

## Матричные фотоприемные устройства на основе слоев InSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии

© А.К. Бакаров,<sup>1,2</sup> А.К. Гутаковский,<sup>1</sup> К.С. Журавлев,<sup>1,2</sup> А.П. Ковчавцев,<sup>1</sup> А.И. Торопов,<sup>1</sup>  
И.Д. Бурлаков,<sup>3</sup> К.О. Болтарь,<sup>3</sup> П.В. Власов,<sup>3</sup> А.А. Лопухин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> АО НПО „Орион“,  
111123 Москва, Россия  
e-mail: bakarov@isp.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 12 июля 2016 г.)

Развита технология молекулярно-лучевой эпитаксии InSb слоев на подложках InSb. На основе выращенных слоев изготовлены матричные фотоприемные устройства (МФПУ) средневолнового инфракрасного диапазона. Проведено сравнение фотоэлектрических характеристик МФПУ на основе эпитаксиальных слоев и МФПУ, серийно выпускаемых с использованием монокристаллов InSb.

DOI: 10.21883/JTF.2017.06.44514.1986

### Введение

Одной из самых перспективных наукоемких технологий XXI в. является тепловидение. В настоящее время стремительно растут производство и широкое внедрение тепловизионной техники во многие отрасли хозяйственной деятельности. Без тепловизионных каналов невозможно представить современные средства наблюдения за окружающей средой и обнаружения движущихся объектов, используемые в наземных и морских условиях, в авиации и космосе. Тепловизоры активно применяются для контроля процессов промышленного производства, в астрономии, медицине, биологии и других областях. Бурное развитие тепловизионной техники потребовало кардинального совершенствования технологии ключевых элементов тепловизионной системы — инфракрасных (ИК) матричных фотоприемных устройств (МФПУ). В настоящее время наибольшее количество МФПУ средневолнового ИК-диапазона изготавливаются на основе фотодиодов из антимонида индия [1–3]. В качестве исходного материала используют монокристаллический InSb или эпитаксиальные слои InSb, обычно выращиваемые методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Эпитаксиальные слои менее дефектные, более однородные, имеют меньшую концентрацию фоновой примеси, чем монокристаллические пластины, что позволяет повысить характеристики МФПУ [4–7]:

- уменьшить процент дефектных элементов,
- повысить количество элементов в матрице,
- уменьшить фотоэлектрическую и динамическую взаимосвязь элементов,
- повысить рабочую температуру,
- уменьшить вес.

Кроме того, эпитаксиальное выращивание позволяет оптимизировать характеристики детекторов путем со-

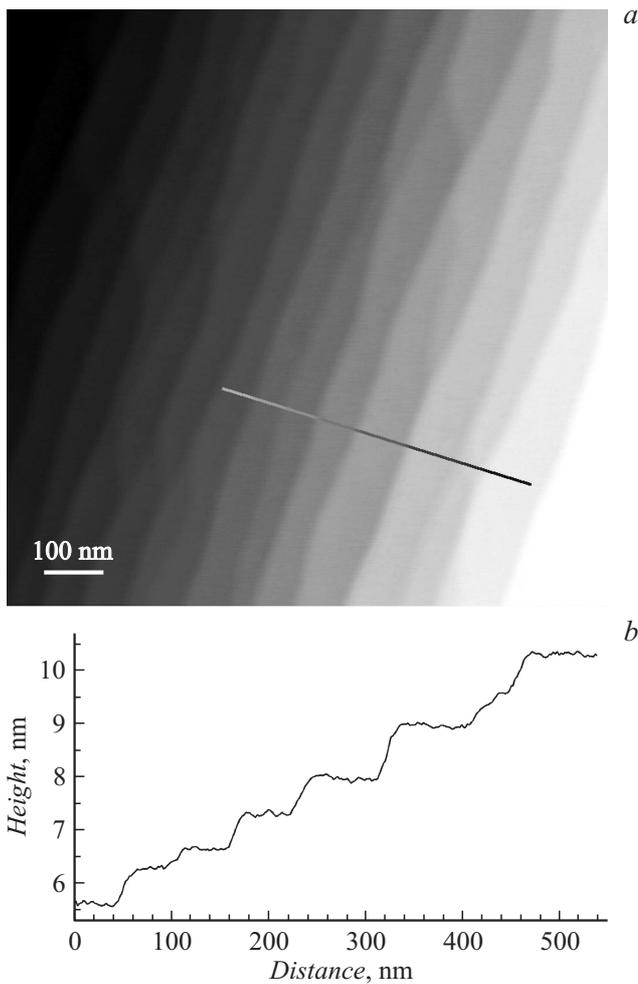
здания многослойных эпитаксиальных гетероструктур с заданным распределением профиля легирования и состава по толщине, что открывает возможность дальнейшего улучшения характеристик МФПУ [8].

