

УДК 621.383.4/5

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

Фотоприемные устройства на основе гомо- и гетероструктур двойных и тройных соединений группы антимоноидов

К. О. Болтарь, А. А. Лопухин, П. В. Власов, Н. И. Яковлева

Исследованы фотоприемные устройства (ФПУ), детектирующие излучение в средневолновом инфракрасном (ИК) диапазоне спектра, изготовленные на основе многослойных структур антимоноидов с поглощающими слоями $InSb$, $Al_xIn_{1-x}Sb$ и $InAs_{1-x}Sb_x$ в том числе структуры с барьерными слоями $InAlSb$ ($InSb/InAlSb/InSb$) и $InAsSb$ ($InAsSb/AlAsSb/InAsSb$), предназначенные для оптико-электронных систем и приборных комплексов. Изготовлены фоточувствительные элементы (ФЧЭ) различной топологии, показано, что широкозонные тройные растворы $Al_xIn_{1-x}Sb$ и $InAs_{1-x}Sb_x$ являются альтернативой узкозонному бинарному соединению $InSb$, поскольку фотодиоды на их основе имеют меньшие темновые токи, а, следовательно, шумы. Рассчитаны средние значения обнаружительной способности и эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) ФПУ, изготовленных на основе матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ) различной топологии.

Ключевые слова: MWIR, эпитаксиальные слои $InSb$, матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ), темновой ток.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-381-388

1 Введение

Для обеспечения круглосуточной и всепогодной работы, решения задачи поиска, обнаружения и распознавания объектов и целей на значительном расстоянии в любое время суток служат оптико-электронные системы (ОЭС), представляющие собой сложные приборные комплексы. Они состоят из разнородных по физическому принципу построения каналов, функционально связанных друг с другом системами связи, навигации, компьютерными сетями и различными датчиками. В состав ОЭС входят как видимые, так и тепловизионные каналы, используемые для работы при низких уровнях освещенности, а также в сумерках и ночью.

Тепловизионные каналы, как правило, выполняются на базе матричных ФПУ второго поколения, детектирующих излучение в средневолновом и/или длинноволновом ИК диапазонах спектра.

Основным узлом, принимающим тепловое излучение, является фотоприемное устройство (ФПУ) формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм , ФПУ имеет высокое разрешение и формирует изображение в фокальной плоскости ОС в средневолновом ИК диапазоне спектра при рабочей температуре $T = 77 \text{ К}$. Дальнейшее развитие фотоэлектронных комплексов и оптико-электронных систем требует не только адаптации отечественных ФПУ в аппаратуре Заказчика, но и их совершенствования, т. е. уменьшения габаритов, рассеиваемой мощности, повышения рабочей температуры при сохранении высоких фотоэлектрических параметров, что включает поиск и разработку новых полупроводниковых материалов; построение новых архитектур матриц ФЧЭ со сверхмалыми темновыми токами; конструирование специальной электроники считывания фотосигнала, обеспечивающей работу в различных режимах реального времени; создание электроники управления и обработки данных.

Значительный прогресс в разработке специальных архитектур фоточувствительного элемента позволяет говорить о создании в средневолновом ИК-диапазоне (MWIR) ФПУ нового поколения.

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

Лопухин Алексей Алексеевич¹, начальник участка, к.т.н.

Власов Павел Валентинович¹, вед. инженер.

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 16 июня 2022 г.

© Болтарь К. О., Лопухин А. А., Власов П. В., Яковлева Н. И., 2022

На рис. 1 показаны наиболее часто используемые материалы в средневолновом ИК диапазоне спектра. К ним в первую очередь относятся (рис. 1): материалы группы A_2B_6 – теллуриды кадмия-ртути (КРТ, HgCdTe) и материалы группы A_3B_5 – антимониды и фосфиды индия-мышьяка (InAsSb, InAsSbP).

Для создания ФПУ нового класса проводятся интенсивные исследования в направлении совершенствования структур на основе различных соединений группы антимонидов, таких как сверхрешетки второго типа InAs/GaSb, а также на основе сложных многокомпонентных соединений AlGaAsSb, GaInAsSb и др. [1, 2]). Вследствие успешного формирования архитектур ФЧЭ на ос-

нове XVn -структур и сверхрешеток с барьерными слоями, имеющих нулевое смещение в валентной зоне, они находят широкое использование в высокотемпературных применениях [3].

