

УДК 621.383.4/5

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

## Фотоприемные устройства на основе $p-i-n$ и барьерных структур средневолнового ИК диапазона спектра

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

*Исследованы многослойные структуры на основе полупроводниковых материалов группы антимонидов с поглощающими слоями InSb, и  $Al_xIn_{1-x}Sb$ , в том числе структуры с барьерным слоем InAlSb (InSb/InAlSb/InSb), предназначенные для изготовления перспективных фотоприемных устройств (ФПУ), детектирующих излучение в средневолновом инфракрасном (ИК) диапазоне спектра. На основе выращенных методом МЛЭ  $p-i-n$  и барьерных структур изготовлены фоточувствительные элементы (ФЧЭ) различной топологии с поглощающими слоями InSb, и  $Al_xIn_{1-x}Sb$ . Показано, что широкозонные тройные растворы  $Al_xIn_{1-x}Sb$  детектирующие излучение в средневолновой области спектра, являются альтернативой узкозонному бинарному соединению InSb, поскольку, вследствие широкозонности, фотодиоды на основе  $Al_xIn_{1-x}Sb$  имеют меньшие темновые токи, а, следовательно, шумы. Для фотоприемных устройств на основе структур различной топологии измерены средние значения обнаружительной способности и эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ), так для  $p-i-n$  структур среднее по ФЧЭ значение обнаружительной способности превысило  $D^* \geq 10^{11}$  см Вм<sup>-1</sup> Гц<sup>1/2</sup>, а для структур с барьерным слоем –  $D^* \geq 10^{12}$  см Вм<sup>-1</sup> Гц<sup>1/2</sup>.*

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-30-40

### Введение

В отечественной фотоэлектронике и за рубежом проводятся исследования в направлении совершенствования структур, содержа-

щих двойные, тройные и многокомпонентные соединения группы антимонидов [1–3], используемые для производства фотоприемных устройств (ФПУ) средневолнового ИК диапазона спектра, входящих в состав тепловизионных и тепlopеленгационных систем нового поколения. Так, например, в работах ведущего мирового разработчика фотоэлектроники, фирмы SCD [1] (Израиль), на основе  $XVn$ -структур изготовлены ФПУ нового поколения, работающие при повышенных температурах с параметрами на два порядка, превышающими параметры ФПУ на основе объемного InSb.

В данной работе теоретически и экспериментально исследованы характеристики полупроводниковых соединений группы антимонидов с поглощающими слоями InSb, и  $Al_xIn_{1-x}Sb$ , проведена оценка обнаружительной способности по темновому току, проведен расчет постоянной кристаллической решетки с целью выбора оптически прозрачной под-

**Болтарь Константин Олегович**<sup>1,2</sup>, нач. НТК, профессор, д.ф.-м.н.

**Яковлева Наталья Ивановна**<sup>1</sup>, гл.н.с., д.т.н.

**Лопухин Алексей Алексеевич**<sup>1</sup>, нач. участка измерений, к.т.н.

**Власов Павел Валентинович**<sup>1</sup>, вед. инженер.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 25 октября 2021 г.

© Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Лопухин А. А., Власов П. В., 2021

ложки. На основе выращенных методом МЛЭ  $p-i-n$  и барьерных структур изготовлены фоточувствительные элементы (ФЧЭ) различной топологии с поглощающими слоями InSb и  $Al_xIn_{1-x}Sb$ . Показано, что широкозонный тройной раствор  $Al_xIn_{1-x}Sb$ , используемый для поглощения излучения в средневолновой области спектра, является альтернативой узкозонному бинарному соединению InSb, поскольку, вследствие широкозонности, фотодиоды на основе  $Al_xIn_{1-x}Sb$  имеют меньшие темновые токи и шумы. Для фотоприемных устройств на основе структур различной топологии измерены средние значения обнаружительной способности и эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ), так для  $p-i-n$ -структур среднее по ФЧЭ значение обнаружительной способности превысило  $D^* \geq 10^{11}$  см Вт<sup>-1</sup> Гц<sup>1/2</sup>, а для структур с барьерным слоем –  $D^* \geq 10^{12}$  см Вт<sup>-1</sup> Гц<sup>1/2</sup>.

Одним из перспективных вариантов построения ФПУ является барьерная структура, обеспечивающая эффективное подавление процессов туннелирования и Шокли-Рид-Холла. Проведены работы по выращиванию таких структур и изготовлению меза-матриц, темновые токи фоточувствительных элементов площадью  $15 \times 15$  мкм<sup>2</sup> составили менее 20 пА/см<sup>2</sup> при напряжении смещения  $V = -200$  мВ и температуре  $T = 77$  К.

### Свойства тройных соединений $Al_xIn_{1-x}Sb$

При проектировании ФПУ на основе материалов группы антимонидов необходимо учитывать их основные свойства. На рис. 1,  $a-v$  показаны зависимости ширины запрещенной зоны материала  $Al_xIn_{1-x}Sb$  от состава и температуры.