В настоящей работе сообщается о разработке МЛЭ технологии роста InSb-слоев на проводящих подложках InSb, представлены результаты исследования фотоэлектрических характеристик МФПУ на основе полученных слоев InSb и обсуждаются направления дальнейшего развития конструкции InSb-структур для улучшения характеристик МФПУ.

### Рост слоев InSb

Слой InSb формировался методом МЛЭ в установке Compact-21T на подложках InSb (100) „epi-ready“ толщиной 500  $\mu\text{m}$  и диаметром 50 mm, легированных теллуром с концентрацией электронов ( $n$ )  $n = (1-3) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Калибровка потоков материалов осуществлялась по ионизационному вакуумметру, помещаемому во время измерения перед подложкой, и осцилляциям зеркального пучка в дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение. В качестве реперной точки для определения температуры подложки использовалась температура перехода реконструкции  $c(4 \times 4) \rightarrow (1 \times 3)$  поверхности InSb (100) в потоке сурьмы [9].

На исходной поверхности подложки InSb присутствовал плотный слой окислов сурьмы и индия — после помещения подложки в ростовую камеру картинка ДБЭ представляла собой практически ровный фон. Окисел удалялся с помощью нагрева подложки в ростовой камере. Первая стадия нагрева — до появления первых признаков слета окисла — проводилась без потока сурьмы. Дальнейший нагрев подложки проводился в потоке



**Рис. 1.** *a* — АСМ изображение поверхности слоя InSb в области сканирования  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ , *b* — профиль высоты вдоль линии, показанной на верхнем рисунке.

сурьмы для предотвращения ее неравновесного испарения. В результате такого отжига окисел с поверхности слетал — величина фона в картине ДБЭ значительно уменьшилась, появлялись яркие структурные рефлекссы. Затем подложка охлаждалась до температуры  $\sim 350^\circ\text{C}$ , и при этой температуре начинался процесс роста эпитаксиального слоя InSb. После формирования эпитаксиального слоя стали видны дополнительные, дробные рефлекссы, соответствующие сверхструктуре  $c(4 \times 4)$  поверхности InSb (100).

С целью оптимизации параметров роста были выращены слои InSb в условиях существования разных поверхностных сверхструктур. Измерения с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) поверхности эпитаксиальной пленки InSb толщиной  $2 \mu\text{m}$ , выращенной в условиях существования сверхструктуры  $c(4 \times 4)$ , дали значение среднеквадратичной шероховатости ( $Rms$ )  $Rms = 2.76 \text{ nm}$  (для области сканирования  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ ). InSb той же толщиной  $2 \mu\text{m}$ , выращенный в условиях существования сверхструктуры  $(1 \times 3)$ , показал значе-