Здесь рассматриваются свойства перспективных гомо- и гетероструктур на основе двойных и тройных растворов группы антимонидов (InSb, $Al_xIn_{1-x}Sb$ и $InAs_{1-x}Sb_x$), используемых при изготовлении матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ) и особенности конструирования ФПУ средневолнового ИК диапазона спектра. Разработка и исследование таких гомо- и гетероструктур, а также матричных ФПУ с высокими фотоэлектрическими характеристиками на их основе, составляют цель работы.

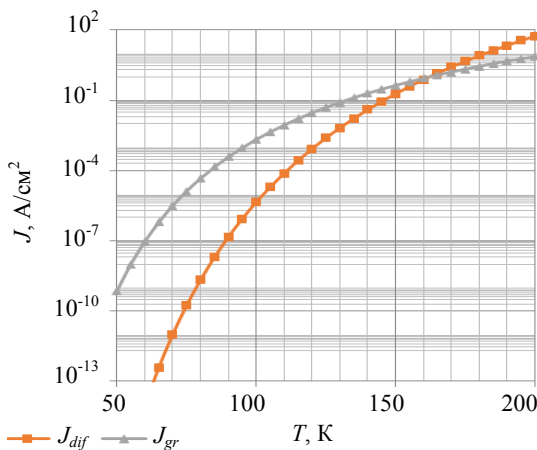


Рис. 1. Перспективные многослойные структуры и полупроводниковые материалы средневолнового инфракрасного диапазона спектра

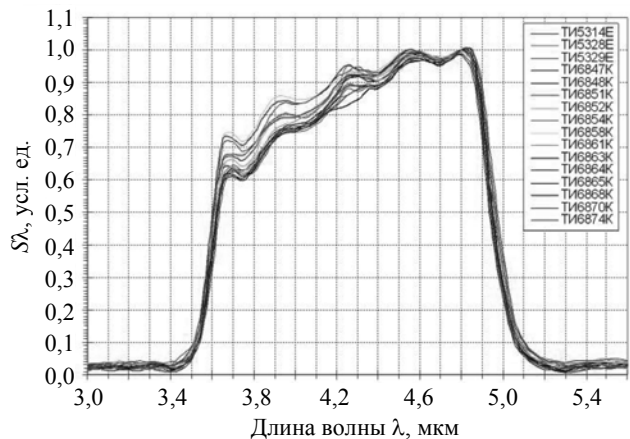
2 Основные направления создания перспективных полупроводниковых материалов

Матрица фоточувствительных элементов является критическим узлом ФПУ, поскольку от ее параметров зависят ТТХ ОЭС. Материалы, используемые для детектирования излучения в средневолновом ИК диапазоне спектра представлены на рис. 1. Типичным и широко используемым

материалом группы A_3B_5 является объемный антимонид индия (InSb) с шириной запрещенной зоны $E_g = 0,17$ эВ при $T = 300$ К и $E_g = 0,22$ эВ при $T = 80$ К, устойчивый к химическим, термическим и другим видам воздействий. На рис. 2, а, б представлены зависимости: (а) темного тока от температуры фотодиода на основе InSb; (б) спектральные характеристики фоточувствительности нескольких ФПУ на основе InSb.



а) температурные зависимости темновых токов: диффузии и генерации-рекомбинации ШРХ для ФЧЭ на основе InSb



б) спектральные характеристики чувствительности ФПУ на основе InSb

Рис. 2. Параметры фотодиода на основе InSb

Из расчетных температурных зависимостей темнового тока ФЧЭ на основе InSb (рис. 2а) следует, что наибольший вклад в суммарный темновой ток вносят ток диффузии в квазинейтральных областях и ток генерации-рекомбинации (G-R) через уровни Шокли-Рида-Холла (ШРХ) в области пространственного заряда, причем при низких температурах преобладает G-R составляющая темнового тока, а при высоких – диффузионная. На рис. 2б показаны спектральные характеристики чувствительности нескольких ФПУ на основе InSb, подтверждающие их работоспособность в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Из-за малого значения ширины запрещенной зоны объемного InSb, ФПУ на его основе требуют глубокого охла-

ждения (как правило, это температура жидкого азота $T = 77$ К при НКУ). Из-за преобладания механизма генерации-рекомбинации ШРХ при низких температурах такие ФПУ имеют повышенные шумы. Чтобы уменьшить шум вследствие механизма генерации-рекомбинации ШРХ в многослойные гетероструктуры из антимонидов включают слои на основе тройных растворов: $Al_xIn_{1-x}Sb$ или $InAs_{1-x}Sb_x$.

На рис. 3 показаны результаты расчета температурной зависимости ширины запрещенной зоны E_g трех соединений на основе сурьмы, которые наиболее часто используются для области поглощения: а) InSb [2]; б) $Al_xIn_{1-x}Sb$ [4]; в) $InAs_{1-x}Sb_x$ [5].