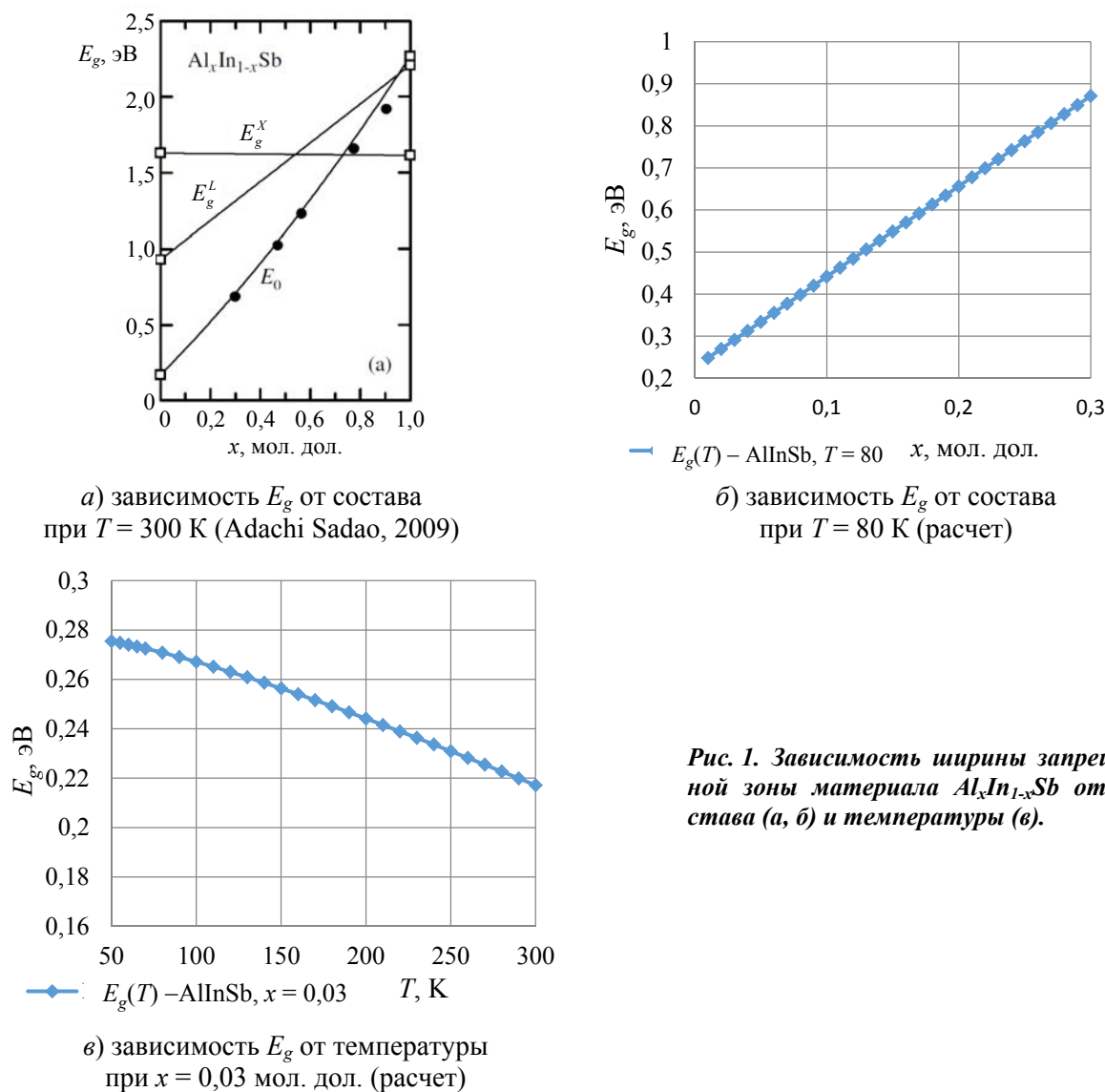


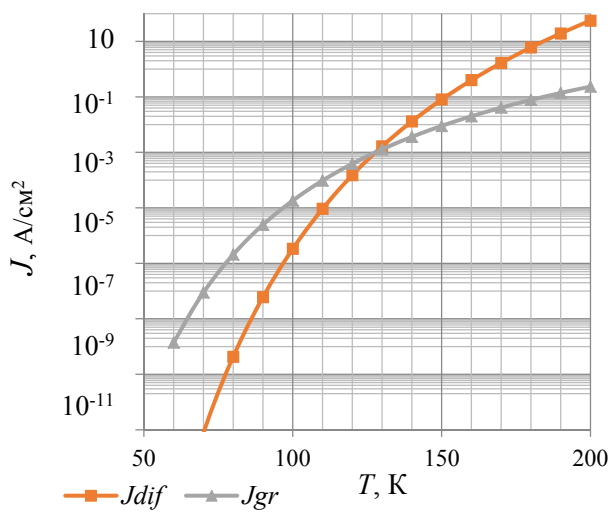
Рис. 1. Зависимость ширины запрещенной зоны материала  $Al_xIn_{1-x}Sb$  от состава (а, б) и температуры (в).

Зависимости ширины запрещенной зоны материала  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  от состава (рис. 1, *a*) представлены в трех точках симметрии кристалла: т. е. в области  $\Gamma$ -точки (ширина запрещенной зоны обозначена  $E_0$ ), расположенной в центре зоны Бриллюэна; в области  $L$ -точки, расположенной на пересечении края зоны с осью  $\langle 111 \rangle$  (ширина запрещенной зоны обозначена  $E_g^L$ ); в области  $X$ -точки, соответствующей пересечению оси  $\langle 100 \rangle$  с краем зоны (ширина запрещенной зоны обозначена  $E_g^X$ ) при температуре  $T = 300$  К (Adachi Sadao, Properties of Semiconductor Alloys, 2009 [4]).

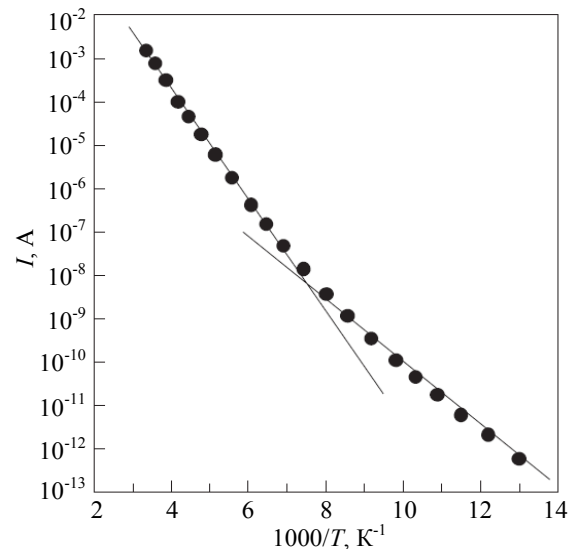
На рис. 1, *b* показаны результаты расчета зависимости ширины запрещенной зоны  $E_g$  от состава при  $T = 80$  К. Как видно из рис. 1, *b* при малых значениях состава антимонида алюминия  $x_{\text{AlSb}} \leq 0,1$  мол. дол. в тройном растворе  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  ширина запрещенной зоны находится в диапазоне  $0,2 < E_g < 0,45$  эВ, сле-

довательно, данный тройной раствор можно использовать для области поглощения с граничной длиной волны менее  $5,0$  мкм, а при  $x_{\text{AlSb}} > 0,1$  мол. дол. – в качестве барьерного слоя. На рис. 1 в показана температурная зависимость ширины запрещенной зоны  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  состава  $x_{\text{AlSb}} = 0,03$  мол. дол., из графика видно, что при повышении температуры ширина запрещенной зоны уменьшается.