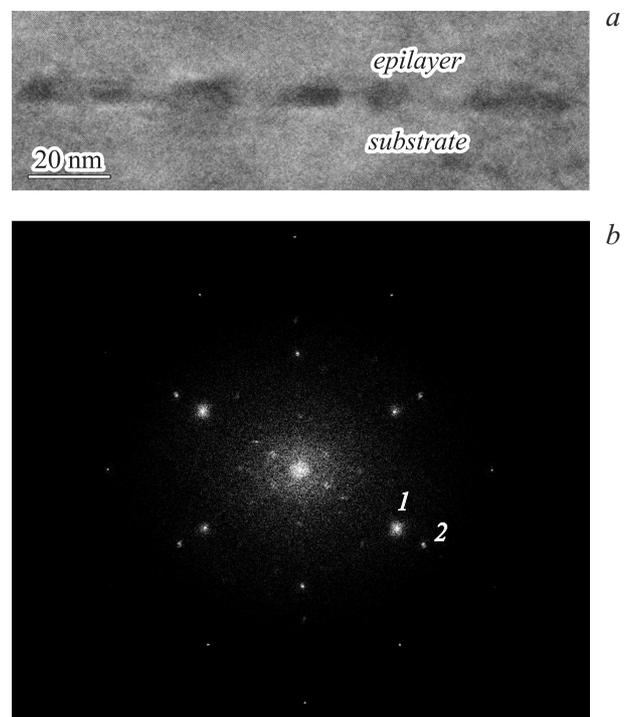
ние  $Rms = 0.24 \text{ nm}$ . На поверхности этого слоя формируются ступени высотой  $\sim 0.65 \text{ nm}$  (рис. 1) и шириной  $\sim 65\text{--}70 \text{ nm}$ , что говорит о ее высоком совершенстве.

Рост эпитаксиального слоя InSb проводился в условиях обогащения поверхности сурьмой в области существования сверхструктуры  $(1 \times 3)$  при соотношении потоков сурьмы и индия 1.4:1 и температурах подложки  $395\text{--}410^\circ\text{C}$ . Для создания МФПУ были выращены слои InSb толщиной  $5 \mu\text{m}$ .

### Характеризация слоев InSb

Структура слоев и границ раздела исследовалась методом высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ) на микроскопе JEOL-4000EX при ускоряющем напряжении 400 кВ. Образцы препарировались в виде поперечных срезов по плоскостям (110) по стандартной технологии, включающей шлифовку, полировку и на заключительной стадии — малоугловое травление ионами аргона с энергией 1–5 keV. Цифровая обработка экспериментальных ВРЭМ изображений проводилась с использованием пакета программ Digital Micrograph (Gatan).

Исследования методом ВРЭМ не обнаружили каких-либо дефектов структуры дислокационного типа в объеме всех изученных эпитаксиальных пленок, т.е. плотность линейных и планарных дефектов структуры была



**Рис. 2.** *a* — ВРЭМ изображения границы раздела эпитаксиальный слой–подложка; *b* — картина микродифракции нанокластера  $\text{In}_2\text{O}_3$  на гетерогранице эпитаксиальный слой InSb–подложка InSb (100). 1 — рефлекссы InSb, 2 —  $\text{In}_2\text{O}_3$ .

Сравнение параметров МФПУ на основе эпитаксиально выращенного и объемного InSb

Наименование параметра, единицы измерения	МФПУ на эпитаксиальном InSb	МФПУ на объемном InSb
Время накопления, соответствующее уровню 0.7 от насыщения сигнала (при относительном отверстии охлаждаемой диафрагмы 1:1), ms	1.46	0.54
Среднее значение ЭШРТ, mK	10.5	11.4
Вольтовая чувствительность ( $Su_{\lambda \max}$ ), V/Wt	$4.8 \cdot 10^8$ ( $T_H = 0.35$ ms)	$6.7 \cdot 10^8$ ( $T_H = 0.33$ ms)
Разброс чувствительности ( $Std/\langle Su \rangle$ ), %	6.9	3.9
Количество дефектных элементов, %	0.12	0.24
Максимальный кластер, элементы	3	15
Длинноволновая граница спектральной чувствительности по уровню 0.5, $\mu\text{m}$	4.92	4.98
Коротковолновая граница спектральной чувствительности по уровню 0.5, $\mu\text{m}$	4.32	2.93
Квантовый выход, %	56	85
Коэффициент фотоэлектрической взаимосвязи, %	9	13
Минимально различимая разница температур (14 штрих/мм), mK	100	240
Темновой ток, пА	24.5	8
Динамическая взаимосвязь, %	1.9	0.8

