 \times 10^{12}$ (см Вг⁻¹ Гц^{1/2}) при $T = 150$ К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gershon G., Avnon E., Brumer M., Freiman W., Karni Y., Niderman T., Ofer O., Rosenstock T., Seref D., Shiloah N., Shkedy L., Tessler R., Shtrichman I. / Infrared Technology and Applications XLIII, edited by Bjørn F. Andresen, Gabor F. Fulop, Charles M. Hanson, John Lester Miller, Paul R. Norton // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10177. P. 101771I.
2. Rzeghzi M. // Eur. Phys. J. AP. 2003. № 23. P. 149.
3. Varshni Y. P. // Physica. 1967. Vol. 34. Iss. 1. P. 149.
4. Martyniuk P., Rogalski A. // Opt. Quant Electron. 2014. № 46. P. 581.
5. Vurgafman I., Meyer J. R. // Journal of Applied Physics. 2001. Vol. 89. № 11. P. 5815.
6. Klipstein Philip // Optical Engineering. 2011. Vol. 50. № 6. P. 061002.

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

GaAsSb/AlAsSb/InAsSb barrier heterostructure for detection of the radiation in the spectra range of 3.1–4.2 μm

P. A. Vaganova^{1,2} and N. I. Yakovleva¹

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

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutsky per., Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia

Received March 23, 2020

A new pBn-architecture based on GaAsSb/AlAsSb/InAsSb heterostructure including n-type AlAsSb barrier layer, n-type InAsSb absorbing layer, p-type GaAsSb collector layer, for detection of the radiation in the spectra range of 3.1–4.2 μm have been developed and investigated. The structure presented don't have offset in the valence band, which is allows working in a wide range of voltage bias without depleting of the n-type InAsSb absorbing layer. AlAsSb barrier layer height in the conduction band was estimated to be in range of ~ 1.0 eV, that enough to eliminate the electron current. The dark current and the performance of the pBn-structure have been calculated. At optimal working conditions, such as the temperature $T \approx 150$ K and the dark current density $J \leq 6 \times 10^{-10}$ A/cm², detector's detectivity was estimated to be $D^ \geq 2.5 \times 10^{12}$ cmW⁻¹Hz^{1/2}.*

Keywords: barrier, pBn-structure, MWIR, InAsSb, Focal Plane Array (FPA), dark current.

REFERENCES

1. G. Gershon, E. Avnon, M. Brumer, W. Freiman, Y. Karni, T. Niderman, O. Ofer, T. Rosenstock, D. Seref, N. Shiloah, L. Shkedy, R. Tessler, and I. Shtrichman / Infrared Technology and Applications XLIII, edited by Bjørn F. Andresen, Gabor F. Fulop, Charles M. Hanson, John Lester Miller, Paul R. Norton // Proc. of SPIE **10177**, 101771I (2017).
2. M. Razeghi, Eur. Phys. J. AP, No. 23, 149 (2003).
3. Y. P. Varshni, Physica **34** (1), 149 (1967).
4. P. Martyniuk and A. Rogalski, Opt. Quant Electron, No. 46, 581 (2014).
5. I. Vurgaftman and J. R. Meyer, Journal of Applied Physics **89** (11), 5815 (2001).
6. Philip Klipstein, Optical Engineering **50** (6), 061002 (2011).