На рис. 2, *a, б* показаны температурные зависимости темновых токов: диффузии и генерации-рекомбинации Шокли-Рида-Холла (ШРХ) для фоточувствительного элемента (ФЧЭ) на основе  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  в соответствии с аналитической моделью (Klipstein Philip, 2011 [5]): (а) результаты расчета; (б) экспериментальные данные темнового тока ФЧЭ с площадью  $A = 50 \times 50$  мкм<sup>2</sup> состава  $x \sim 0,015$  мол. дол. ( $\lambda_{0,5} \approx 5,0$  мкм) при напряжении смещения  $V = -100$  мВ [6].



*a*) ФЧЭ на основе  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  состава  $x = 0,03$  мол. дол.



*б*) ФЧЭ на основе  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  состава  $x \sim 0,015$  мол. дол. ( $\lambda_{0,5} \approx 5,0$  мкм) при напряжении смещения  $V = -100$  мВ; энергия активации:  $\sim 140$  мэВ ( $g-r$ ) и  $\sim 270$  мэВ (dif) соответственно

**Рис. 2. Температурные зависимости темновых токов: диффузии и генерации-рекомбинации ШРХ для ФЧЭ на основе  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ .**

Температурные зависимости темновых токов определяют процессы генерации-рекомбинации в области поглощения, и как следует из рис. 2, при низких температурах ( $T \leq 130$  К) преобладает генерационно-реком-

бинационная составляющая ШРХ, а при высоких температурах ( $T > 130$  К) – диффузионная. На рис. 2, *б* показан полученный экспериментально график Аррениуса для темнового тока в структуре с поглощающим слоем  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$

при напряжении обратного смещения 100 мВ для элемента площадью  $A = 50 \times 50 \text{ мкм}^2$ , состава  $x \sim 0,015$  мол. дол., с граничной длиной волны  $\lambda_{0,5} \sim 5,0 \text{ мкм}$  (O. Neshet и P. S. Klipstein, 2006). Температура в точке пересечения диффузионной и генерационно-рекомбинационной составляющих темнового тока (точка кроссовера) составила  $T \approx 130 \text{ К}$ , что совпадает с предварительной теоретической оценкой (рис. 2, а). Согласно температурным зависимостям темнового тока (рис. 2, б) в структурах с поглощающим слоем InAlSb при  $T = 80 \text{ К}$  ( $1000/T = 12,5$ ) достижимы темновые токи порядка пикампер ( $10^{-12} \text{ А}$ ); а при  $T = 110 \text{ К}$  порядка  $10^{-10} \text{ А}$ . Таким образом, добавление незначительного количества алюминия (порядка 1–3 %) в InSb позволяет уменьшить темновые токи ФЧЭ, по сравнению со структурами на основе объемного InSb, на порядок и более.

На рис. 3 представлена расчетная температурная зависимость обнаружительной способности для ФЧЭ на основе  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  состава  $x = 0,03$  мол. дол.

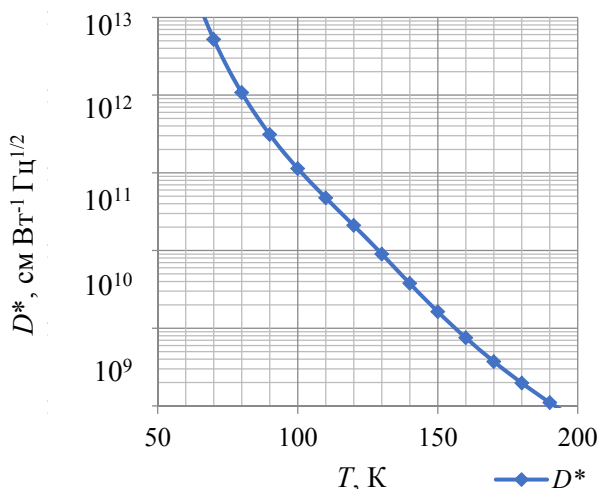


Рис. 3. Обнаружительная способность ФЧЭ на основе  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  состава  $x = 0,03$  мол. дол.

Из рис. 3 видно, что для ФЧЭ на основе  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  состава  $x = 0,03$  мол. дол. при

$T = 80 \text{ К}$  достижимо значение обнаружительной способности  $D^* \sim 10^{12} \text{ см ВТ}^{-1} \text{ Гц}^{1/2}$ , а при  $T = 100 \text{ К} - D^* \sim 10^{11} \text{ см ВТ}^{-1} \text{ Гц}^{1/2}$ . При этом постоянные решеток бинарных соединений InSb и AlSb составляют:  $a_{\text{InSb}} = 6,4794 \text{ \AA}$  и  $a_{\text{AlSb}} = 6,1355 \text{ \AA}$  соответственно. Используя правило линейной аппроксимации постоянную кристаллической решетки тройного раствора InAlSb  $\alpha_{\text{InAlSb}}$  оценим по формуле

$$\alpha_{\text{InAlSb}} = x \times \alpha_{\text{AlSb}} + (1 - x) \times \alpha_{\text{InSb}} = 0,03 \times 6,1355 + 0,97 \times 6,4794 = 0,1840 + 6,2850 = 6,47.$$

Из расчета видно, что при составе  $x_{\text{AlSb}} = 0,03$  мол. дол. постоянная решетки поглощающего слоя InAlSb составит  $a_{\text{InAlSb}} = 6,47 \text{ \AA}$ , что наиболее близко к постоянной кристаллической решетки объемного антимонида индия InSb, который можно выбрать в качестве подложки.

Недостатком тройного раствора  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  является сильная зависимость граничной длины волны от состава, т. е. при небольшом увеличении содержания Al длинноволновая граница быстро смещается в коротковолновую область, вследствие чего необходима отработка дозированной подачи потока Al в процессе МЛЭ.

### Изготовление и исследования ФПУ на основе сурьмы

#### ФПУ на основе p-i-n-структуры

Для изготовления матриц ФЧЭ разработаны и выращены многослойные эпитаксиальные p-i-n-структуры с поглощающими слоями InSb и  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ , в которых p<sup>+</sup>-n-переход образован между фотодиодным и поглощающим слоем. Один из вариантов структуры ФЧЭ представлен в табл. 1, нумерация слоев начинается от подложки.