менее  $10^4 \text{ cm}^{-2}$ . В то же время на достаточно толстых участках препарированного для исследований образца, когда толщина фольги более 100 nm, на границе раздела пленка–подложка отчетливо визуализировались более темные относительно общего фона области с контрастом, не позволяющим разрешить тонкую структуру этих образований (рис. 2). Размер этих областей варьируется в диапазоне 10–30 nm. При изучении более тонких участков препарированных объектов, когда толщина фольги составляет 20–40 nm, удалось более детально исследовать структуру этих кластеров. На рис. 2, b приведены результаты такого анализа. Анализ ВРЭМ изображений и картин микродифракции показал, что на границе раздела эпитаксиальный слой InSb — подложка InSb (100) наблюдаются нанокристаллы оксида индия, эпитаксиально ориентированные относительно кристаллической решетки подложки. Рефлексы, отмеченные цифрой 2 на рис. 2, b, соответствуют дифракции на следующих плоскостях кристаллической решетки  $\text{In}_2\text{O}_3$ , имеющей пространственную группу Ia3 (206): (222) — 0.292 nm; (400) — 0.253 nm и (440) — 0.179 nm.

На эпитаксиальных слоях InSb были изготовлены тестовые МДП структуры для проведения измерений вольт-фарадных характеристик с целью определения концентрации носителей заряда. Анализ  $C-V$ -характеристик позволил установить, что слои имеют  $n$ -тип проводимости с концентрацией электронов при температуре жидкого азота  $n = (1.2-1.8) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

## Фотоэлектрические характеристики МФПУ

На основе выращенных слоев были изготовлены МФПУ и проведены измерения характеристик относительной спектральной чувствительности, вольтамперной характеристики структуры „фотодиод–согласующий транзистор“, коэффициента фотоэлектрической взаимосвязи, динамической взаимосвязи („эффект памяти“) и долговременной стабильности [10]. Получены зависимости сигнала, шума и среднего значения эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) МФПУ от времени накопления, значения дефектности, максимального кластера, квантового выхода, темнового тока и т.д.

В таблице приведены значения основных фотоэлектрических параметров МФПУ на основе эпитаксиально выращенного и объемного InSb. Для МФПУ на основе объемного InSb приводятся средние значения параметров серийно выпускаемых изделий [11]. Фотоэлектрические характеристики МФПУ были измерены при температуре 80 K.

На рис. 3 показаны спектры пропускания подложки, матрицы фоточувствительных элементов и атмосферы. Видно, что степень легирования подложки ( $n = (1.9-3.1) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) подобрана так, что коротковолновая граница ее спектра пропускания при  $T = 80$  K составляет 4.75  $\mu\text{m}$  по уровню 0.5. При утонении подложки до 12  $\mu\text{m}$  коротковолновая граница спектральной

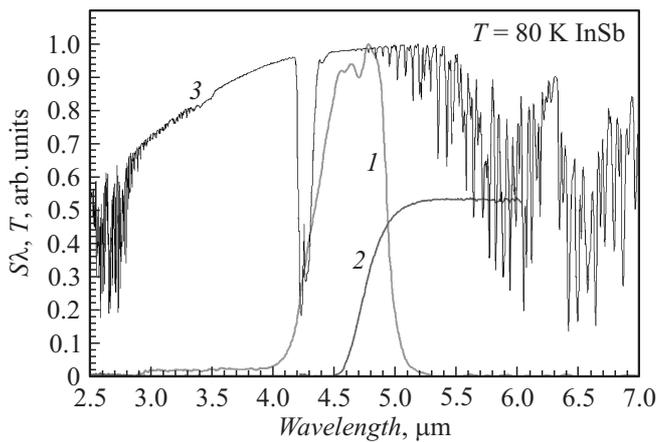


Рис. 3. Спектры пропускания матрицы фоточувствительных элементов (1), подложки (2) и атмосферы (3).

