

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

Фотоприемные устройства коротковолнового ИК диапазона спектра, предназначенные для космического мониторинга

К. О. Болтарь, Н. И. Яковлева

Для задачи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в коротковолновом инфракрасном (ИК) диапазоне спектра наиболее перспективны матричные и многорядные фотоприемные модули коротковолнового инфракрасного (ИК) диапазона спектра на основе гетероэпитаксиальных структур материалов тройного раствора кадмий-ртуть-теллур (КРТ, HgCdTe) и тройного раствора индий-галлий-арсенид (InGaAs), чувствительные в спектральном диапазоне от 1 до 2,5 мкм. Анализируются возможные архитектуры фоточувствительных элементов, обеспечивающие пониженные темновые токи и шумы. Рассматриваются пути совершенствования и исследуются темновые токи и параметры гетероструктур n-оп-p-типа на основе HgCdTe в широком температурном диапазоне, а также параметры барьерных структур p+-B-n-N+-типа на основе InGaAs.

Ключевые слова: HgCdTe, InGaSb, фотоприемное устройство (ФПУ), темновой ток, обнаружительная способность.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-128-138

Введение

Для космического мониторинга окружающей среды и изучения физических явлений на поверхности Земли и в атмосфере с помощью бортовых космических комплексов необходимы фотоприемные устройства (ФПУ) мегапиксельного формата, предназначенные для

получения информации в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне от 1 до 2,5 мкм.

Параметры ИК ФПУ, детектирующих излучение в области спектра от 1 до 2,5 мкм зависят как от исходных характеристик гетероэпитаксиальных структур, так и совершенствования технологии изготовления МФЧЭ и БИС считывания. К наиболее важным критериям качества следует отнести: пороговые характеристики (обнаружительную способность D^* и пороговую мощность $P_{\text{пор}}$); разброс характеристик по матрице фоточувствительных элементов (МФЧЭ); формат; размер фоточувствительного элемента (ФЧЭ); скорость считывания и обработки данных.

В работе кратко рассматриваются пути совершенствования ИК ФПУ на основе перспективных фоточувствительных материалов (HgCdTe, InGaAs) коротковолновой области спектра с целью дальнейшего улучшения их фотоэлектрических параметров.

Болтарь Константин Олегович^{1,2}, начальник НТК, д.ф.-м.н.

Яковлева Наталья Ивановна¹, гл.н.с., д.т.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 1.03.2023

Принята к публикации 14.03.2023

© Болтарь К. О., Яковлева Н. И., 2023

1 Анализ фоточувствительных ИК-материалов коротковолнового ИК диапазона спектра

В таблице 1 представлены полупроводниковые соединения, чувствительные в коротковолновом (SWIR) ИК диапазоне спектра, ожидаемые диапазоны фоточувствительности и материалы подложек.

Материалы коротковолнового ИК диапазона спектра включают двойные, тройные и многокомпонентные полупроводниковые соединения, работающие на эффекте собственной проводимости, получаемые на оптически прозрачных подложках (табл. 1). Использование тройных (четверных и многокомпонент-

ных) соединений с настраиваемой на спектральный диапазон шириной запрещенной зоны является необходимым условием для создания фоточувствительных элементов сложной архитектуры с высокими фотоэлектрическими параметрами.

Анализ фоточувствительных ИК-материалов, пригодных для изготовления матричных и многорядных ФПУ коротковолнового ИК диапазона спектра выявляет на сегодняшний день два основных конкурентоспособных направления: ФПУ на основе тройных соединений кадмий-ртуть-теллур (КРТ, HgCdTe) [1–3] и ФПУ на основе тройных соединений индий-галлий-арсенид (InGaAs) [4–6].

Таблица 1

Полупроводниковые соединения коротковолнового ИК диапазона спектра, спектральные диапазоны чувствительности и материалы подложек

Полупроводниковое соединение	Подложка	Спектральный диапазон, мкм
PbS	NaCl	1,0–3,6
PbSe	BaF ₂	1,5–5,8
InSb	InSb	1,0–5,5
InAs	GaAs	1,0–3,1
Al _x Ga _{1-x} As (0 ≤ x ≤ 1)	GaAs	0,4–1,1
Ga _x In _{1-x} As	InP	0,4–2,5
Ga _{0,47} In _{0,53} As (0,4 ≤ x ≤ 0,6)	InP	0,9–1,7
Ga _x In _{1-x} As _y P _{1-y} (x = 0,47y; 0 ≤ y ≤ 1)	InP	1–3
Al _x Ga _{1-x} As _y Sb _{1-y} (x = 12y; 0 ≤ x ≤ 1)	GaSb	2–3
Ga _{1-x} In _x As _{1-y} Sb _y (x = 1,1y; 0 ≤ x ≤ 1)	GaSb	2–3
Hg _{1-x} Cd _x Te (0 ≤ x ≤ 1)	CdZnTe, GaAs, Ge, Si	1–16

2 Пути создания ФПУ на основе гетероструктур InGaAs и HgCdTe ИК области спектра от 1 до 2,5 мкм

На рис. 1 показаны возможные пути создания и совершенствования ФПУ на основе гетероструктур InGaAs и HgCdTe для детектирования ИК-излучения в области спектра от 1 до 2,5 мкм.

Основными задачами при проектировании ФПУ являются: выбор и оптимизация архитектуры ФЧЭ для достижения минимальных темновых токов; выбор схмотехники входной ячейки считывания фотосигнала; проектирование встроенной электроники обработки данных, обеспечивающей суммирование фо-

тосигналов с последующей заменой дефектных элементов непосредственно в зоне криостатирования; методология обработки и анализа данных при измерении параметров многодиапазонных ФПУ. Дополнительно к ФПУ предъявляются жесткие требования по достижению предельных фотоэлектрических параметров.