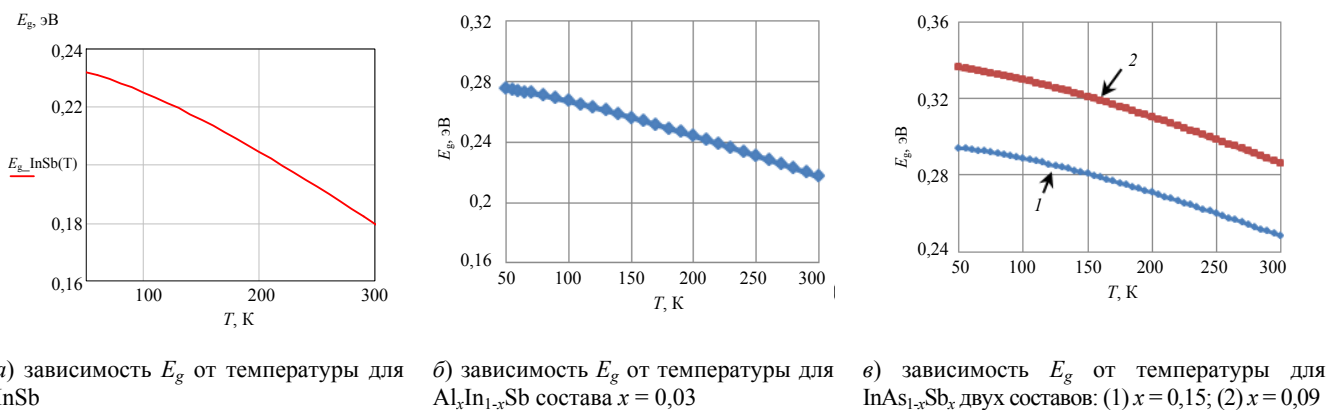


Рис. 3. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны для материалов на основе сурьмы: а) InSb; б) $Al_xIn_{1-x}Sb$; в) $InAs_{1-x}Sb_x$

Из рис. 3б и 3в видно, что тройные растворы более широкозонны по сравнению с бинарным соединением InSb (рис. 3а), что подтверждает возможность эффективного уменьшения G-R-процессов в структурах, а следовательно, снижения собственных шумов МФЧЭ. Выбор тройных растворов для области поглощения определяется возможностью применения принципов конструи-

рования зонной диаграммы, что позволяет уменьшить темновые токи.

На рис. 4 представлены температурные зависимости обнаружительной способности для ФПУ на основе двойного и тройных растворов сурьмы, демонстрирующие достижение повышения значений D^* для ФПУ на основе тройных растворов.

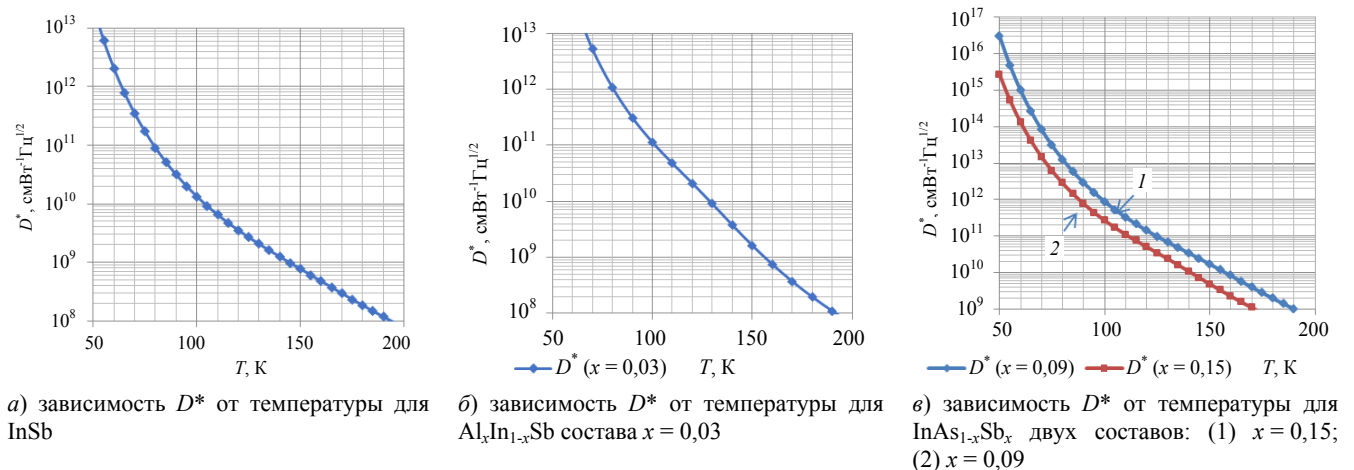


Рис. 4. Температурная зависимость обнаружительной способности D^* для материалов на основе сурьмы: а) InSb; б) $Al_xIn_{1-x}Sb$; в) $InAs_{1-x}Sb_x$