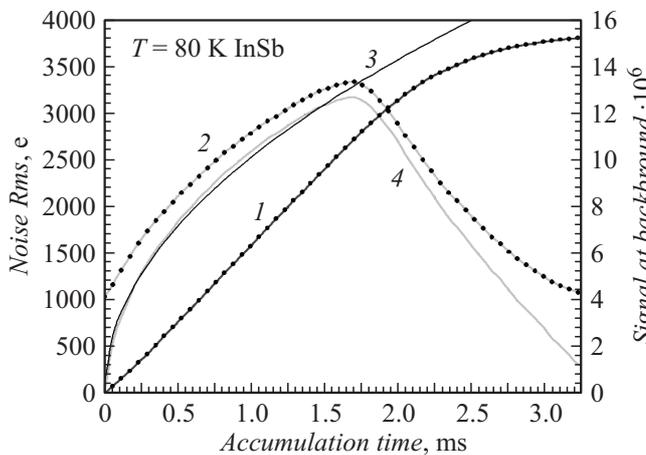


Рис. 4. Зависимости среднего значения сигнала МФПУ (1) и среднеквадратичного шума МФПУ на основе эпитаксиального InSb (2), расчетного шума в VLIP-режиме (3) и шума фотодиодов, полученного при вычитании из шума МФПУ шума электроники (4) от времени накопления.

чувствительности МФПУ сдвигается до  $4.35 \mu\text{m}$  и попадает непосредственно в окно пропускания атмосферы, граница с линией поглощения  $\text{CO}_2$  ( $4.2 \mu\text{m}$ ). Длинноволновая граница спектральной чувствительности МФПУ определяется охлаждаемым оптическим фильтром.

На рис. 4 представлены зависимости среднего значения сигнала МФПУ (1) и среднеквадратичного шума МФПУ на основе эпитаксиального InSb (2), расчетного шума в режиме, ограниченном флуктуациями фонового излучения (VLIP-режиме) (3), и шума фотодиодов, полученного при вычитании из шума МФПУ шума электроники (4), от времени накопления. На накопительном конденсаторе в ячейке шум МФПУ при времени накопления, равном нулю, составляет  $\sim 1000$  электронов. При извлечении квадратного корня из разности квадратов шума МФПУ и шума электроники видно хорошее совпадение вычтенного шума с расчетным шумом,

ограниченным флуктуациями фонового излучения, что свидетельствует об отсутствии избыточных собственных шумов фотодиодов и некоррелированности шума фотодиодов и электроники считывания.

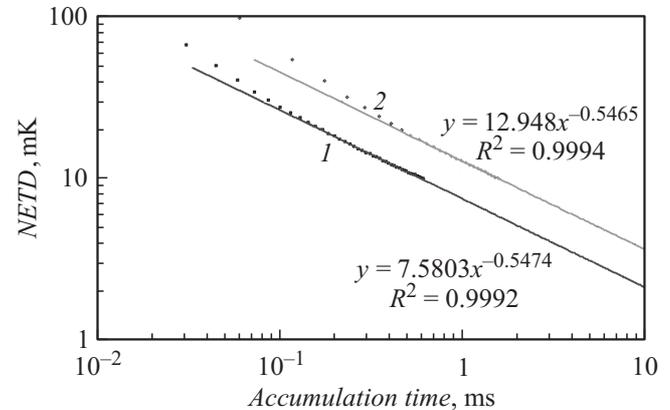


Рис. 5. Зависимость ЭШРТ от времени накопления для МФПУ на (1) эпитаксиальном и (2) объемном InSb.

