

УДК 621.383.4/5

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

Мезоструктуры и фотоприемные устройства на основе эпитаксиальных слоев InSb

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

Изложены аспекты выращивания эпитаксиальных слоев антимонида индия (InSb) на подложках InSb (InSb-on-InSb) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и изготовления фотоприемных устройств (ФПУ) на основе полученных эпитаксиальных структур (ЭС). Применение эпитаксиального выращивания позволяет создавать сложные структуры на основе InSb и управлять интенсивностью генерации-рекомбинации носителей заряда в фоточувствительных элементах (ФЧЭ) при обычных и повышенных температурах. Исследования характеристик ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм и ФПУ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе структур InSb-on-InSb средневолнового ИК диапазона спектра показали достижение высоких фотоэлектрических параметров, так среднее по ФЧЭ значение обнаружительной способности при $T = 77\text{ K}$ превысило $2 \times 10^{11}\text{ смВт}^{-1}\text{ Гц}^{1/2}$, а среднее значение эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) по элементам ФПУ с холодной диафрагмой 60° при $T = 77\text{ K}$ составило 10,5 мК. В режиме реального масштаба времени получены тепловизионные изображения повышенного пространственного разрешения по сравнению с ФПУ на объемном InSb.

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

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-6-513-522

1. Введение

Для промышленного производства фотоприемных устройств средневолнового ИК-диапазона спектра наиболее перспективным

исходным материалом являются эпитаксиальные структуры твердых растворов на основе полупроводникового материала антимонид индия (InSb) [1]. Использование эпитаксиального InSb в качестве поглощающего слоя обусловлено не только уникальными свойствами данного материала, фоточувствительного к излучению в диапазоне спектра 3–5 мкм, но также перехода к новой перспективной технологии создания высокотемпературных ФПУ с высокими фотоэлектрическими параметрами [2, 3].

Эпитаксиальные слои InSb выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на оптически прозрачных монокристаллических подложках из высоколегированного объемного материала InSb [4], полученных способом отверждения расплава по методу Чохральского в атмосфере инертного газа (Ar, He, N₂) или водорода при понижен-

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

Лопухин Алексей Алексеевич¹, нач. 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 08 ноября 2021 г.

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

ном давлении (~50 кПа). Поскольку подложки из InSb являются изотипными для эпитаксиального InSb, т.е. максимально близкими по кристаллической структуре, выращивание фоточувствительных слоев InSb (антимонид на антимониде – InSb-on-InSb) является выгодным для отработки ростовых режимов и легирования, и, в конечном счете, для получения слоев InSb высокого структурного совершенства.

На основе структур InSb-on-InSb изготавливались матричные фотоприемные устройства формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм и формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм по наиболее перспективной с точки зрения получения малоразмерных ФЧЭ и уменьшения взаимосвязи между ними мезотехнологии. В результате получены ФПУ с высокими фотоэлектрическими параметрами: среднее по фоточувствительным элементам (ФЧЭ) значение обнаружительной способности при $T = 77$ К составило более 2×10^{11} смВг⁻¹Гц^{1/2}, а среднее значение ЭШРТ по элементам ФПУ с холодной диафрагмой 60° при $T = 77$ К составило 10,5 мК.

Исследованы распределения темнового тока и спектральные характеристики фоточувствительности ФПУ при азотной температуре и повышенных температурах охлаждения до 110 К. Получены тепловизионные изображения высокого разрешения в режиме реального масштаба времени.

2. Получение фоточувствительных структур на основе InSb

Антимонид индия является узкозонным прямозонным полупроводником группы A₃B₅ с шириной запрещенной зоны $E_g = 0,17$ эВ при $T = 300$ К и $E_g = 0,22$ эВ при $T = 80$ К, он устойчив к химическим воздействиям, что обуславливает его высокую температурную стабильность. Эффективная масса электронов проводимости в InSb: $m_e = 0,013m_0$, дырок $m_p = 0,42m_0$, где m_0 – масса свободного электрона; при $T = 77$ К подвижность электронов – $1,1 \times 10^6$ см²/(В с), дырок – $9,1 \times 10^3$ см²/(В с). Кристаллическая структура имеет тип цинковой обманки, с постоянной кристаллической решетки $a = 6,48$ Å. Ширина запрещенной зоны InSb определяется уравнением [5]

$$E_g(T) = 0,235 - \frac{3,2 \times 10^{-4} T^2}{(220 + T)}.$$

Собственная концентрация носителей заряда в InSb задается формулой

$$n_i(T) = 5,63 \times 10^{14} T^{3/2} \exp(-0,127 / k_B T).$$

На рис. 1 показана температурная зависимость собственной концентрации InSb. ФПУ на основе InSb имеют высокий коэффициент поглощения и высокую чувствительность, необходимую для преобразования инфракрасного (ИК) излучения в электрический сигнал. Параметры ФПУ на основе ЭС InSb можно предварительно оценить по температурной зависимости темнового тока для данного материала, являющейся в первом приближении суммой диффузионного и генерационно-рекомбинационного Шокли-Рида-Холла (ШРХ) токов [6].