Из рис. 4 видно, что при одной и той же рабочей температуре обнаружительная способность ФПУ на основе тройных растворов ($\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$; $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$) может быть увеличена на один-два порядка по сравнению с ФПУ на основе InSb . Необходимо также отметить, что, увеличивая ширину запрещенной зоны, мы сдвигаем граничную длину волны ФПУ в более коротковолновую область спектра. Таким образом, при использовании ФПУ нового класса на основе перспективных гетероструктур группы антимонидов с поглощающими слоями $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ и $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, можно получить фотоэлектрические параметры на 1–2 порядка выше по сравнению с бинарным соединением InSb .

3 ФПУ на основе ЭС InSb

Первые гомоэпитаксиальные слои InSb толщиной 4–5 мкм выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на монокристаллических высоколегированных подложках InSb [6, 7]. На рис. 5 показана гетероструктура InSb-on-InSb .

Фотодиодный слой InSb p-типа проводимости толщина 0,5 мкм, $p \sim (1-2) \times 10^{18}$
Активный поглощающий слой InSb n -типа толщина 1–5 мкм $n \sim 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Граница раздела (остаточный слой In_2O_3)
Оптически прозрачная подложка InSb $n \sim (2-4) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$
Антиотражающее покрытие

Рис. 5. Структура InSb-on-InSb

Для получения идеальной границы раздела подложка InSb использовалась передовая технология подготовки поверхности подложки InSb «epi-ready», которая включала предварительную химическую и предэпитаксиальную температурную обработку для десорбции окислов с поверхности.

Для изготовления МФЧЭ проводились прецизионное травление и ионная имплантация Be для получения высоколегированного p +слоя на поверхности структуры. Оценка концентрации и подвижности носителей заряда в поглощающем слое, проведенная методом Холла, показала значение концентрации электронов в диапазоне $(0,5-2) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и подвижности $\sim 10^5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, что близко к показателям монокристаллического антимонида индия. Матрицы на основе эпитаксиаль-

ного InSb изготавливались по меза-структурной технологии, которая включала травление верхнего p +слоя для разделения структуры на меза-элементы на глубину ~ 1 мкм, затем поверхность анодировалась и защищалась диэлектриком SiO_2 , затем к отдельным ФЧЭ изготавливались металлические контакты, на которых формировались индиевые микростолбики для последующей гибридации с кремниевой БИС. С тыльной стороны структуры наносилось антиотражающее покрытие ZnS . Фрагмент МФЧЭ схематично показан на рис. 6.

Результаты исследований темновых токов в матрицах на основе InSb при времени накопления $T_n \approx 1$ мс показали равномерное распределение темнового тока со средним значением: по матрице формата 320×256 с шагом 30 мкм, порядка 25 пА; по матрице формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм, порядка 20 пА, что подтверждает эффективность использования метода МЛЭ с предварительной тщательной подготовкой подложки для выращивания кристаллически совершенных слоев эпитаксиального InSb (InSb-on-InSb), пригодных для изготовления приборов.