Таблица 1

#### P-i-n-структура на основе InSb

№ слоя	Назначение	Толщина, мкм	Уровень легирования, см <sup>-3</sup>	Тип легирования, см <sup>-3</sup>
4	Фотодиодный эпитаксиальный p <sup>+</sup> -слой InSb	0,8	(1–2) × 10 <sup>18</sup>	Сильнолегированный, Be
3	Поглощающий эпитаксиальный n-слой InSb	4	(1,5–2) × 10 <sup>15</sup>	Нелегированный
2	Буферный эпитаксиальный n <sup>+</sup> -слой InSb	1	(1,5–2) × 10 <sup>18</sup>	Сильнолегированный, Si
1	Подложка InSb (001), Ø 50,8 мм	550	(1–2) × 10 <sup>18</sup>	Te

Рассматриваемая  $p-i-n$ -структура состоит из оптически прозрачной высоколегированной подложки InSb, на которой последовательно выращиваются: сильнолегированный кремнием (Si)  $n^+$ -слой InSb, затем слаболегированный или нелегированный поглощающий активный слой InSb  $n$ -типа проводимости толщиной  $\sim 4$  мкм с низкой концентрацией носителей заряда  $(1,5-2) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , сверху структура имеет сильнолегированный бериллием (Be) фотодиодный эпитаксиальный  $p^+$ -слой InSb.

Образцы многослойных структур на основе InSb (табл. 2) выращивались методом МЛЭ с источником, обеспечивающим подачу стабильного непрерывного молекулярного потока сурьмы ( $\text{Sb}_2$  и  $\text{Sb}_4$ ) на подложку InSb. Температура крекинга ячейки молекулярного потока сурьмы составляла более  $T \geq 900$  °С. Скорость роста контролировалась с помощью картины дифракции отраженных быстрых электронов и рентгеноструктурного анализа. Температура роста измерялись с помощью оптического пирометра [7].

В качестве оптически прозрачных подложек использовались пластины монокристаллического InSb  $\varnothing 50,8$  мм кристаллографического направления (100)  $n$ -типа проводимости, легированные Te, подготовленные по технологии «epi-ready», устанавливаемые на безиндиевый молибденовый держатель. Концентрация носителей заряда в подложках превышала  $n \geq 4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , в качестве легирующих примесей выступали Be и Te для получения слоев  $p^+$ -типа и  $n^+$ -типа проводимости соответственно.

Структурное совершенство эпитаксиальных слоев, выращенных методом МЛЭ, оценивалось с помощью рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения (High Resolution X-Ray Diffraction) по спектрам дифракционного отражения. Кристаллическое совершенство подложки InSb исследовалось до выполнения ростового процесса путем сканирования поверхности методом высокоразрешающей дифрактометрии, среднее значение полуширины кривой качания по поверхности подложки составило  $\text{FWHM} = 21$  угл. сек. Среднее значение полуширины кривой качания по поверхности эпитаксиальной структуры на основе InSb составило 23 угл. сек., что

близко к значению подложки, и следовательно, подтверждает высокое кристаллическое совершенство ЭС InSb.

Морфология поверхности эпитаксиальных слоев характеризовалась с помощью метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) на площади сканирования  $1,0 \times 1,0$  мкм. Как показано на рис. 7, ростовой рельеф поверхности структур – ступенчатый, ширина атомарных ступеней примерно равна 65–100 нм, значение среднеквадратичной шероховатости поверхности (RMS) составило 0,14 нм (рис. 7).

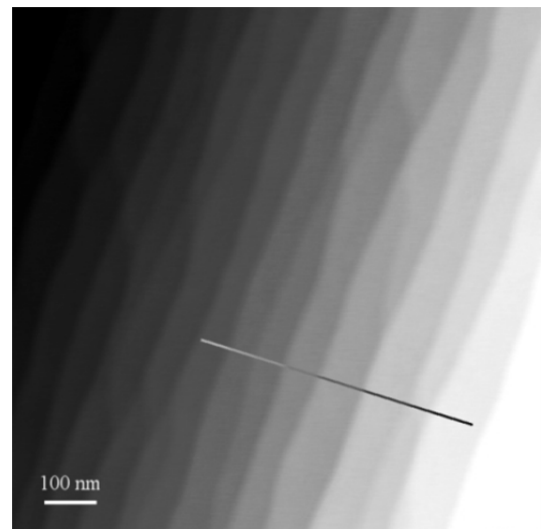
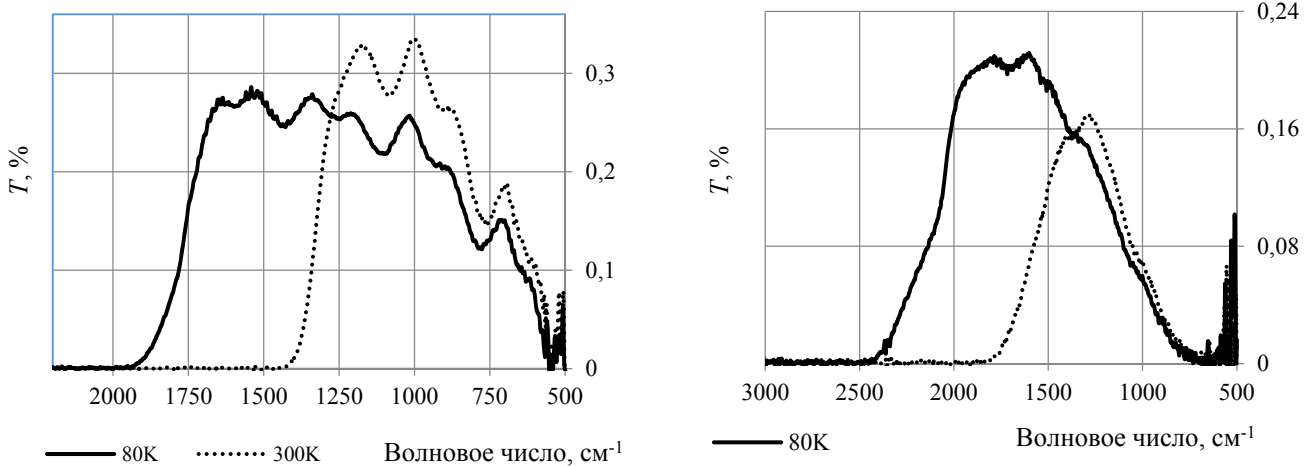


Рис. 7. Ростовой рельеф поверхности пластины.