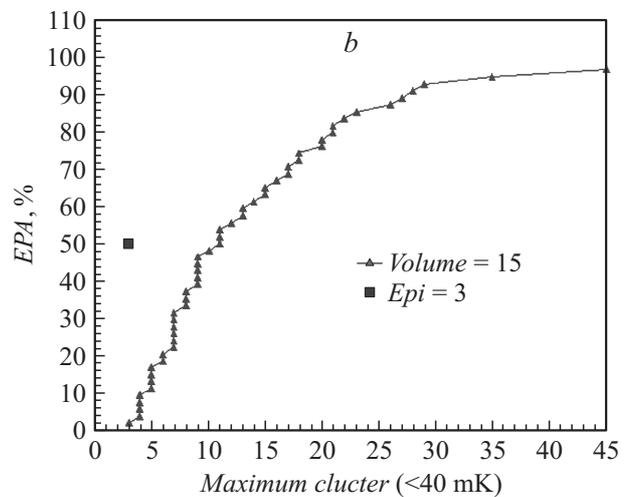
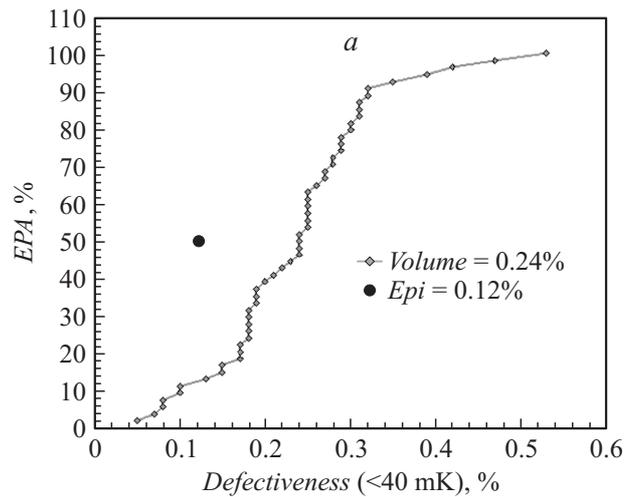


Рис. 6. Дефектность (a) и максимальный кластер (b) образцов МФПУ на эпитаксиальных слоях InSb (отдельные знаки) и на объемном InSb (соединенные знаки).

На рис. 5 представлены зависимости ЭШРТ от времени накопления для МФПУ на объемном (1) и эпитаксиальном (2) InSb. Видно, что для обоих типов МФПУ в диапазоне рабочих времен накопления наблюдается близкая к корневой зависимость. Это также свидетельствует о работе МФПУ в режиме, близком к режиму ограничения фоном. Среднее значение ЭШРТ при относительном отверстии 1:0.94 на кадровой частоте 100 Hz при времени накопления 1.5 ms МФПУ на основе эпитаксиального InSb составило 10.5 mK, что совпадает с ЭШРТ МФПУ на основе объемного InSb при времени накопления 0.6 ms.

Вольтовая чувствительность МФПУ на эпитаксиальном InSb оказалась меньше, что обусловлено неоптимальной толщиной фоточувствительного слоя и ограничением коротковолновой границы фоточувствительности 4.3  $\mu\text{m}$  из-за поглощения в подложке. Как показано на рис. 6, дефектность лучших образцов МФПУ на эпитаксиальных слоях составила 0.12%, что меньше средней дефектности МФПУ на объемном InSb. Аналогично максимальный кластер оказался меньше для МФПУ с эпитаксиальным InSb. Корректное сравнение дефектности МФПУ на эпитаксиальном и объемном InSb возможно при увеличении выпуска МФПУ на эпитаксиальном InSb.