Анализ методов эпитаксиального выращивания фоточувствительных материалов HgCdTe и InGaAs проводился для различных технологий выращивания, разработанных в РФ. Общие сведения по основным методам и режимам выращивания фоточувствительных структур HgCdTe и InGaAs представлены в таблице 2.



Рис. 1. Пути создания многоэлементных ФПУ на основе гетероструктур InGaAs и HgCdTe для детектирования ИК-излучения в области спектра от 1 до 2,5 мкм

Таблица 2

Фирма-производитель	ИФП СО РАН, Новосибирск	ИФП СО РАН, Новосибирск	Гиредмет, Москва	ИХВВ РАН, Н.-Новгород	НИИ Полус, Москва
Метод выращивания	МЛЭ HgCdTe	МЛЭ HgCdTe	ЖФЭ HgCdTe	МОСГЭ HgCdTe	МОСГЭ InGaAs
Подложка	GaAs (013)	Si (310)	CdZnTe, (111)B	GaAs (310)	InP (100)
Диаметр подложки, мм	50; 76	50; 76; 100	30; 40	50; 76	50
Температура, град.	160–200	160–200	340–370	275–400	620–650
Скорость роста, мкм/час	1–2	1–2	10–30	2–10	2–10
Поглощающий слой	<i>p/n</i>	<i>p/n</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>n</i>
Тип структуры	<i>n-on-p/p-on-n</i>	<i>n-on-p/p-on-n</i>	<i>n-on-p</i>	<i>n-on-p</i>	<i>p-i-n</i>
Легирование <i>p</i> -типа	VHg As	VHg As	VHg Au	VHg	Cd; Zn
Легирование <i>n</i> -типа	In	In	In	In	Si
Концентрация легирующей примеси в слое поглощения, см ⁻³	(0,1–5)×10 ¹⁶ / (0,1–5)×10 ¹⁵	(0,1–5)×10 ¹⁶ / (0,1–5)×10 ¹⁵	(0,1–5)×10 ¹⁶	(0,1–5)×10 ¹⁶	(1,0–2,5)×10 ¹⁶
Состав, мол. дол.	0,2–0,45 (Cd)	0,3–0,45 (Cd)	0,2–0,45 (Cd)	0,3–0,45 (Cd)	0,53–0,8 (In)
Неоднородность состава, мол. дол.	± 0,002	± 0,005	± 0,003	± 0,005	± 0,0001
Плотность дислокаций, см ⁻²	(2–5)×10 ⁶	10 ⁷	< 10 ⁵	(2–5)×10 ⁶	< 10 ⁶

Методы подготовки подложек и выращивания исходных структур имеют огромное значение в процессе изготовления ИК ФПУ, поэтому для достижения высоких характеристик в первую очередь необходимо улучшать качество исходного материала подложек и кристаллическое совершенство гетероструктур.

Среди полупроводниковых материалов, чувствительных в коротковолновом ИК диапазоне спектра, тройное соединение HgCdTe остается лучшим с точки зрения достижения максимальных фотоэлектрических параметров, что связано с незначительным изменением периода кристаллической решетки материала КРТ от длины волны и возможностью

реализации архитектуры МФЧЭ с уменьшенным влиянием тепловых процессов. В течение последних двух десятилетий в России активно проводились исследования гетероструктур КРТ, получаемых различными эпитаксиальными методами [7]: жидкофазной (ЖФЭ) [8] (Гиредмет, Москва); молекулярно-лучевой (МЛЭ) [9] (ИФП СО РАН, Новосибирск); МОС-гидридной эпитаксии (МОС, МОСГЭ) из металлоорганических соединений [10] (ИХВВ РАН, Н.-Новгород).

В настоящее время опробованным промышленным методом получения ГЭС КРТ является метод жидкофазной эпитаксии на оптически прозрачных подложках CdZnTe (КЦТ), поскольку он обеспечивает лимитированное число дефектов, а, следовательно, минимальное количество неработающих элементов в мегапиксельных матрицах, необходимых для космических систем. Разработка и, соответственно, выпуск ГЭС КРТ на подложках КЦТ методом МЛЭ в РФ находятся на стадии разработки и пока не введены в промышленное производство.

ГЭС КРТ на подложках КЦТ диаметром 30–40 мм с толщиной слоев 10–20 мкм, составом x от 0,2 до 0,4 мольной доли CdTe и однородностью $\Delta x = \pm 0,003$ выращивают жидкофазной технологией в АО «Гиредмет». Концентрация и подвижность при $T = 77$ К составляют $p = (1 - 3) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $\mu \geq 200 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, время жизни неосновных носителей заряда $\tau \geq 20$ нс, плотность дислокаций находится на уровне $\leq 2 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$.

Параметры ИК ФПУ, помимо качества исходного материала, зависят от архитектуры ФЧЭ, конечной целью совершенствования которой является снижение темновых токов и шума ниже шума фонового излучения. К настоящему времени в РФ и за рубежом разработаны фотоэлементы различной архитектуры, в том числе: фоторезисторы, фотодиоды с p - n -переходом (как с гомопереходом, так и с гетеропереходом) [11, 12], фотоконденсаторы. На рис. 2 показаны две хорошо развитые технологии изготовления фотодиодов с p - n -переходом на основе HgCdTe: n - on - p фотодиод («Sofradir» Франция, [13], «Aim» Германия [14]) рис. 2а, и p - on - n фотодиод («Teledyne Scientific & Imaging» [15]) (рис. 2б).