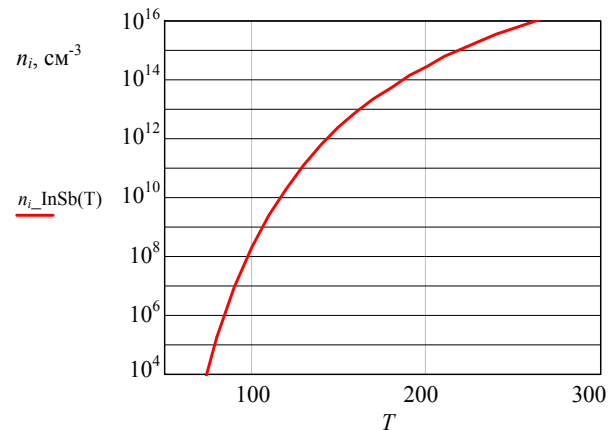


Рис. 1. Температурная зависимость собственной концентрации InSb.

Ток диффузии аппроксимируется в зависимости от температуры зависимостью $\sim T^r \exp(-E_{\text{diff}}/k_B T)$, где значение энергии равно ширине запрещенной зоны полупроводника при температуре абсолютного нуля $T = 0$ К $E_{\text{diff}} = E_g$

$$J_{\text{diff}}(T) = T^3 \exp(-E_g(T) / k_B T).$$

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

$$J_{gr}(T) = T^{3/2} \exp(-E_g(T) / 2k_B T).$$

На рис. 2 показаны температурные зависимости темновых токов диффузии и генерации-рекомбинации ШРХ для ФЧЭ на основе InSb.

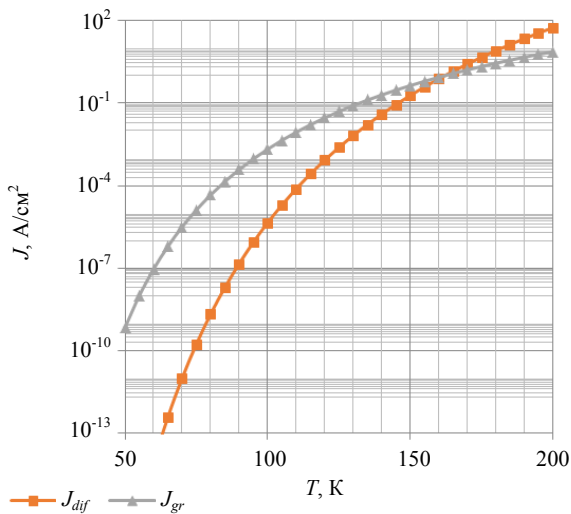


Рис. 2. Температурные зависимости темновых токов: диффузии и генерации-рекомбинации ШРХ для ФЧЭ на основе InSb.

Из рис. 2 видно, что при низких температурах преобладает генерационно-рекомбинационная составляющая темнового тока, а при высоких – диффузионная. На рис. 3 представлена температурная оценка обнаружительной способности для ФПУ на основе InSb, демонстрирующая возможность достижения высоких значений D^* , так при $T \approx 80$ К $D^* \geq 10^{11}$ смВт⁻¹Гц^{1/2}, а при $T = 100$ К значение $D^* \geq 10^{10}$ смВт⁻¹Гц^{1/2}.

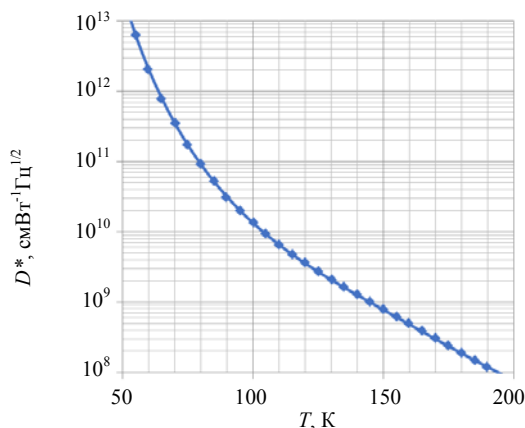


Рис. 3. Температурная зависимость обнаружительной способности ФПУ на основе InSb.

Из-за малого значения ширины запрещенной зоны, матрицы фоточувствительных элементов на основе объемного InSb, требуют

глубокого охлаждения (как правило, это температура жидкого азота $T = 77$ К при НКУ). Из-за преобладания механизма генерации-рекомбинации ШРХ при низких температурах ФПУ на основе InSb имеет повышенные шумы. За счет выращивания тонких кристаллически совершенных эпитаксиальных слоев InSb удастся уменьшить темновые токи и добиться улучшения фотоэлектрических параметров.