Для уменьшения дефектности и темновых токов, повышения однородности характеристик необходимо совершенствовать технологию подготовки подложки перед эпитаксией и качество пассивации поверхности мезоструктур, осуществлять формирование  $p-n$ -переходов в процессе роста. Для полного устранения взаимосвязи между элементами, обусловленной боковой диффузией неосновных носителей заряда, необходимо полное разделение элементов эпитаксиальных структур до подложки.

## Заключение

В работе разработана МЛЭ технология получения слоев InSb на подложках InSb с электронным типом проводимости. На границе с подложкой обнаружены кристаллические кластеры оксида индия размером 10–30 nm. Эпитаксиальные слои InSb имеют гладкую поверхность с среднеквадратичной шероховатостью 0.24 nm, плотность дислокаций в слоях не превышает  $10^4 \text{ cm}^{-2}$ , концентрация электронов при 77 K равна  $n = (1.2-1.8) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . На основе выращенных слоев изготовлены МФПУ. Показано, что для изготовления МФПУ можно использовать подложки с концентрацией электронов менее  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  при их утонении до 10–15  $\mu\text{m}$ . Исследование и сравнение характеристик МФПУ на основе эпитаксиальных слоев и МФПУ, серийно выпускаемым с использованием объемного материала, показало, что

— фоточувствительные характеристики обоих типов МФПУ близки,

— квантовая эффективность МФПУ на основе эпитаксиальных слоев в максимуме спектральной чувствительности составляет 56%,

— фотоэлектрическая взаимосвязь элементов МФПУ на основе эпитаксиальных слоев меньше, чем в МФПУ на основе объемного материала,

— дефектность лучших МФПУ на основе эпитаксиальных слоев меньше, чем дефектность МФПУ на объемном материале.

Исследования слоев InSb проводились на оборудовании ИФП СО РАН и ЦКП „Наноструктуры“ при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (идентификатор проекта RFMEFI60414X0134).

## Список литературы

- [1] Rogalski A. Progr. Quant. Electron. 2012. Vol. 36. P. 342–473.
- [2] www.scd.co.il SCD Semiconductor Devices. Israel.
- [3] www.sbfpc.com Lockheed Martin Corporation Santa Barbara Focalplane. USA.
- [4] Weiguo Sun, Huitao Fan, Zhenyu Peng, Liang Zhang, Xiaolei Zhang, Lei Zhang, Zhengxiong Lu, Junjie Si, Emelyanov E., Putyato M., Semyagin B., Pchelyakov O., Preobrazhenskii V. // Inf. Phys. Technol. 2014. Vol. 62. P. 143.
- [5] Комков О.С., Семенов А.Н., Фирсов Д.Д., Мельцер Б.Я., Соловьев А.А., Попова Т.В., Пухтин А.Н., Иванов С.В. // ФТП. 2011. Т. 45. С. 1481.
- [6] Lien Tran T., Fariba Hatami, Ted Masselink W., Kunets Vas P., Salamo G.J. // J. Electron. Mater. 2008. Vol. 37. P. 1799.
- [7] Michel E., Singh G., Slivken S., Besikci C., Bove P., Ferguson I., Razineghi M. // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 65. P. 3338.
- [8] Ting D.Z., Soibel A., Keo S.A., Rafol S.B., Mumolo J.M., Liu J.K., Hill C.J., Khoshakhlagh A., Hoglund L., Luong E.M., Gunapala S.D. // J. Appl. Rem. Sens. 2014. Vol. 8. P. 084998-1.
- [9] McConville C., Jones T., Leible F., Driver S., Noakes T., Schweitzer M., Richardson N. // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 50. P. 14965.
- [10] Болтарь К.О., Власов П.В., Лопухин А.А., Пономаренко В.П., Ранцан С.К., Фадеев В.В. // Прикладная физика. 2013. № 6. P. 67.
- [11] Болтарь К.О., Власов П.В., Лопухин А.А., Полунеев В.В., Рябова А.А. // Успехи прикладной физики. 2013. № 6. P. 733.