Слой CdTe
Слой HgCdTe P -типа
 n -контакт
HgCdTe N +-типа
широкозонный
Поглощающий слой HgCdTe p -типа
Буферный слой
Подложка (CdZnTe - КЦТ)

Слой CdTe
 p -контакт
HgCdTe P +/-типа
Слой N -HgCdTe широкозонный
Поглощающий слой HgCdTe n -типа
Буферные слои
Подложка (CdZnTe - КЦТ)

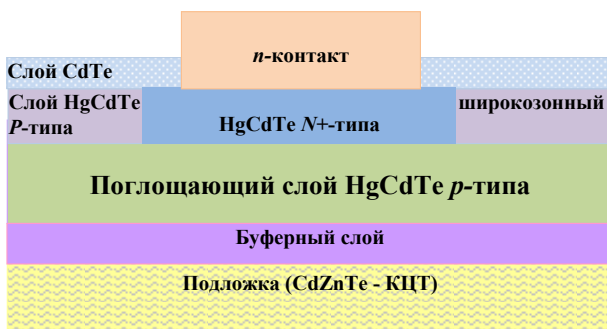
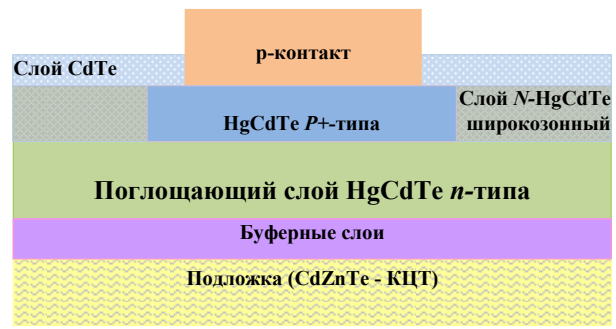
а) n - on - p фотодиодб) p - on - n фотодиод

Рис. 2. Архитектура фоточувствительного элемента

P - n -переход в материале КРТ формируется с использованием различных технологий, включая: внешнее легирование в процессе роста слоев p - или n -типа, ионную имплантацию, диффузию ртути, диффузию примесей или преобразование типа. Например, гомопереходы n - on - p могут быть сформированы путем имплантации легирующей примеси n -типа в материал HgCdTe p -типа проводимости [16]. Наличие избыточной ртути Hg приводит к вакансионному легированию p -типа материала КРТ [17]. Преобразование материала p -типа в

n -тип обычно проводится с использованием технологических методов, например, таких как плазменная или ионная обработка. Если материал HgCdTe выращивается методом МЛЭ, p - n -переход может быть сформирован как в процессе роста, так и с помощью внешнего легирования. Обе гетероструктуры n - on - p и p - on - n имеют недостатки. Для планарной n - on - p архитектуры характерны повышенные темновые токи и малое время жизни неосновных носителей заряда при использовании вакансионно-легированного материала КРТ

p -типа проводимости. Для архитектуры с n -базой (p - on - n) наблюдаются сложности в технологии ионной имплантации и активации примеси мышьяка, которая необходима для формирования областей p -типа.

На рис. 3 показаны результаты расчетов обнаружительной способности в зависимости от длины волны и температуры данных архи-

тектур ФЧЭ, концентрации поглощающего слоя выбраны наиболее близкими к собственному значению (диффузионно ограниченный вариант): p - on - n -архитектура (сплошные линии) с концентрацией доноров $N_D \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и n - on - p -архитектура (штриховые линии) для областей p -типа с концентрацией акцепторов $N_A \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

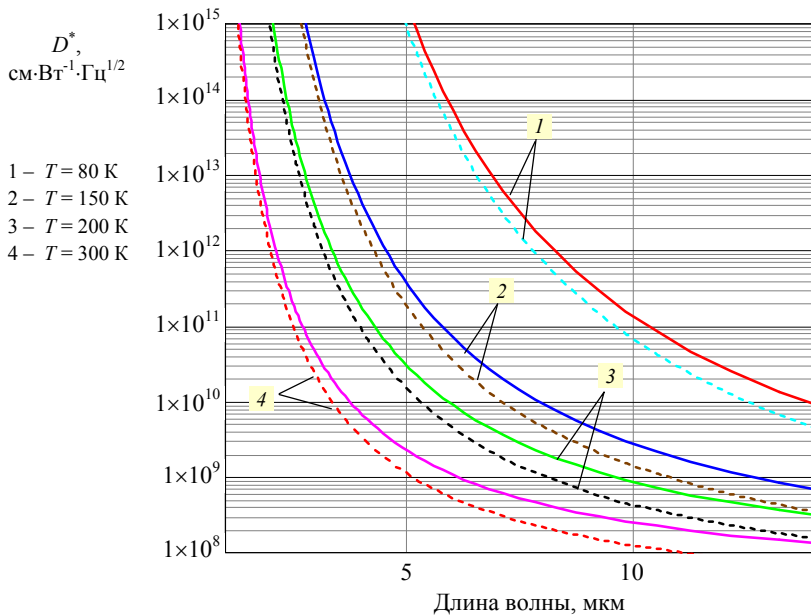


Рис. 3. Расчетные значения обнаружительной способности двух архитектур ФЧЭ на основе КРТ: p - on - n (сплошные линии) n - on - p (штриховые линии)

На основании расчетов получено, что p - on - n структура обладает меньшим темновым током и, следовательно, имеет более высокие фотоэлектрические параметры, что также подтверждается и исследованиями мировых разработчиков фотоэлектроники [18], поэтому разработка и исследование структур p - on - n -типа является крайне актуальной задачей. Преимущество p - on - n -архитектуры достигается также за счет выбора уровня легирования области поглощения, близкого к собственному значению, как для областей n -типа концентрация доноров составляет $N_D \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Для структуры p - on - n -типа при наличии вакансионного легирования в поглощающем слое p -типа $N_{VA} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, снижение обнаружительной способности по сравнению с p - on - n -архитектурой составит более порядка.