Эпитаксиальные слои InSb выращивались на подложках «epi-ready» InSb (100) *n*-типа проводимости. Рост проводился на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) с источником сурьмы (Sb), загружаемым в эффузионную ячейку, нагретую до температуры 900–1000 °С и обеспечивающую стабильный молекулярный поток Sb [7]. Давление потоков индия (In) и сурьмы (Sb) измерялось с помощью манометра «in situ», их отношение Sb/In характеризовалось коэффициентом в относительных единицах. Температура подложки измерялась с помощью термопары, расположенной на обратной стороне молибденового блока, на котором располагалась подложка.

Предэпитаксиальная подготовка поверхности подложки InSb заключалась в десорбции оксидов индия и сурьмы. Проблема термической очистки поверхности InSb состоит в том, что температура термодесорбции оксидного слоя, равная 515 °С, близка к температуре плавления данного материала (~ 527 °С) и значительно превышает температуру начала процесса испарения исходного материала, которая составляет 325 °С, вследствие чего при высоких температурах поверхность подложки деградирует.

Подготовка поверхности подложки InSb к росту представляет собой отдельную сложную технологическую задачу. Так как наличие окислов на ее поверхности влияет на зародышеобразование на начальной стадии эпитаксиального роста и, как следствие, на плотность дефектов в эпитаксиальных слоях, то для получения атомарно-гладкой поверхности InSb собственный окисный слой необходимо удалить. В технологии подготовки поверхности подложки InSb для выращивания гетероструктуры молекулярно-лучевой эпитаксией проводилась предварительная обработка поверхности подложки с модификацией состава оксидного слоя. Окончательное удаление окисла осуществляли вакуумным отжигом

непосредственно в ростовой камере, параметры отжига определяются толщиной и составом окисного слоя, который образуется при контакте поверхности с кислородом воздуха, при этом окисный слой предотвращает нежелательное взаимодействие других неконтролируемых компонентов атмосферы с материалом подложки.

При выращивании структур использовались подложки зарубежных производителей и отечественного предприятия АО «Гиредмет». Средняя скорость роста эпитаксиального слоя составляла $\sim 0,6$ мкм/ч, она оценивалась по колебаниям интенсивности ДБЭ и подтверж-

далась с помощью измерения профиля поверхности. Рост эпитаксиального слоя InSb проводился в условиях обогащения поверхности роста сурьмой при наличии в картине дифракции ассиметричной сверхструктуры (1×3) при заданном соотношении потоков сурьмы и индия и температуре подложки $T \geq 400$ °C. Для структур различной топологии выращивались слои InSb толщиной от 1 до 5 мкм. Структура образцов InSb-on-InSb представлена в табл. 1. Нумерация слоев начинается от подложки.

На рис. 4 представлены фотографии выращенных эпитаксиальных структур.

Таблица 1

| № слоя | Назначение | Толщина, мкм | Уровень легирования, см ⁻³ | Тип легирования, см ⁻³ |
|--------|--------------------------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 2 | Эпитаксиальный слой InSb | 1–5 | $(0,5–2) \times 10^{15}$ | нелегированный |
| 1 | Подложка InSb (001), Ø 50,8 мм | 550 | $(2–4) \times 10^{17}$ | Te |

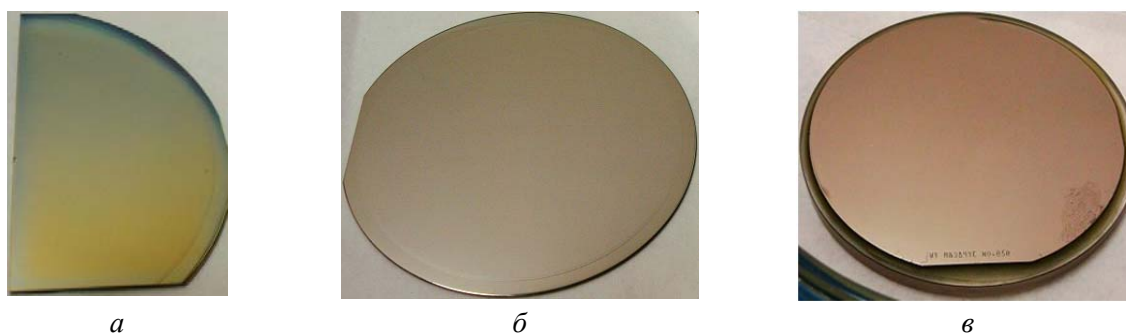


Рис. 4. Типичный вид эпитаксиальных структур InSb-on-InSb.