На основе  $p-i-n$ -структур InSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках InSb  $n$ -типа кристаллической ориентации (100) с помощью технологии меза-травления изготовлены МФЧЭ формата  $320 \times 256$  элементов с шагом 30 мкм и формата  $640 \times 512$  элементов с шагом 15 мкм.

На рис. 8 показаны спектры пропускания двух  $p-i-n$ -структур InSb, используемых в дальнейшем для изготовления ФПУ.

На рис. 8, а представлены спектры пропускания структуры на основе InSb при  $T = 80$  К и  $T = 300$  К, граничная длина волны составила  $\lambda_{0,5} = 5,7$  мкм при  $T = 80$  К и  $\lambda_{0,5} = 7,7$  при  $T = 300$  К. Сдвиг граничной длины волны у структуры InSb в длинноволновую область спектра можно объяснить частичным поглощением излучения в высоколегированной подложке InSb.



а) структура на основе InSb, граничная длина волны  $\lambda_{0,5} = 5,7$  мкм при  $T = 80$  К и  $\lambda_{0,5} = 7,7$  мкм при  $T = 300$  К

б) структура на основе AlInSb, граничная длина волны  $\lambda_{0,5} = 4,7$  мкм при  $T = 80$  К и  $\lambda_{0,5} = 6,5$  мкм при  $T = 300$  К

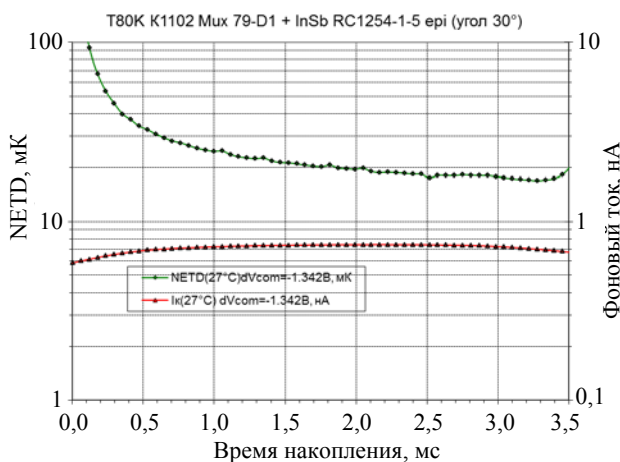
Рис. 8. Спектры пропускания структур, используемые при изготовлении ФПУ формата 320×256 с шагом 30 мкм на основе антимонида.

На рис. 8, б представлены спектры пропускания структуры на основе AlInSb при  $T = 80$  К и  $T = 300$  К, граничная длина волны составила  $\lambda_{0,5} = 4,7$  мкм при  $T = 80$  К и  $\lambda_{0,5} = 6,5$  мкм при  $T = 300$  К. Сдвиг граничной длины волны в коротковолновую область спектра достигается за счет использования в качестве поглощающего слоя тройного соединения AlInSb с небольшим содержанием алюминия порядка 1,0–1,5 %.

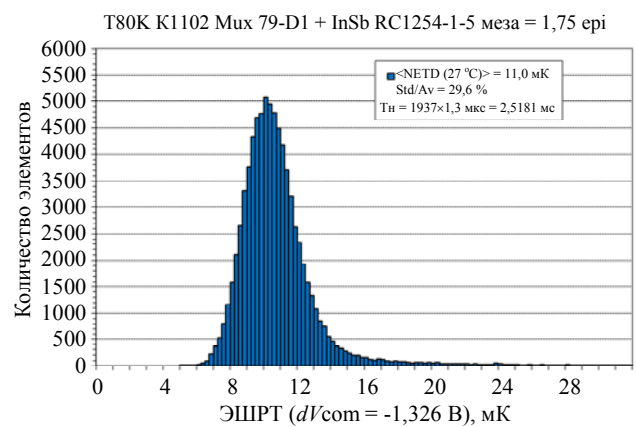
Измерены средние значения обнаружительной способности и эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ), так для  $p-i-n$ -структур среднее по ФЧЭ значение обнаружительной способности превысило

$D^* \geq 10^{11}$  см ВТ<sup>-1</sup> Гц<sup>1/2</sup>. На рис. 9, а показаны зависимости эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) и фонового тока от времени накопления для ФПУ формата 640×512 элементов, изготовленного на основе  $p-i-n$ -структуры из InSb. На рис. 9, б показана гистограмма распределения ЭШРТ по элементам ФПУ при  $T = 80$  К.

Среднее значение ЭШРТ с холодной диафрагмой 30° в рабочем режиме при времени накопления  $\tau_{\text{н}} \approx 1,5$  мс составило NETD ~11 мК, фоновый ток – ~8 нА, что находится на уровне параметров ФПУ на основе однослойных эпитаксиальных структур из InSb [8].



а) зависимость ЭШРТ от времени накопления при  $T = 80$  К



б) гистограмма распределения ЭШРТ по элементам матрицы при  $T = 80$  К

Рис. 9. Зависимость эквивалентной к шуму разности температур от времени накопления и гистограмма ЭШРТ по элементам для ФПУ формата 640×512 элементов на основе  $p-i-n$ -структуры из InSb.



На рис. 10 показаны тепловизионные изображения, полученные с помощью ФПУ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм, изготовленных на основе *p-i-n*-структур с поглощающим слоем из InSb.

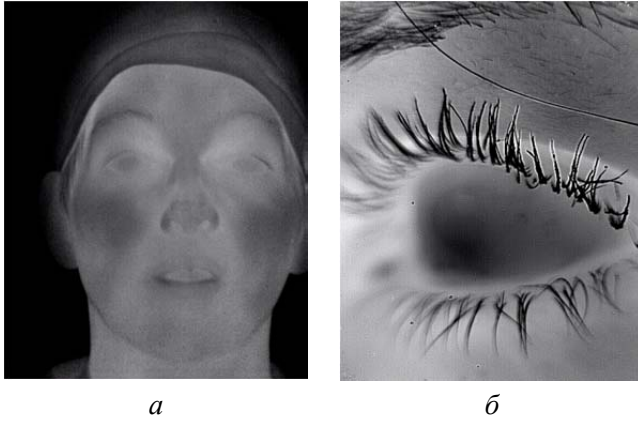


Рис. 10. Тепловизионные изображения, полученные с помощью ФПУ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм, изготовленных на основе *p-i-n*-структур из InSb.