Успешное конструирование зонной структуры и совершенствование технологии изготовления выводят ФПУ на основе InGaAs на ведущие позиции в фотоэлектронике SWIR-диапазона. Гетероструктуры InGaAs, чувствительные в коротковолновом ИК диапазоне спектра 0,9–1,7 мкм, рассматриваются как альтерна-

тива материалу HgCdTe. На рис. 4а,б представлены многослойная p + B / n / n + архитектура на основе InGaAs и ее зонная диаграмма.

Отечественные гетероэпитаксиальные структуры InGaAs выращиваются в АО «НИИ «Полнос» им. М. Ф. Стельмаха (Москва) МОС-гидридной эпитаксией из металлоорганических соединений. Они имеют высокое кристаллическое совершенство с минимальным числом ростовых дефектов. Для повышения параметров в АО «НПО «Орион» предложена, реализована и исследована барьерная архитектура ФЧЭ p + B / n / n + типа со сверхмалыми темновыми токами и шумами, обеспечивающая предельные параметры в рабочем спектральном диапазоне 0,9–1,7 мкм [19]. По своей сути p + B / n / n + архитектура ФЧЭ основывается на p - i - n -структуре, в области ОПЗ которой размещается широкозонный барьерный слой (B). Барьерный слой блокирует ток основных носителей заряда (электронов), а поскольку располагается в области p - n -перехода, то существенно уменьшает токи туннелирования и генерации-рекомбинации через центры ШРХ.

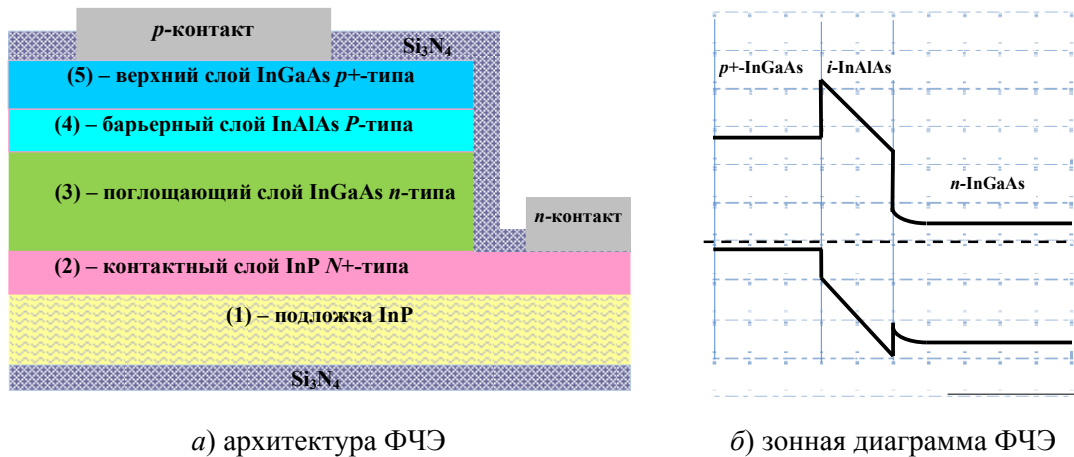


Рис. 4. Многослойная $p^+/B/n/n^+$ -архитектура ФЧЭ на основе InGaAs (а) и ее зонная диаграмма (б) с широкозонным барьерным слоем в области p - n -перехода

Выбор технологических решений изготовления МФЧЭ на основе перспективных фоточувствительных материалов, как правило, связан с возможностью достижения высоких фотоэлектрических параметров, что обеспечивается разработанными в АО «НПО «Орион» планарной и меза-структурной технологиями [20, 21].

3 Исследование параметров ФПУ на основе ГЭС КРТ

Проведен комплекс исследований температурных зависимостей параметров многорядных ФПУ на основе ГЭС КРТ, предназначенных для систем космического мониторинга. Исследовались температурные зависимости: спектральной характеристики чувствительности, удельной обнаружительной способности, отношения сигнал-шум, темнового тока. ФПУ изготавливались на основе n - on - p -архитектуры с поглощающим слоем состава $x \sim 0,44$ мол. дол. и уровнем легирования $N_A \leq 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ коротковолнового ИК диапазона спектра, граничная длина волны составила $\lambda_{0,5} \approx 2,5 \text{ мкм}$.

Исследования спектральных характеристик проводились на ИК-Фурье спектрометре «Vertex-70» фирмы «Bruker» (Германия) в диапазоне температур $T = 80\text{--}300 \text{ К}$. На рис. 5 показаны температурные зависимости: (1) – граничной длины волны; (2) – максимума спектральной характеристики чувствительности ФПУ на основе HgCdTe.

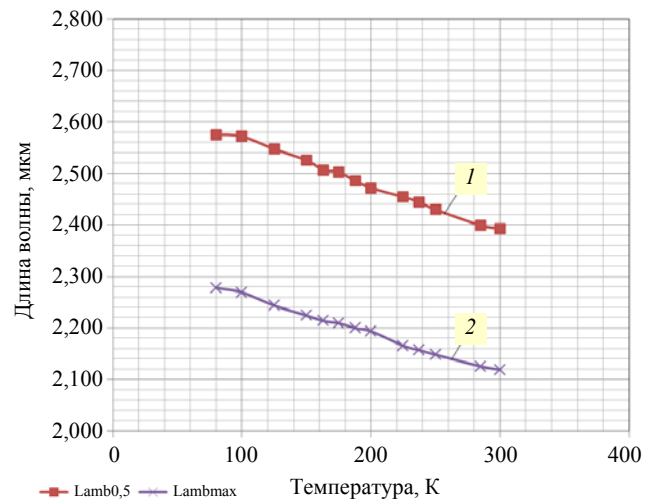


Рис. 5. Температурные зависимости: (1) граничной длины волны; (2) длины волны максимума спектральной фоточувствительности

Показано, что состав рабочего поглощающего слоя ГЭС КРТ выбирается таким образом, чтобы в рабочем диапазоне температур ($T = 100\text{--}200 \text{ К}$) граничная длина волны соответствовала заданному значению ($\lambda \sim 2,5 \text{ мкм}$). Температурные исследования спектральной чувствительности ФПУ в рабочем диапазоне температур ($T = 100\text{--}200 \text{ К}$) подтвердили нахождение максимума фоточувствительности в заданном спектральном диапазоне $\Delta\lambda = 2,5\text{--}2,55 \text{ мкм}$ и правильность выбора состава поглощающего слоя $x \sim 0,44$ мол. дол.