Результаты исследований морфологии поверхности ЭС InSb показывали, что в диапазоне заданных условий роста, более высокая температура роста приводит к менее шероховатой поверхности в условиях стабилизированного потока Sb независимо от отношения потоков Sb/In. Измерения ЭС InSb показывают, что количество дефектов в центральной области пластин находится в диапазоне 10–50 шт./см², средние значения шероховатости по площади образцов (рис. 4): (а) 2,5 нм; (б) 2,7 нм; (в) 2,8 нм. У образцов ЭС InSb в диапазоне магнитных полей от 0,01 до 0,32 Тл наблюдались типичные значения концентрации и подвижности носителей заряда, как у объемных кристаллов InSb, что свидетельствует об отсутствии значительных несовершенств на границе ЭС/подложка.

Используя технологические операции прецизионного травления и ионной импланта-

ции Ве, изготовлены фоточувствительные структуры с *p-n*-переходом, используемые для формирования матриц ФЧЭ. Состав и порядок расположения слоев в многослойной эпитаксиальной структуре с *p-n*-переходом представлен на рис. 5.

| |
|---|
| Фотодиодный слой InSb <i>p</i> -типа проводимости толщина 0,5 мкм, $p \sim (1–2) \times 10^{18}$ |
| Активный поглощающий слой InSb <i>n</i> -типа толщина 1–5 мкм $n \sim 1 \times 10^{15}$ см ⁻³ |
| Граница раздела (возможен остаточный слой In ₂ O ₃) |
| Оптически прозрачная подложка InSb $n \sim (2–4) \times 10^{17}$ см ⁻³ |

Рис. 5. Состав и порядок расположения слоев в многослойной эпитаксиальной структуре с *p-n*-переходом.

На рис. 6, а, б представлена морфология поверхности эпитаксиальной структуры InSb на подложке InSb и ее трехмерное изображение, полученные методом атомно-силовой

микроскопии (АСМ). Среднеквадратичная шероховатость в области 5×5 мкм составила менее 0,4 нм.

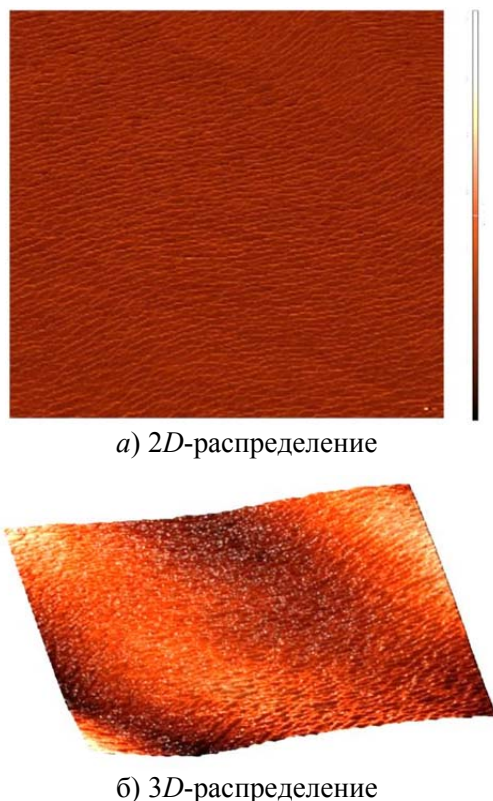


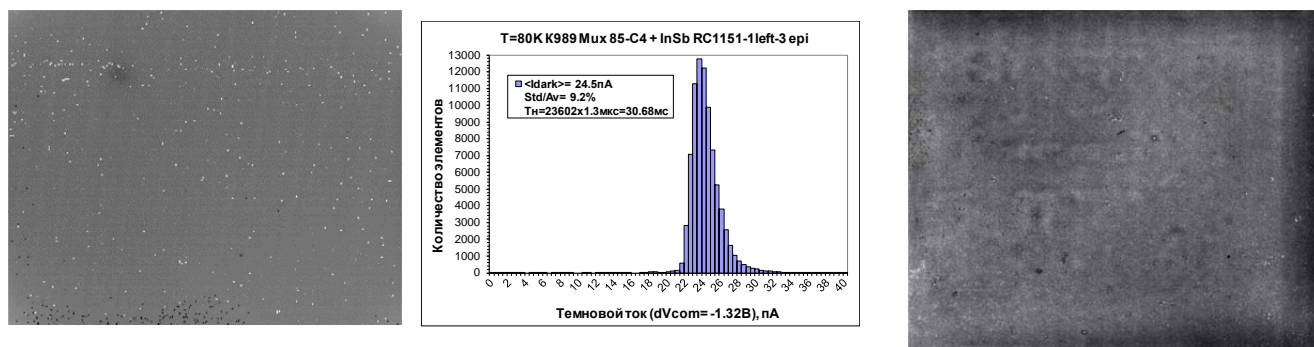
Рис. 6. Морфология поверхности эпитаксиальной структуры InSb на InSb, полученная методом АСМ: (а) 2D-распределение неоднородности структуры; (б) 3D-распределение неоднородности.