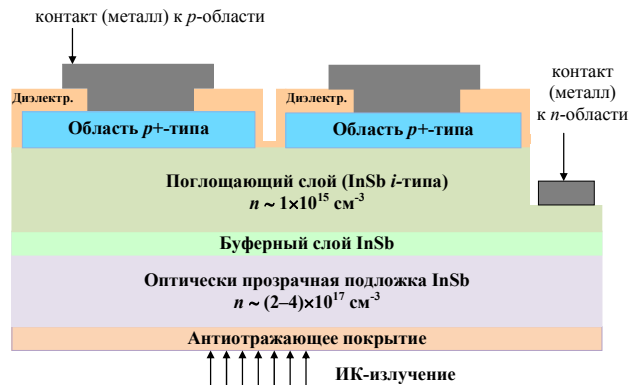
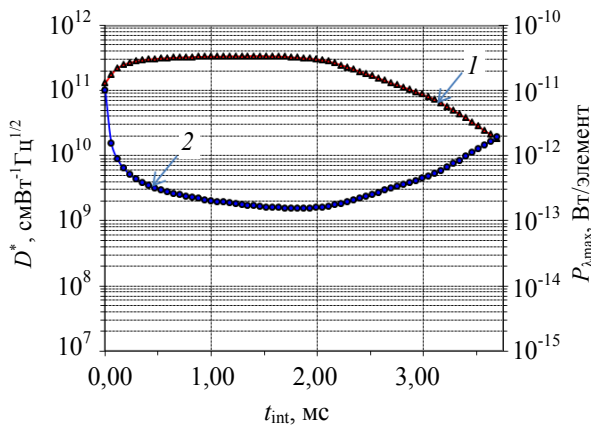
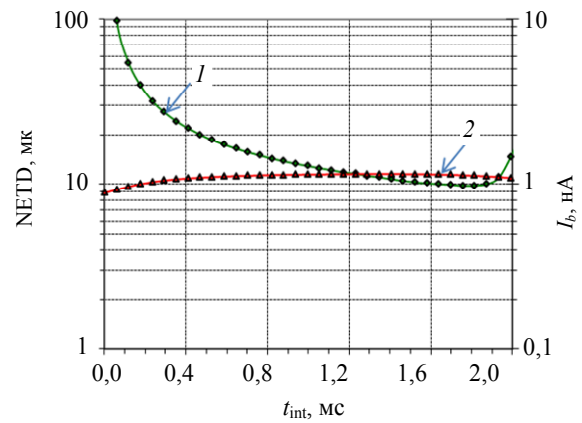


Рис. 6. Схематичное представление МФЧЭ, полученной меза-травлением

Результаты измерения выходных параметров ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм на основе структур InSb-on-InSb подтвердили достижение высоких значений (рис. 7а, б). Среднее по ФЧЭ значение обнаружительной способности при времени накопления $t_{\text{int}} = 1,4$ мс (рис. 7а) составило более $D^* \geq 2 \times 10^{11} \text{ смВт}^{-1}\text{Гц}^{1/2}$, пороговой мощности — менее $P_{\lambda\text{max}} \sim 10^{-13} \text{ Вт/элемент}$ (рис. 7а).



а) обнаружительная способность в зависимости от времени накопления



б) ЭШРТ в зависимости от времени накопления

Рис. 7. Основные фотоэлектрические параметры ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм на основе структуры InSb-on-InSb

Среднее значение эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) с холодной диафрагмой 60° при времени накопления $t_{int} = 1,6$ мс для ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм составило ~10,5 мК, фоновый ток составил $I_b \sim 1$ нА (рис. 7б). Из рис. 7 видно, что значение ЭШРТ минимально при лучшем в серии измерений времени накопления $t_{int} = 1,6$ мс и резко возрастает при малых временах накопления.

Таким образом, за счет выращивания тонких кристаллически совершенных гомоэпитаксиальных слоев InSb удастся уменьшить темновые токи и добиться фотоэлектрических параметров на уровне лучших зарубежных аналогов. Для исследования пространственного разрешения по МФЧЭ на основе InSb разработан электрооптический метод измерения глубины модуляции по интенсивности выходного сигнала при облучении источником в виде четырехштриховой миры. Исследо-

вания минимально разрешимой разности температур (ММРТ) для ФПУ формата 320×240 с шагом 30 мкм на основе ЭС InSb при использовании миры 14 штрихов/мм показали значение 0,1 К, в то время как для ФПУ того же формата на основе объемного антимонида индия значение ММРТ оказалось больше в 2,5 раза, что показало эффективность использования эпитаксиальных слоев для получения изображений высокого качества.

4 ФПУ на основе p+-n-n+-n-структур из InSb

Следующим этапом разработки являлось получение методом МЛЭ многослойных p+-n-n+-n-структур на основе InSb и тройного раствора AlInSb. Многослойные гетероструктуры имели поглощающие слои InSb и $Al_xIn_{1-x}Sb$, в которых p+-n-переход был образован между фотодиодным и поглощающим слоем, как показано на рис. 8а, б.