На рис. 6 представлена типичная вольт-амперная ВАХ фотодиода при $T = 100 \text{ К}$.

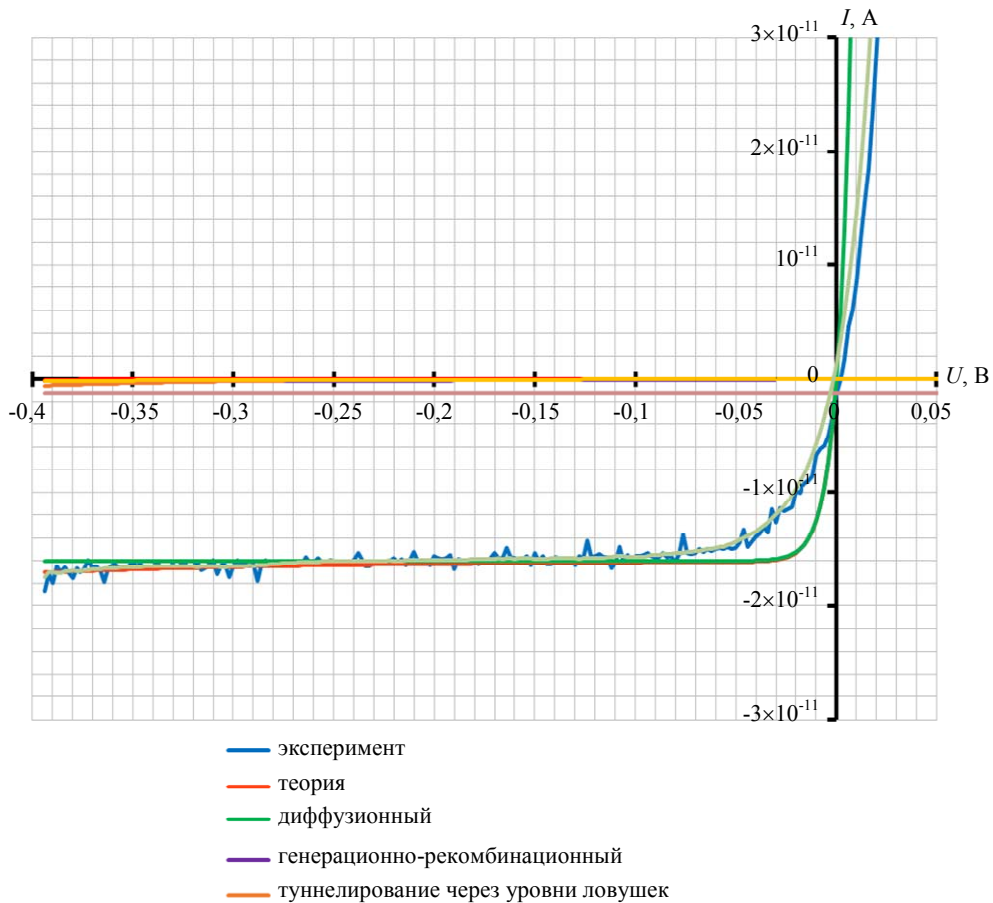


Рис. 6. Типичная ВАХ фотодиода при $T = 100\text{ K}$

Температурные исследования темновых токов ФПУ мегапиксельного формата, изготовленных на основе $n\text{-on-p}$ -архитектуры HgCdTe с поглощающим слоем состава $x = 0,44$ мол. дол. проводились в области температур $\Delta T = 80\text{--}300\text{ K}$ с целью выявления влияния отдельных составляющих. На рис. 7

показаны результаты моделирования температурной зависимости темнового тока, полученного в результате сложения отдельных составляющих: диффузии, генерации-рекомбинации ШРХ и вакансионной составляющей (при наличии вакансий ртути).

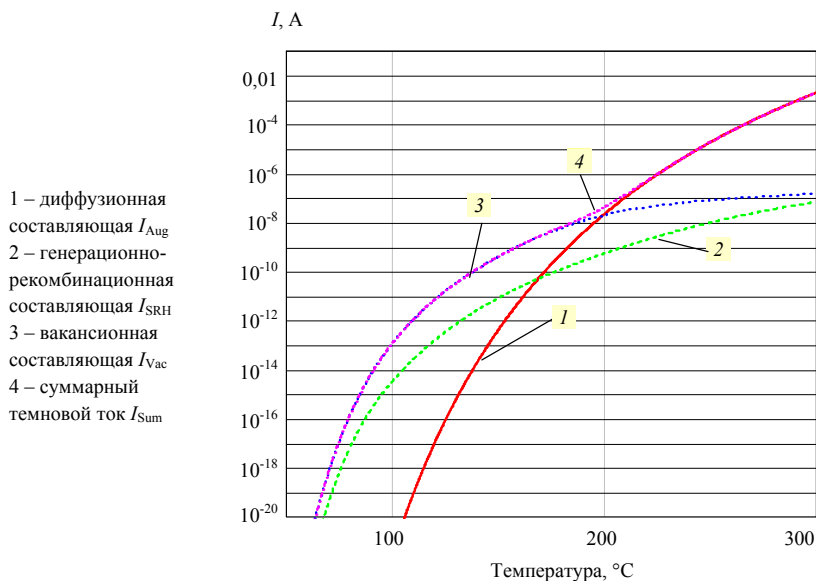


Рис. 7. Температурная зависимости темнового тока фотодиода на основе HgCdTe с поглощающим слоем состава $x = 0,44$ мол. дол.