Таким образом, используя передовые технологические методы подготовки поверхности подложки InSb, включая температурную об-

работку для десорбции окислов и предэпитаксиальную обработку, получены подложки InSb «epi-ready» с минимально дефектным верхним слоем для роста монокристаллического InSb. Методом МЛЭ выращены эпитаксиальные слои InSb-on-InSb, из которых технологическими операциями прецизионного травления и ионной имплантации Ве изготовлены фоточувствительные структуры с *p-n*-переходом, используемые для производства ФПУ. Метод дифракции быстрых электронов (ДБЭ), отраженных от поверхности растущего слоя, позволял контролировать процесс молекулярно-лучевой эпитаксии [8, 9]. 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 более $10^5 \text{ см}^2/(\text{В сек.})$, что близко к показателям монокристаллического антимонида индия [10, 11].

3. Изготовление фотоприемных устройств на основе эпитаксиальных структур InSb

На основе эпитаксиальных слоев InSb изготовлены ФПУ форматов 320×256 элементов с шагом 30 мкм и 640×512 элементов с шагом 15 мкм с нелегированным или слаболегированным до уровня $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ поглощающим слоем InSb. На рис. 7, а, б показаны распределения темновых токов в гибридных сборках МФЧЭ и БИС указанного формата.



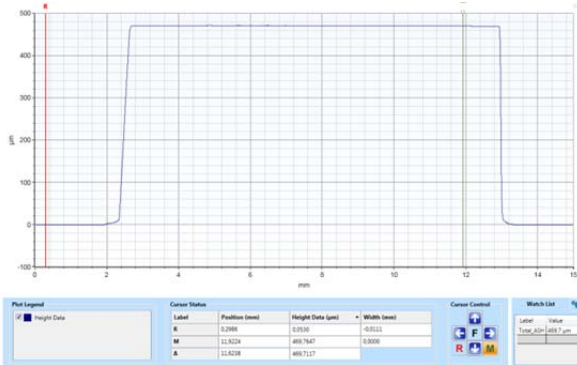
а) диаграмма и гистограмма распределения темнового тока по МФЧЭ формата 320×256 с шагом 30 мкм

б) диаграмма распределения темнового тока по МФЧЭ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм

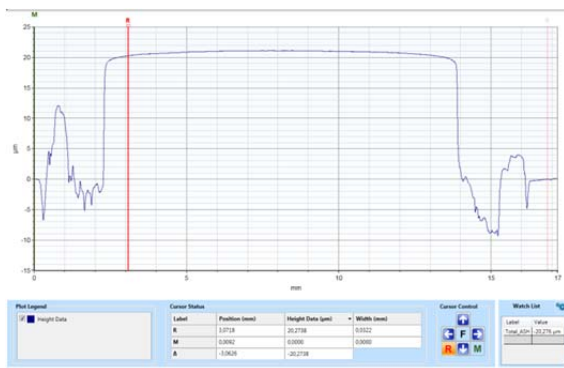
Рис. 7. Распределение темновых токов по МФЧЭ формата 320×256 и 640×512 элементов, изготовленных на основе эпитаксиальных структур InSb.

Однородность параметров по поверхности матриц характеризуется распределением темновых токов, которое должно быть равномерным и однородным, черные пиксели обозначают обрывы, белые – повышенные токи утечки, как правило, обусловленные наличием кристаллических дефектов подложки InSb.

Одной из ключевых технологических операций при изготовлении ФПУ является утоньшение подложки InSb, поскольку даже высоколегированная подложка оказывает влияние на прохождение излучения в структуре в сторону уменьшения квантовой эффективности, что недопустимо. Сложность технологии утоньшения объемного InSb после гибридной МФЧЭ и БИС состоит в том, что толщина объемного кристалла должна быть уменьшена от 550 мкм до ~ 10 мкм, при этом утоньшается уже готовая гибридная сборка. На рис. 8, а, б показаны профили охлаждаемого узла до и после технологической операции утоньшения. Показано уменьшение толщины гибридного узла от 450 мкм до 21 мкм.



а) до утоньшения



б) после утоньшения

Рис. 8. Профили охлаждаемого узла.

На рис. 9 представлены зависимости обнаружительной способности (1), пороговой мощности (2) от времени накопления (t_{int}) для

ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм, полученного на основе ЭС InSb.

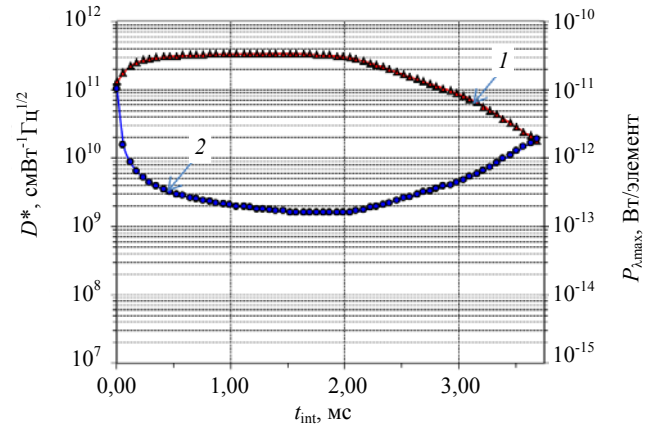


Рис. 9. Зависимости среднего значения обнаружительной способности (1) и пороговой мощности (2) от времени накопления для ФПУ формата 320×256 с шагом 30 мкм на основе ЭС InSb.