Фотодиодный p+-слой InSb, толщина 0,8 мкм, $p \sim (1-2) \times 10^{18}$
Поглощающий n-слой InSb, толщина 1-5 мкм $n \sim 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Сильнолегированный n+-слой InSb
Оптически прозрачная подложка InSb $n \sim (2-4) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$

а) структура на основе InSb

Фотодиодный p+-слой $Al_xIn_{1-x}Sb$, толщина 0,8 мкм, $p \sim (1-2) \times 10^{18}$
Поглощающий n-слой $Al_xIn_{1-x}Sb$, толщина 1-5 мкм $n \sim 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Сильнолегированный n+-слой $Al_xIn_{1-x}Sb$
Оптически прозрачная подложка InSb $n \sim (2-4) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$

б) структура на основе AlInSb

Рис. 8. P+-n-n+-n-структуры на основе InSb и AlInSb

Согласно рис. 8а, б структура состояла из оптически прозрачной высоколегированной подложки InSb, на которой последовательно выращивались: сильнолегированный кремнием (Si) n+-слой InSb (AlInSb), затем слаболегированный или нелегированный поглощающий активный слой InSb (AlInSb) n-типа проводимости толщиной ~ 4 мкм с

низкой концентрацией носителей заряда $(1,5-2) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, сверху структура имела сильнолегированный бериллием (Be) фотодиодный эпитаксиальный p+-слой InSb (AlInSb). Слои формировались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в едином ростовом процессе на высоколегированных подложках InSb (100) «epi-ready»

толщиной 500 мкм и диаметром 50,8 мм. Толщина слоя поглощения InSb (AlInSb) составляла 4–5 мкм. Рельеф ростовой поверхности имел вид нано-структурных ступеней с высотой ~ 0,65 нм и шириной ~ 65–70 нм.

У ФПУ на основе $p+n-n+n$ -структур изменены средние значения обнаружительной способности и эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ). Среднее по ФЧЭ значение обнаружи-

тельной способности превысило $D^* \geq 2 \times 10^{11} \text{ смВг}^{-1} \text{ Гц}^{1/2}$, среднее значение ЭШРТ с холодной диафрагмой 60° в рабочем режиме при времени накопления $\tau_n \approx 1,5 \text{ мс}$ составило ~ 11 мК. На рис. 9 показаны тепловизионные изображения, полученные с помощью ФПУ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм, изготовленных на основе $p+n-n+n$ -структур с поглощающим слоем из InSb.

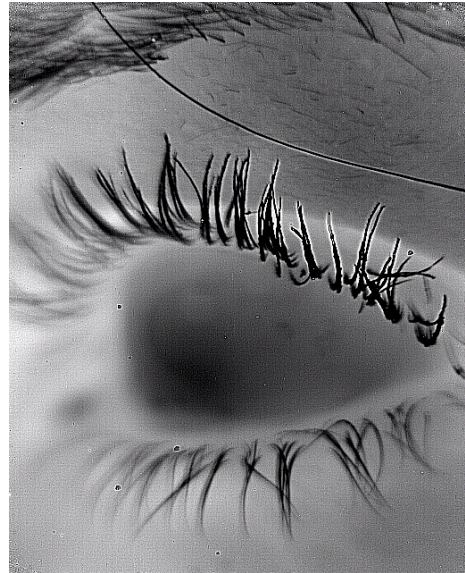
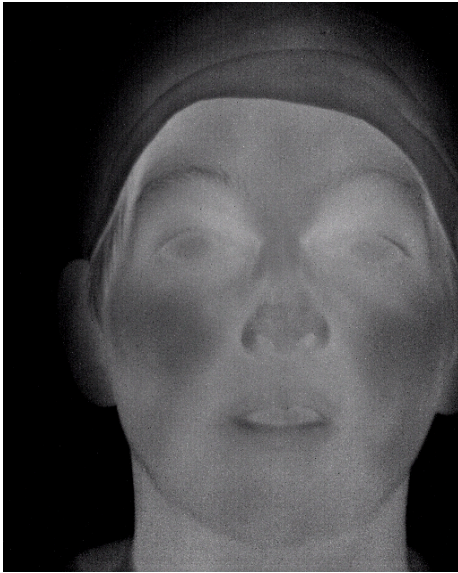


Рис. 9. Тепловизионные изображения, полученные с помощью ФПУ формата 640×512 с шагом 15 мкм из $p+n-n+n$ -структур InSb

По результатам исследований ФПУ формата 640×512 с шагом 15 мкм на основе $p+n-n+n$ -структур InSb получено, что их параметры находятся на уровне параметров ФПУ на основе однослойных гомоэпитаксиальных структур из InSb.

5 ФПУ на основе XVn -структур

Для устранения токов туннелирования фотодиодов и работы при повышенной температуре в

$p+n-n+n$ -структуру (рис. 8а, б) добавлялся тонкий широкозонный барьерный слой $Al_xIn_{1-x}Sb$ ($AlAs_{1-x}Sb_x$) между поглощающим n -слоем и высоколегированным p -слоем. За счет его введения достигалось дополнительное уменьшение темновых токов, а, следовательно, повышение рабочей температуры. На рис. 10а, б показаны топологии двух структур: (а) с барьерным слоем AlInSb и поглощающим слоем InSb; (б) с барьерным слоем AlAsSb и поглощающим слоем InAsSb.