Моделирование температурной характеристики темнового тока с учетом основных механизмов тепловой генерации-рекомбинации показало, что основными являются токовые механизмы диффузии и генерации-рекомбинации ШРХ, туннельная составляющая темнового тока незначительна. Из графика видно, что в области высоких температур темновой ток определяется диффузионными процессами вследствие тепловой генерации-рекомбинации по механизму Оже. В температурном диапазоне $T = 100\text{--}300\text{ К}$ значения темнового тока изменяются от 10^{-13} до 10^{-4} А. При температуре $T = 170\text{ К}$ темновой ток составляет $\sim 10^{-9}$ А. Токовая составляющая через глубокие уровни ШРХ в вакансионно-легированном (VHg) материале КРТ дает существенный вклад в суммарный темновой ток в области низких температур ($T \leq 100\text{ К}$). Дополнительное уменьшение геометрических размеров ФЧЭ до величины $\sim 10 \times 10\text{ мкм}^2$ и

выбора шага ФЧЭ менее 15 мкм , характерных для современных МФЧЭ, потребуют дополнительной оценки длины диффузии неосновных носителей заряда и коэффициента взаимосвязи между соседними ФЧЭ.

4 Исследования параметров ФПУ на основе ГЭС InGaAs

На рис. 8 представлена температурная зависимость суммарного темнового тока фотодиода спектрального диапазона $0,9\text{--}1,7\text{ мкм}$, изготовленного $p+/B/n/n+$ -архитектуре ФЧЭ на основе InGaAs, при рабочем напряжении смещения, а также температурные зависимости различных составляющих темнового тока (J_{sum} – суммарный темновой ток, J_{dif} – диффузионная и $J_{\text{g-r}}$ – генерационно-рекомбинационная составляющие; $J_{\text{ТАТ}}$ – ток туннелирования через уровни ловушек; $J_{\text{ВТВ}}$ – ток туннелирования зона-зона).

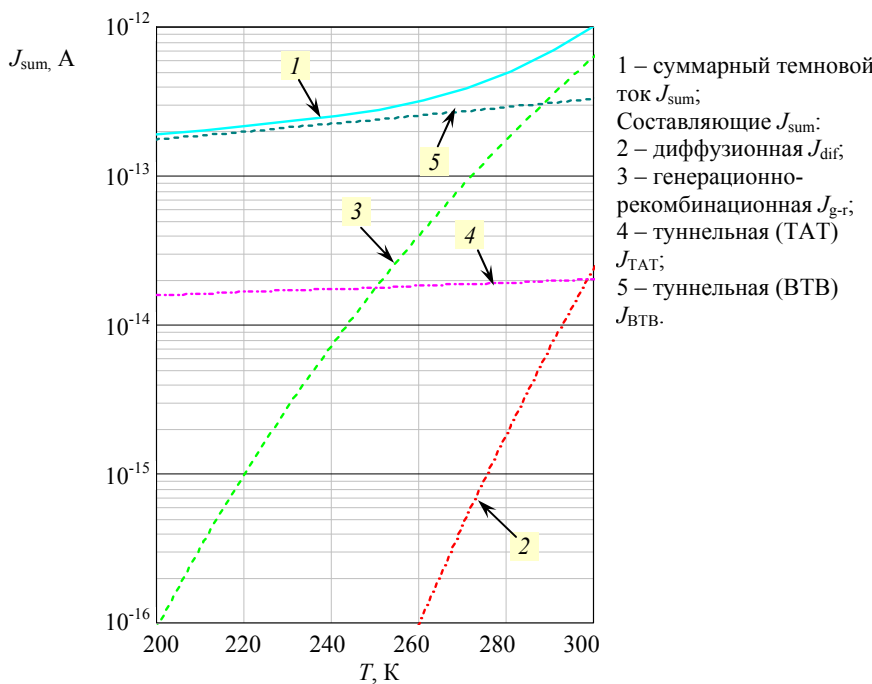


Рис. 8. Темновой ток и его составляющие в зависимости от температуры для фотодиода, изготовленного $p+/B/n/n+$ -архитектуре ФЧЭ на основе InGaAs, при рабочем напряжении смещения

Из рис. 8 следует, что в диапазоне температур $270\text{--}300\text{ К}$ у фотодиода, изготовленного $p+/B/n/n+$ -архитектуре ФЧЭ на основе InGaAs, преобладают токи генерации-рекомбинации ШРХ и туннелирования через уровни ловушек в запрещенной зоне; в области температур $200\text{--}270\text{ К}$ основной вклад в суммарный ток вносят токи туннелирования. Наблюдается значительное уменьшение тока диффузии во всем диапазоне смещений, что

является итогом включения в состав архитектуры ФЧЭ барьерного слоя. Характеристическая температура фотодиода составляет $T = 290\text{ К}$. При достижении данной температуры темновые токи существенно не снижаются, поэтому эта температура может быть выбрана рабочей. Примененные при изготовлении МФЧЭ технология меза-травления и защита боковых поверхностей слоем диэлектрика позволили уменьшить поверхностные

темновые токи и добиться высоких фотоэлектрических параметров.

На рис. 9 для ФПУ на основе InGaAs формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм спектрального диапазона 0,9–1,7 мкм представлены зависимости среднего значения удельной обнаружительной способности D^* и пороговой мощности P при рабочих временах накопления. Значение емкости накопления в ячейках БИС составляло 10 фФ.