Исследования характеристик ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм и формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе структур InSb-on-InSb показали достижение предельных фотоэлектрических параметров: среднее по фоточувствительным элементам значение обнаружительной способности при времени накопления $t_{int} = 1,4$ мс более $D^* \geq 2 \times 10^{11}$ смВт⁻¹Гц^{1/2}, пороговой мощности $P_{\lambda max} \sim 10^{-13}$ Вт/элемент.

На рис. 10 представлены зависимости эквивалентной к шуму разности температур (NETD) (1) и фонового тока I_b (2) от времени накопления.

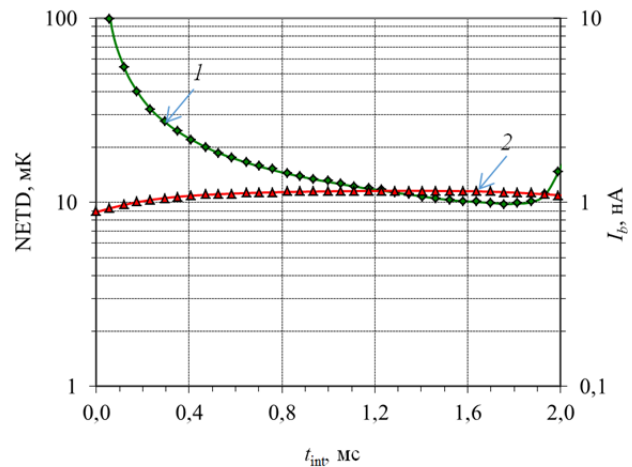


Рис. 10. Зависимость эквивалентной шуму разности температур NETD (1) и фонового тока I_b (2) от времени накопления.

На рис. 11 показана гистограмма распределения ЭШРТ (NETD) по элементам матри-

цы при $T = 80$ К и напряжении обратного смещения $V = -1,42$ В.

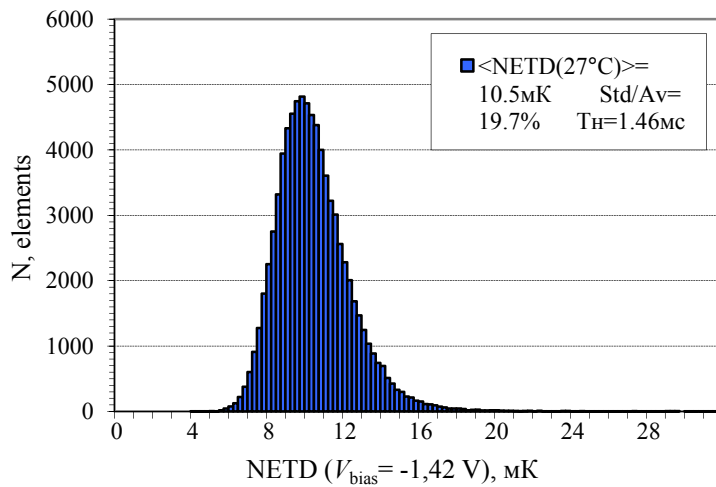


Рис. 11. Гистограмма распределения ЭШРТ по элементам матрицы при $T = 80$ К.

Среднее значение ЭШРТ с холодной диафрагмой 60° в рабочем режиме при времени накопления $t_{\text{int}} = 1,6$ мс составило $\text{NETD} = 10,5$ мК, фоновый ток составил $I_b \sim 1$ нА, количество дефектных элементов менее 0,5 %. Значение ЭШРТ минимально при лучшем в серии измерений времени накопления $t_{\text{int}} = 1,6$ мс и резко возрастает при малых временах накопления менее 1 мс. Незначительная вариация измеренного значения фонового тока ~ 1 нА показывает его независимость от времени накопления и характеризует малую погрешность метода измерений.

На рис. 12 представлены примеры тепловизионных изображений, полученных с помощью ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм, изготовленного на основе ЭС InSb.

Проведена оценка пространственного разрешения ФПУ формата 640×512 элементов в аппаратуре применения по глубине модуляции яркости электро-оптическим методом. На рис. 13 показана осциллограмма, иллюстрирующая схему метода оценки пространственного разрешения по глубине модуляции яркости выходного сигнала ФПУ.



а



б

Рис. 12. Тепловизионные изображения, полученные с помощью ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм, изготовленного на основе эпитаксиальной структуры InSb.