Коллекторный n -слой InSb, толщина 0,2 мкм, $n \sim (1-2) \times 10^{16}$
Барьерный слой $Al_{0,1}In_{0,9}Sb$, толщина 0,1 мкм
Поглощающий n -слой InSb, толщина 1–5 мкм $n \sim 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Буферный n -слой InSb
Оптически прозрачная подложка InSb $n \sim (2-4) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$

а) nVn -структура на основе InSb

Коллекторный n -слой $InAs_{0,91}Sb_{0,09}$, толщина 0,2 мкм, $n \sim (1-2) \times 10^{16}$
Барьерный слой $AlAs_{0,92}Sb_{0,08}$, толщина 0,1 мкм
Поглощающий n -слой $InAs_{0,91}Sb_{0,09}$, толщина 1–5 мкм $n \sim 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Буферный n -слой $InAs_{0,91}Sb_{0,09}$
Оптически прозрачная подложка GaSb $n \sim (2-4) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$

б) nVn -структура на основе InAsSb

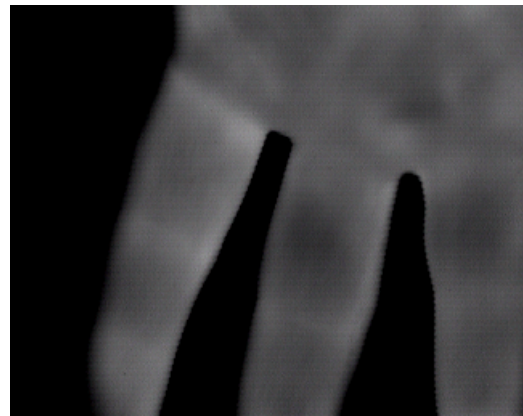
Рис. 10. XVn -структуры на основе: (а) InSb; (б) InAsSb

Барьерная структура состояла из подложки InSb (GaSb), высоколегированного буферного слоя n -типа InSb ($\text{InAs}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$), на котором выращивался поглощающий слаболегированный слой InSb ($\text{InAs}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$), затем барьерный слой $\text{Al}_{0,1}\text{In}_{0,9}\text{Sb}$ ($\text{AlAs}_{0,92}\text{Sb}_{0,08}$) толщиной $\sim 0,1$ мкм и сверху слой коллектора InSb ($\text{InAs}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$) (в данном случае также n -типа). В результате формировалась $n\text{Вn}$ -структура, получившая в литературе название бариодной [8]. На основе барьерных структур с поглощающим слоем InSb (InAsSb) и барьерным широкозонным слоем InAlSb (AlAsSb) изготовлены ФПУ форматов 320×256 с шагом

30 мкм и 640×512 с шагом 15 мкм. Исследования эквивалентной шуму разности температур для ФПУ на основе XВn -структуры с поглощающим слоем InSb показали значение ~ 20 мК при времени накопления ~ 10 мс и рабочей температуре $T = 110$ К, для ФПУ на основе XВn -структуры с поглощающим слоем InAsSb ЭШРТ составила 25 мК при времени накопления 50 мс и рабочей температуре $T = 150$ К. На рис. 11а, б показаны тепловизионные изображения тест-объекта для барьерных ФПУ формата 640×512 с шагом 15 мкм с поглощающим слоем на основе: (а) InSb; (б) InAsSb.



а) $n\text{Вn}$ -структура на основе InSb при $T = 110$ К



б) $n\text{Вn}$ -структура на основе InAsSb при $T = 150$ К

Рис. 11. Тепловизионные изображения тест-объекта, полученные с помощью барьерных ФПУ формата 640×512 с шагом 15 мкм на основе: (а) InSb; (б) InAsSb

Результаты исследований подтверждают работоспособность барьерных ФПУ формата 640×512 с шагом 15 мкм на основе: (а) InSb; (б) InAsSb, а также возможность их использования при повышенных температурах.