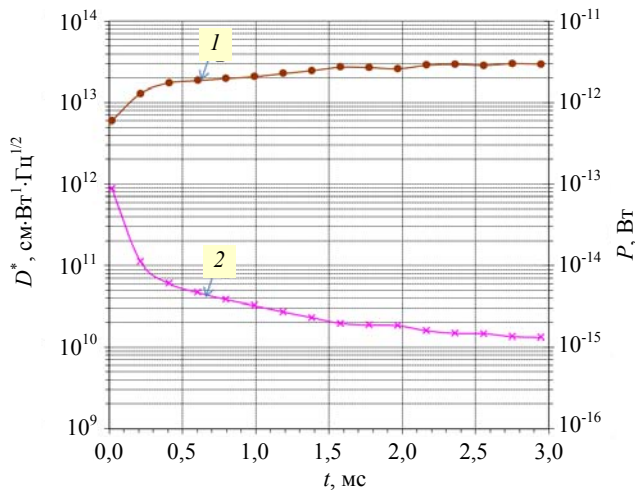


Рис. 9. Основные параметры ИК ФПУ на основе InGaAs формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм

Достигнутые высокие значения D^* в широком диапазоне времен накопления подтверждают эффективность использования $p^+/B/n/n^+$ -архитектуры на основе InGaAs с широкозонным барьерным слоем.

Наиболее изученным является соединение InGaAs с содержанием арсенида индия $x = 0,53$ мол. дол., что соответствует постоянной кристаллической решетки подложки InP, при этом граничная длина волны соединения InGaAs доходит до значения 1,7 мкм. Для того, чтобы сместить граничную длину волны в область более длинных волн используется материал $In_xGa_{1-x}As$ с содержанием InAs в тройном растворе $x = 0,6–0,8$ мол. дол. Известно, что при этом возникает нежелательное для характеристик прибора рассогласование кристаллических решеток подложки InP и фоточувствительного слоя $In_xGa_{1-x}As$. Поэтому для создания ФПУ на основе InGaAs с граничной длиной волны 2,5 мкм необходимо усовершенствование методов выращивания, обеспечивающих малую плотность структурных дефектов и дислокаций. Например, для

компенсации рассогласования в гетероструктуру добавляется варизонный буферный слой $InAs_yP_{1-y}$ с градиентным изменением состава (graded index InAsP layer with increasing As content). При значениях состава $x = 0,83$ мол. дол. и $y = 0,63$ мол. дол. достигается оптимальное кристаллическое соответствие и требуемая граница фоточувствительности $\sim 2,5$ мкм. Рабочую температуру ФПУ на основе $In_xGa_{1-x}As$ состава $x \geq 0,6$ мол. дол. необходимо понизить на 30–40° по сравнению с приборами, работающими в спектральном диапазоне 0,9–1,7 мкм, что достигается применением термоэлектрического охладителя с потребляемой мощностью 3–5 Вт или радиационным холодильником несложной конструкции, устанавливаемым на борту космического аппарата.

5 Заключение

Положительный опыт, накопленный при разработке гетероэпитаксиальных структур на основе фоточувствительных материалов HgCdTe и InGaAs позволяет эффективно решить проблему создания высокочувствительных фотоприемных устройств, чувствительных в спектральном диапазоне от 1 до 2,5 мкм. В статье проведен анализ возможных архитектур ФЧЭ, обеспечивающих пониженные темновые токи: для ФПУ на основе HgCdTe выбрана архитектура $n-on-p$ -типа; для ФПУ на основе InGaAs выбрана барьерная структура $p^+-B-n-N^+$ -типа, что позволило уменьшить темновые токи, а, следовательно, шумы, возникающие вследствие различных механизмов рекомбинации. Высокие фотоэлектрические параметры достигнуты как у ИК ФПУ на основе ГЭС HgCdTe, так и на основе ГЭС InGaAs. Применение данных ИК ФПУ ожидается в оптико-электронных системах космического мониторинга, необходимых для успешного решения задач ДЗЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131–162.
2. Joshi Abhay M., Heine Frank, Feifel Thomas. / Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6220. P. 622003-1–622003-14. DOI: 10.1117/12.666055

3. Rogalski A. / Rep. Prog. Phys. 2005. Vol. 68. P. 2267–2336.
4. Lei Wen, Antoszewski Jarek, Faraone Lorenzo. / Applied Physics Reviews. 2015. Vol. 2. P. 041303.
5. Piotrowski J., Rogalski A. High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors. – Bellingham: SPIE Press, 2007.
6. Болтарь К. О., Чинарева И. В., Лопухин А. А., Яковлева Н. И. / Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10–15.
7. Boltar K. O., Burlakov I. D., Ponomarenko V. P., Filachov A. M. / Proc. SPIE. 2009, Vol. 7298. P. 72982P-1–72982P-15.
8. ТУ 1778-293/0-0198396-05.
9. ТУ 1778-004-03533808-2005.
10. ТУ 1778-002-05818248-12.
11. William L. A. Planar Double-Layer Heterojunction HgCdTe Photodiodes And Methods For Fabricating Same. Patent US 5.189.297, 1998.
12. Wijewamasuriya P. S., Zandian M., Edwall D. D., McLevige M. V., Chen C. A., Pasko J. G., Hildebrandt H., Chen A. C., Arias J. M., D'Souza A. I., Rujirawat S., Sivannanthan S. / J. Electron. Mater. 1998. № 27. P. 54649.
13. Vuillermet M., Billon-Lanfrey D., Reibel Y., Manissadjian A., Mollard L., Baier N., Gravrand O., Destéfanis G. / Infrared Technology and Applications XXXVIII. / Proc. of SPIE. 2012. Vol. 8353. P. 83532K.
14. Lutz H., Breiter R., Eich D., Figgemeier H., Fries P., Rutzinger S., Wendler J. / Proc. of SPIE. 2016. Vol. 9819. P. 98191Y.
15. Bai Y., Bajaj J., Beletic J. W., Farris M. C., Joshi A., Lauxtermann S., Petersen A., Williams G. / Proc. SPIE. 2008. Vol. 7201. P. 702102.
16. Мынбаев К. Д., Иванов-Омский В. И. / ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 1. С. 3–22.
17. Мынбаев К. Д., Шияев А. В., Баженов Н. Л., Ижнин А. И., Ижнин И. И., Михайлов Н. Н., Варавин В. С., Дворецкий С. А. / Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. Вып. 3. С. 379–384.
18. Castelein P., Baier N., Gravrand O., Mollard L., Brellier D., Rochette F., Kerlain A., Rubaldo L., Reibel Y., Destéfanis G. / Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9070. P. 90702Y.
19. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В., Никонов А. В. / Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 5. С. 465–470.
20. Головин С. В., Бурлаков И. Д., Каушуба А. С. Способ изготовления матричного фотоприемника. Пат. RU 2340981 С1. 2007.
21. Седнев М. В., Болтарь К. О., Шаронов Ю. П., Лопухин А. А. / Прикладная физика. 2014. № 4. С. 51–55.