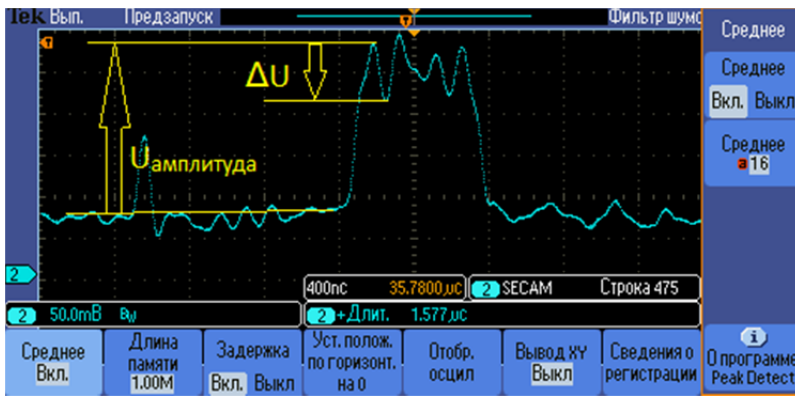


Рис. 13. Осциллограмма, иллюстрирующая метод оценки пространственного разрешения по модуляции яркости выходного сигнала ФПУ $\Delta U/U_{\text{амплитуда}}$

На рис. 14 приведены результаты измеренных зависимостей модуляции яркости выходного сигнала для ФПУ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм, установленных в тепловизионную систему с объективом $F = 200$ мм и относительным отверстием 1:4, от толщины поглощающего слоя на пространственных частотах мираы $3,5 \text{ мрад}^{-1}$ и $5,5 \text{ мрад}^{-1}$. В табл. 2 представлены результаты, как прямого изображения, уменьшающим влияние разрешения дисплея.

Глубина модуляции максимальна для эпитаксиальной структуры с толщиной эпитаксиального слоя $d = 5$ мкм. Для объемных структур глубина модуляции уменьшается с увеличением толщины структуры. Это показывает преимущество эпитаксиальных структур по сравнению с объемными структурами антимонида индия по пространственному разрешению, что обусловлено увеличением взаимосвязи между элементами из-за боковой диффузии неосновных носителей заряда. Взаимосвязь резко увеличивается при толщине структуры более 13–15 мкм для шага ФЧЭ 15 мкм. Глубина модуляции не возрастает до

единицы даже для сверхтонких эпитаксиальных слоев. Для полного устранения взаимосвязи между элементами, обусловленной боковой диффузией неосновных носителей заряда, необходимо полное разделение элементов, то есть разделение активного слоя на полную глубину.

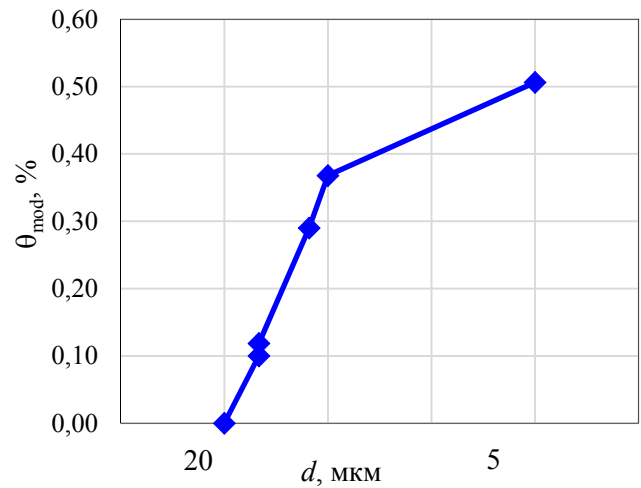


Рис. 14. Зависимость глубины модуляции яркости выходного сигнала ФПУ от толщины активного слоя МФЧЭ на пространственной частоте $5,5 \text{ мрад}^{-1}$.

Таблица 2

Фотоэлектрические характеристики ФПУ при температуре 80 К

| Номер образца | $d, \text{ мкм}$ | $5,5 \text{ мрад}^{-1}$ без масштабирования | $5,5 \text{ мрад}^{-1}$ масштаб |
|---------------|------------------|--|---------------------------------|
| П15-369 | 5 | 0,51 | 0,44 |
| П15-411 | 10 | 0,37 | 0,37 |
| П15-382 | 11 | 0,29 | 0,30 |
| П15-391 | 15 | 0,12 | 0,14 |
| П15-357 | 15 | 0,10 | 0,15 |
| П15-279 | 20 | 0,00 | 0,03 |

Примечание. d – толщина активного слоя.

4. Заключение

Используя передовые технологические методы подготовки поверхности подложки InSb, включая температурную обработку для десорбции окислов и предэпитаксиальную обработку, получены подложки InSb «epi-ready» с минимально дефектным верхним слоем для роста монокристаллического InSb. Методом МЛЭ выращены эпитаксиальные слои InSb-on-InSb, из которых технологическими операциями прецизионного травления и ионной имплантации Ве изготовлены фоточувствительные структуры с $p-n$ -переходом для дальнейшего производства ФПУ.