6 Заключение

Разработаны и выращены многослойные гомо- и гетероэпитаксиальные структуры с эпитаксиальным слоем InSb, p^+-n-n^+-n -структуры и барьерные XВn -структуры с поглощающими слоями на основе InSb, AlInSb и InAsSb. На их основе изготовлены фоточувствительные элементы (ФЧЭ) различной топологии. Для ФПУ на основе эпитаксиального InSb достигнуты малые темновые токи, не превышающие средних значений 20–25 пА и обнаружительная способность $D^* \geq 2 \times 10^{11}$ смВт $^{-1}$ Гц $^{1/2}$. Для эпитаксиальных структур по сравнению с объемными структурами антимонида индия получено преимущество по значению пространственного разрешения, что объясняется уменьшением коэффициента взаимосвязи между ФЧЭ. По результатам исследований ФПУ формата 640×512 с шагом 15 мкм на основе

p^+-n-n^+-n -структур из InSb получено, что их параметры находятся на уровне параметров ФПУ на основе однослойных гомоэпитаксиальных структур из InSb. Подтверждена работоспособность барьерных ФПУ формата 640×512 с шагом 15 мкм на основе: (а) InSb; (б) InAsSb, а также возможность их использования при повышенных температурах.

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. // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10177. P. 101771I.
2. Razeghi M. // Eur. Phys. J. AP. 2003. № 23. P. 149.
3. D'Souza A. I., Robinson E., Ionescu A. C., Okerlund D., de Lyon T. J., Rajavel R. D., Sharifi H., Dhar N. K., Wijewarnasuriya P. S., Grein C. // Proc. of SPIE. 2013. Vol. 8704. P. 87041V.
4. Adachi Sadao. Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. – USA: John Wiley & Sons Ltd. 2009.
5. Wieder H. H., Clawson A. R. // Thin Solid Films. 1973. Vol. 15. P. 217.
6. 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.

7. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Торопов А. И., Журавлев К. С., Фадеев В. В. // Прикладная физика. 2016. № 3. С. 58.

8. Klipstein P. C. XBn Barrier Photodetectors for High Sensitivity and High Operating Temperature Infrared Sensors // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6940. P. 6940-2U.

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

Homo- and heterostructures based on the binary and ternary alloys of antimonide group semiconductors

K. O. Boltar^{1,2}, A. A. Lopukhin¹, P. V. Vlasov¹, and N. I. Iakovleva¹

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

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

Received June 16, 2022

Focal plane arrays (FPAs) detecting radiation in the medium-wave infrared (IR) range (MWIR) based on the antimonide group materials with absorber layers InSb, Al_xIn_{1-x}Sb or InAs_{1-x}Sb_x, including XBn-structures with AlInSb barrier layer (InSb/AlInSb/InSb) and XBn-structures with AlAsSb barrier layer (InAsSb/AlAsSb/InAsSb) have been developed and investigated. Various topology photosensitive elements (PSE) with absorbing layers InSb, Al_xIn_{1-x}Sb or InAs_{1-x}Sb_x were fabricated. It is shown that wide-band ternary alloys AlInSb or AlAsSb are considered as an alternative to the narrowband binary compound InSb, since, due to wide-band material properties, photodiodes have lower dark currents, and, consequently, noise. The average values of detectivity D^* and noise-equivalent temperature difference (NETD) have been measured for various topology photodetectors, so D^* was more than 10^{11} cmW⁻¹Hz^{1/2} in homostructures, and D^* exceed of 10^{12} cmW⁻¹Hz^{1/2} in barrier structures.

Keywords: InSb, Al_xIn_{1-x}Sb, homostructure, heterostructure, barrier structure, MWIR, photodetector, detectivity.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-381-388

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, Proc. of SPIE **10177**, 1017711 (2017).
2. M. Razeghi, Eur. Phys. J. AP, No. 23, 149 (2003).
3. A. I. D'Souza, E. Robinson, A. C. Ionescu, D. Okerlund, T. J. de Lyon, R. D. Rajavel, H. Sharifi, N. K. Dhar, P. S. Wijewarnasuriya, and C. Grein, Proc. of SPIE **8704**, 87041V (2013).
4. Adachi Sadao, *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. (John Wiley & Sons Ltd., USA, 2009).
5. H. H. Wieder and A. R. Clawson, Thin Solid Films **15**, 217 (1973).
6. A. K. Bakarov, A. K. Gutakovskii, K. S. Zhuravlev, A. P. Kovchavtsev, A. I. Toropov, I. D. Burlakov, K. O. Boltar', P. V. Vlasov, and A. A. Lopukhin, Tech. Phys. **87** (6), 900 (2017).
7. I. D. Burlakov, K. O. Boltar', P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, A. I. Toropov, K. S. Zhuravlev, and V. V. Fadeev, Applied Physics, No. 3, 58 (2016) [in Russian].
8. P. C. Klipstein, "XBn Barrier Photodetectors for High Sensitivity and High Operating Temperature Infrared Sensors" Proc. SPIE **6940**, 6940-2U (2008).