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

Improvement of SWIR photodetectors intended for space monitoring

K. O. Boltar^{1,2} and N. I. Iakovleva¹

¹Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

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

Received 1.03.2023; accepted 14.03.2023

SWIR photodetectors based on heteroepitaxial structures of ternary solution of cadmium mercury telluride (MCT, HgCdTe) and indium gallium arsenide (InGaAs), sensitive in the spectral range from 1 to 2.5 μm , are the most promising for space monitoring. This work presents a review on the recent progress in photosensitive element architectures, and future challenges for SWIR detectors technologies, including materials and forming methods of HgCdTe n-on-p-structures and InGaAs p+-B-n-N+-structures. Current performances of SWIR HgCdTe and InGaAs photodetectors have been investigated in wide temperature range.

Keywords: HgCdTe, InGaSb, FPA, Dark current, Detectivity.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-128-138

REFERENCES

1. Burlakov I. D., Grinchenko L. Y., Dirochka A. I. and Zaletaev N. B., *Usp. Pril. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **2** (2), 131–162 (2014) [in Russian].
2. Joshi Abhay M., Heine Frank and Feifel Thomas, *Proc. of SPIE* **6220**, 622003-1-622003-14 (2006), DOI: 10.1117/12.666055
3. Rogalski A., *Rep. Prog. Phys.* **68**, 2267–2336 (2005).
4. Lei Wen, Antoszewski Jarek and Faraone Lorenzo, *Applied Physics Reviews* **2**, 041303 (2015).
5. Piotrowski J. and Rogalski A., *High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors*, Bellingham, SPIE Press, 2007.
6. Boltar K. O., Chinareva I. V., Lopuhin A. A. and Iakovleva N. I., *Applied Physics*, № 5, 10–15 (2013) [in Russian].
7. Boltar K. O., Burlakov I. D., Ponomarenko V. P. and Filachov A. M., *Proc. SPIE* **7298**, 72982P-1–72982P-15 (2009).
8. TU 1778-293/0-0198396-05.
9. TU 1778-004-03533808-2005.
10. TU 1778–002–05818248–12.
11. William L. A., Planar Double-Layer Heterojunction HgCdTe Photodiodes And Methods For Fabricating Same: Patent US 5.189.297 (1998).
12. Wijewamasuriya P. S., Zandian M., Edwall D. D., McLevige M. V., Chen C. A., Pasko J. G., Hildebrandt H., Chen A. C., Arias J. M., D'Souza A. I., Rujirawat S. and Sivananthan S., *J. Electron. Mater.*, № 27, 54649 (1998).
13. Vuillermet M., Billon-Lanfrey D., Reibel Y., Manissadjian A., Mollard L., Baier N., Gravrand O. and Destéfanis G., *Proc. of SPIE* **8353**, 83532K (2012).
14. Lutz H., Breiter R., Eich D., Figgemeier H., Fries P., Rutzinger S. and Wendler J., *Proc. of SPIE* **9819**, 98191Y (2016).
15. Bai Y., Bajaj J., Beletic J. W., Farris M. C., Joshi A., Lauxtermann S., Petersen A. and Williams G., *Proc. SPIE* **7201**, 702102 (2008).
16. Mynbaev K. D. and Ivanov-Omskii V. I., *Physics and technical of semiconductors* **40** (1), 3–22 (2006).
17. Mynbaev K. D., Shilyaev A. V., Bazheno N. L., Izhnin A. I., Izhnin I. I., Mikhailov N. N., Varavin V. S. and Dvoretzky S. A., *Physics and technical of semiconductors* **49** (3), 379–384 (2015).
18. Castelein P., Baier N., Gravrand O., Mollard L., Brellier D., Rochette F., Kerlain A., Rubaldo L., Reibel Y. and Destéfanis G., *Proc. of SPIE* **9070**, 90702Y (2014).
19. Iakovleva N. I., Boltar K. O., Sednev M. V. and Nikonov A. V., *Usp. Pril. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **4** (5), 465–470 (2016).
20. Golovin C. V., Burlakov I. D. and Kashuba A. S. *Focal Plane Array and methods of fabricating same* № 2340981 C1 (RF). 2007.
21. Sednev M. V., Boltar K. O., Sharonov Y. P. and Lopukhin A. A., *Applied Physics*, № 4, 51–55 (2014) [in Russian].