На рис. 11 представлены температурные зависимости темнового тока для ФПУ различных форматов, изготовленных на основе объемного InSb (1) и (2), и на основе *p-i-n*-структуры (3), состоящей из эпитаксиальных слоев InSb согласно табл. 2. Для измерения токов и дифференциального сопротивления использовалась автоматизированная нестандартная установка измерения ВАХ.

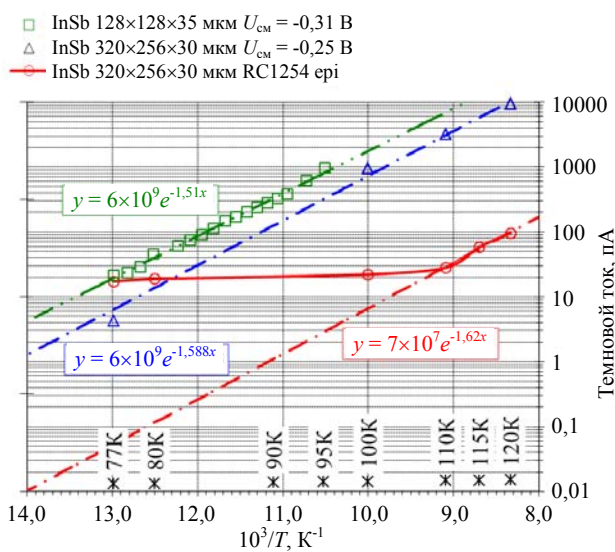


Рис. 11. Темновые токи ФПУ на основе InSb.

Из рис. 11 видно, что в области высоких температур темновой ток ФЧЭ на основе

*p-i-n*-структуры на два порядка меньше, чем у ФЧЭ на основе объемного InSb. В области низких температур характеристика темнового тока входит в насыщение, что можно объяснить преобладанием генерационно-рекомбинационного ШРХ тока.

Токовую составляющую, обусловленную механизмом генерации-рекомбинации ШРХ можно оценить из уравнения [9, 10]

$$J_{gr} \approx \frac{n_i W}{\tau_{gr} \sqrt{N_{maj}}}$$

где  $n_i$  – собственная концентрация носителей заряда,  $W$  – ширина зоны обеднения,  $\tau_{gr}$  – время жизни по механизму генерации-рекомбинации ШРХ. Из экспериментальной зависимости темнового тока можно оценить ширину области обеднения, которая при концентрации носителей заряда  $N_{maj} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и времени жизни  $\tau_{gr} = 10^{-6}$  сек. составила  $\sim 1,2 \times 10^{-2}$  мкм.

### ФПУ на основе барьерной структуры

Для уменьшения токов утечки фотодиодов и работы при повышенной температуре в *p-i-n*-структуру (табл. 1) добавлялся тонкий широкозонный слой InAlSb между поглощающим *n*-слоем InSb и *p*<sup>+</sup>-слоем. За счет его введения в структуру МФЧЭ достигается дополнительное уменьшение темновых токов, а следовательно, повышение рабочей температуры. Топология барьерной структуры показана в табл. 2. Нумерация слоев начинается от подложки.

Барьерная структура состоит из высоколегированной подложки InSb, на которой последовательно выращиваются: сильнолегированный *n*<sup>+</sup>-слой InSb, затем слаболегированный или нелегированный поглощающий активный слой на основе InSb *n*-типа проводимости толщиной  $\sim 4$  мкм с низкой концентрацией носителей заряда  $(1,5-2) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , затем барьерный *p*<sup>+</sup>-слой In<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>Sb, сверху структура имеет сильнолегированный бериллием (Be) фотодиодный эпитаксиальный *p*<sup>+</sup>-слой InSb. Легирующими примесями *n*-типа выступали теллур и кремний, для получения слоев *p*-типа использовался бериллий.

Таблица 2

Барьерная структура на основе InSb

№ слоя	Назначение	Толщина, мкм	Уровень легирования, см <sup>-3</sup>	Тип легирования, см <sup>-3</sup>
5	Фотодиодный эпитаксиальный p <sup>+</sup> -слой InSb	0,2	(1–2)×10 <sup>18</sup>	Сильнолегированный, Be
4	Барьерный эпитаксиальный p <sup>+</sup> -слой In <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> Sb	0,1	1×10 <sup>18</sup>	Сильнолегированный, Be
3	Поглощающий активный эпитаксиальный n-слой InSb	4	(1,5–2)×10 <sup>15</sup>	нелегированный
2	Буферный эпитаксиальный n <sup>+</sup> -слой InSb	1	(1,5–2)×10 <sup>18</sup>	Сильнолегированный, Te
1	Подложка InSb (001), Ø 50,8 мм	500	(1–2)×10 <sup>18</sup>	Сильнолегированный, Te

В качестве подложек использовались высоколегированные пластины InSb кристаллографического направления (001), диаметром Ø 50,8 мм. Использование соответствующих по кристаллической структуре подложек InSb позволяет получать хорошую морфологию поверхности структуры с низкой плотностью дефектов. Подложки легировались Te до концентрации 2×10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>, чтобы получить сдвиг границы пропускания в длинноволновую область согласно правилу Бурштейна-Мосса, что необходимо для беспрепятственного прохождения излучения в средневолновом ИК диапазоне спектра. Температуру подложки в процессе роста измеряли с помощью оптического пирометра, не контактирующего с подложкой напрямую. Калибровка пирометра проводилась по известной температуре перехода между поверхностными сверхструктурами на пластине InSb (001), которая составляла ≈385 °С.