Изготовлены и исследованы ФПУ формата 320×256 и 640×512 элементов на основе эпитаксиальных слоев InSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Измерены основные фотоэлектрические параметры ФПУ: среднее по фоточувствительным элементам значение обнаружительной способности при времени накопления $t_{\text{int}} = 1,4$ мс составило более $D^* \geq 2 \times 10^{11}$ смВт $^{-1}$ Гц $^{1/2}$, а среднее значение ЭШРТ с охлаждаемой диафрагмой 60° составило NETD $\approx 10,5$ мК количество дефектных элементов не превышало 0,5 %.

Оценка пространственного разрешения по глубине модуляции яркости, проведенная в аппаратуре применения электрооптическим методом, показала более высокое пространственное разрешение у ФПУ формата 640×512

с шагом 15 мкм и эпитаксиальным поглощающим слоем InSb толщиной 5 мкм по сравнению с ФПУ на основе объемного InSb, что позволяет работать без потери чувствительности на подложках со сравнительно малой концентрацией носителей заряда $n \sim (2-4) \times 10^{17}$ см $^{-3}$ и улучшенной дефектностью выращенных эпитаксиальных слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Болтарь К. О., Власов П. В., Лазарев П. С., Лопухин А. А., Чижко В. Ф. // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 18.
4. Rogalski A., Antoszewski J., Faraone L. // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 091101.
5. Rzeghi M. // Eur. Phys. J. AP. 2003. Vol. 23. P. 149.
6. Klipstein P., Klin O., Grossman S. et al. // Optical Engineering. 2011. Vol. 50 (6). P. 061002.
7. Brewer P. D., Chow D. H., Miles R. H. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1996. Vol. 14. P. 2335.
8. Oe K., Ando S., Sugiyama K. // Jpn. J. Appl. Phys. 1980. Vol. 19. P. 417.
9. Wood C. E. C., Singer K., Ohashi T., Dawson L. R., Noreika A. J. // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. P. 2732.
10. Noreika A. J., Gregg J. J., Takei W. J., Francombe M. H. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1983. Vol. 1. P. 558.
11. Bosch A. J., van Welzenis R. G., Schannen O. F. Z. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58. P. 3434.

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

Mesa-structures and Focal Plane Arrays based on epitaxially grown InSb layers

K. O. Boltar^{1,2}, A. A. Lopuhin¹, 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 November 08, 2021

Aspects of epitaxially grown indium antimonide (InSb) on InSb substrates (InSb-on-InSb) by molecular beam epitaxy (MBE) for the 2D focal plane arrays fabrication process have

been described. The epitaxial growth offers possibility for complex structure production, and then such structures suppose more effective control of the thermal generation charge carriers as the detector temperature is raised above 80 K. Investigations of mid-wave infrared (MWIR) 320×256 FPAs with 30 μm pitch and 640×512 FPAs with 15 μm pitch based on InSb-on-InSb layers have shown high performance: the average detectivity at T = 77 K more than $2 \times 10^{11} \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$, the average value of noise equivalent temperature difference (NETD) with a cold aperture of 60° at T = 77K was in the range of 10–20 mK. High quality thermal imaging images were obtained in real time mode.

Keywords: MWIR, epitaxially grown indium antimonide (InSb), Focal Plane Array (FPA), dark current.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-6-513-522

REFERENCES

1. 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).
2. 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].
3. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, P. S. Lazarev, A. A. Lopukhin, and V. F. Chishko, *Applied Physics*, No. 1, 18 (2020) [in Russian].
4. A. Rogalski, J. Antoszewski, and L. Faraone, *J. Appl. Phys.* **105**, 091101 (2009).
5. M. Razeghi, *Eur. Phys. J. AP* **23**, 149 (2003).
6. P. Klipstein, O. Klin, S. Grossman et al., *Optical Engineering* **50** (6), 061002 (2011).
7. P. D. Brewer, D. H. Chow, and R. H. Miles, *J. Vac. Sci. Technol. B* **14**, 2335 (1996).
8. K. Oe, S. Ando, and K. Sugiyama, *Jpn. J. Appl. Phys.* **19**, 417 (1980).
9. C. E. C. Wood, K. Singer, T. Ohashi, L. R. Dawson, and A. J. Noreika, *J. Appl. Phys.* **54**, 2732 (1983).
10. A. J. Noreika, J. J. Gregg, W. J. Takei, and M. H. Francombe, *J. Vac. Sci. Technol. A* **1**, 558 (1983).
11. A. J. Bosch, R. G. van Welzenis, and O. F. Z. Schanzen, *J. Appl. Phys.* **58**, 3434 (1985).