В процессе формирования структуры слои InSb и In<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>Sb выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) с использованием эффузионных ячеек для формирования молекулярных потоков сурьмы (Sb<sub>4</sub>), индия (In) и алюминия (Al), кремния (Si) и бериллия (Be). Тройной раствор p<sup>+</sup>-слой In<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>Sb – широкозонный, с содержанием 10 % алюминия In<sub>0,9</sub>Al<sub>0,1</sub>Sb, он создает потенциальный барьер в зоне проводимости, препятствующий протеканию диффузионного тока электронов. Поскольку барьер располагается в области p–n-перехода, он позволяет уменьшить туннельные и генерационно-рекомбинационные составляющие темнового тока. Высота барьера In<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>Sb в зоне проводимости составила ≈0,23 эВ, толщина выбиралась в диапазоне 70–100 нм. ФПУ форматов 320×256 с шагом 30 мкм и 640×512 с ша-

гом 15 мкм изготовлены на основе барьерных структур InSb с поглощающим слоем InSb и барьерным широкозонным слоем In<sub>0,9</sub>Al<sub>0,1</sub>Sb. Тепловизионные изображения, полученные с помощью ФПУ формата 640×512 с шагом 15 мкм, представлены на рис. 12, а–в.

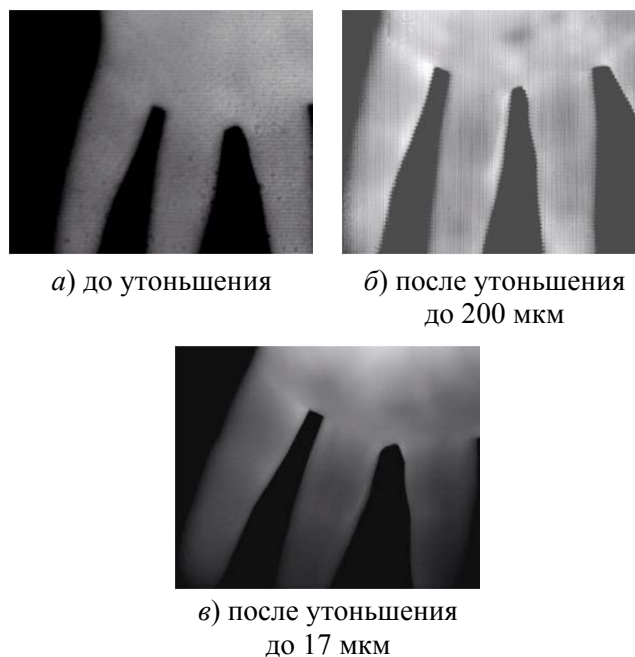


Рис. 12. Тепловизионные изображения, полученные с помощью ФПУ формата 640×512 элементов на основе барьерной структуры из InSb.

На рис. 12, а показано изображение руки до операции утоньшения подложки. На изображении видны несовершенства структуры и области неоднородности чувствительности по всему полю изображения. После первого утоньшения подложки (рис. 12, б) до 200 мкм области неоднородности и несовершенства – отсутствуют, видна характерная кристаллографическая картина, формируемая в процессе роста слоев InSb. После второго утоньшения



до 17 мкм (рис. 12, в) изображение руки становится реалистичным, видны особенности распределения температуры по изображению, число дефектов структуры – минимально.

В процессе работы проведена оценка количества одиночных дефектов по поверхности матрицы формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм, изготовленной на основе барьерной эпитаксиальной  $p^+ - i - n - n^+$ -структуры (InSb/InAlSb/InSb/InSb). Измерения проводились при напряжении смещения  $V = -1,4$  В и времени накопления  $t_{\text{нак}} = 1,5$  мс, количество одиночных дефектов составило у различных матриц от 600 до 1200 штук. Количество дефектов ФПУ на основе ЭС InSb сравнивалось с их количеством у ФПУ, изготовленных на основе объемного InSb, у которых количество дефектов обычно не превышает ~500 штук. Результаты сравнения показали, что дефектность ФПУ на основе ЭС InSb превышает дефектность на основе объемного InSb в 1,5–2 раза. Плотность распределения поверхностных дефектов по пластинам диаметром 50,8 мм, определенных методом высокоточной рефлектометрии на установке «Candela» (США) после выращивания эпитаксиального слоя толщиной 4–5 мкм, коррелируют с их распределением по площади матриц. Точковая чувствительность ФПУ на основе барьерных ЭС InSb близка к чувствительности ФПУ, изготовленных на объемном InSb с толстой базой (толщина ~500 мкм) и составляет 6–18 мВ при  $T_{\text{нак}} = 100$  мкс, что в 20–50 раз меньше чувствительности утоньшенных ФПУ, изготовленных на основе объемного InSb.

Неоднородность и дефектность поверхности структуры по площади (рис. 12, а), связана либо с качеством подготовки тыльной поверхности подложки, поскольку после утоньшения неоднородность и дефектность существенно уменьшаются. Характерная структурированная картина (рис. 12, б) скорее всего, связана со спецификой роста и напряженностью эпитаксиальных слоев.

Изображения руки, полученные с помощью ФПУ на основе ЭС InSb (толщина поглощенного слоя  $\leq 5$  мкм) формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм после финишной обработки и удаления подложки имеют больший контраст [11] по сравнению с изображениями, полученными с помощью ФПУ, изготовленными на основе объемного материала

InSb, что объясняется меньшей эффективной длиной диффузии неосновных носителей заряда в области поглощения и меньшим коэффициентом взаимосвязи между ФЧЭ.

Для фотоприемных устройств на основе структур различной топологии измерены средние значения обнаружительной способности и эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ), так для  $p - i - n$ -структур среднее по ФЧЭ значение обнаружительной способности превысило  $D^* \geq 10^{11}$  см Вг<sup>-1</sup> Гц<sup>1/2</sup>, а для структур с барьерным слоем –  $D^* \geq 10^{12}$  см Вг<sup>-1</sup> Гц<sup>1/2</sup>.

Измеренная методом Холла концентрация носителей заряда поглощающего слоя InSb толщиной ~5 мкм, выращенного на подложке InSb ориентации (001) при температуре 77 К составила порядка  $n \approx 5,4 \times 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, что больше на порядок концентрации нелегированного объемного материала InSb, выращенного по методу Чохральского  $n \sim (1-5) \times 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Данное различие объясняется легированием в процессе эпитаксиального выращивания. Возможно, процессы генерации-рекомбинации ШРХ, связанные с хаотичным переходом носителей на уровни в запрещенной зоне поглощающего слоя являются источником дополнительного шума и потери чувствительности ФПУ на основе ЭС InSb.

## Заключение

Разработана топология фоточувствительных структур на основе материалов группы антимонидов и методом МЛЭ на подложках InSb выращены  $p - i - n$  и барьерные структуры с поглощающими слоями InSb и  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ . На основе выращенных методом МЛЭ  $p - i - n$  и барьерных структур изготовлены фоточувствительные элементы (ФЧЭ) различной топологии с поглощающими слоями InSb, и  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ . Показано, что широкозонный тройной раствор  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ , используемый для поглощения излучения в средневолновой области спектра, является альтернативой узкозонному бинарному соединению InSb, поскольку, вследствие широкозонности, фотодиоды на основе  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  имеют меньшие темновые токи и шумы.

Проведенные исследования показали необходимость совершенствования техноло-

гии подготовки подложки и выращивания структур методом МЛЭ. Количество дефектов ФПУ на основе ЭС InSb сравнивалось с их количеством у ФПУ, изготовленных на основе объемного InSb, у которых количество дефектов обычно не превышает ~500 штук. Результаты сравнения показали, что дефектность ФПУ на основе ЭС InSb превышает дефектность на основе объемного InSb в 1,5–2 раза. Плотность распределения поверхностных дефектов по пластинам диаметром 50,8 мм, определенных методом высокоточной рефлектометрии на установке «Candela» (США) после выращивания эпитаксиального слоя толщиной 4–5 мкм, коррелируют с их распределением по площади матриц. Токовая чувствительность ФПУ на основе барьерных ЭС InSb близка к чувствительности ФПУ, изготовленных на объемном InSb.

Измеренная методом Холла концентрация носителей заряда поглощающего слоя InSb толщиной ~5 мкм, выращенного на подложке InSb ориентации (001) при температуре 77 К составила порядка  $n \approx 5,4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , что больше на порядок концентрации легированного объемного материала InSb, выращенного по методу Чохральского  $n \sim (1-5) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Данное различие объясняется легированием в процессе эпитаксиального выращивания. Возможно, процессы генерации-рекомбинации ШРХ, связанные с хаотичным переходом носителей на уровни в запрещен-

ной зоне поглощающего слоя являются источником дополнительного шума и потери чувствительности ФПУ на основе ЭС InSb.

## 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. 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.
4. Adachi Sadao. Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. – USA: John Wiley & Sons Ltd. 2009.
5. Klipstein Philip. // Optical Engineering. 2011. Vol. 50. № 6. P. 061002.
6. Neshor O., Klipstein P. C. // Opto-Electron. Rev. 2006. Vol. 14. № 1. P. 61.
7. Shtrichman I., Aronov D., Ben Ezra M., Barkai I., Berkowicz E., Brumer M., Fraenkel R., Glozman A., Groszman S., Jacobsohn E., Klin O., Klipstein P., Lukomsky I., Shkedy L., Snapi N., Yassen M., Weiss E. // Proc. SPIE Infrared Technology and Applications. 2012. Vol. 8353. P. 8353-2Y.
8. 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.
9. Cervera C., Rodriguez J. B., Chaghi R., Aï-Kaci H., Christol P. // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. P. 024501.
10. Sah C. T., Noyce R. N., Shockley W. // Proc. Inst. Radio Eng. 1957. Vol. 45. P. 1228.
11. Болтарь К. О., Власов П. В., Лазарев П. С., Лопухин А. А., Чишко В. Ф. // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 18.

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

## Photodetector devices based on PIN and barrier structures of the mid-wave IR range of the spectrum

K. O. Boltar<sup>1,2</sup>, N. I. Iakovleva<sup>1</sup>, A. A. Lopukhin<sup>1</sup>, and P. V. Vlasov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received October 25, 2021

**Multilayer structures based on the antimonide group materials with absorber layers InSb or  $Al_xIn_{1-x}Sb$ , and XBN-structures with  $Al_xIn_{1-x}Sb$  barrier layer (InSb/ $Al_xIn_{1-x}Sb$ /InSb), designed**

*for the manufacture of advanced photosensitive devices detecting radiation in the medium-wave infrared (IR) range (MWIR), have been developed and investigated. Various topology photosensitive elements (PSE) with absorbing layers InSb or  $Al_xIn_{1-x}Sb$  were fabricated on the basis of MBE-grown p-i-n and barrier structures. It is shown that wideband ternary alloys  $Al_xIn_{1-x}Sb$  are considered as an alternative to the narrowband binary compound InSb, since, due to wide-band material properties, photodiodes based on  $Al_xIn_{1-x}Sb$  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  $10^{11} \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$  in p-i-n-structures, and  $D^*$  exceed of  $10^{12} \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$  in barrier structures.*

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

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-6-30-40

## 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**, 101771I (2017).
2. M. Razeghi, Eur. Phys. J. AP, No. 23, 149 (2003).
3. A. K. Bakarov, A. K. Gutakovsky, 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).
4. Adachi Sadao, *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors* (John Wiley & Sons Ltd., USA, 2009).
5. Klipstein Philip, Optical Engineering **50** (6), 061002 (2011).
6. O. Neshor and P. C. Klipstein, Opto-Electron. Rev. **14** (1), 61 (2006).
7. I. Shtrichman, D. Aronov, M. Ben Ezra, I. Barkai, E. Berkowicz, M. Brumer, R. Fraenkel, A. Glozman, S. Grossman, E. Jacobsohn, O. Klin, P. Klipstein, I. Lukomsky, L. Shkedy, N. Snapi, M. Yassen, and E. Weiss, Proc. SPIE Infrared Technology and Applications **8353**, 8353-2Y (2012).
8. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, A. I. Toropov, K. S. Juravlev, and V. V. Fadeev, Applied Physics, No. 3, 58 (2016) [in Russian].
9. C. Cervera, J. B. Rodriguez, R. Chaghi, H. Ait-Kaci, and P. Christol, J. Appl. Phys. **106**, 024501 (2009).
10. C. T. Sah, R. N. Noyce, and W. Shockley, Proc. Inst. Radio Eng. **45**, 1228 (1957).
11. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, P. S. Lazarev, A. A. Lopukhin, and V. F. Chishko, Applied Physics, No. 1, 18 (2020) [in Russian].