

# Фотоэлектроника

УДК 621.315.59: 621.383.4/5

## Исследование структур InSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии

И. Д. Бурлаков, К. О. Болтарь, А. Е. Мирофьянченко, П. В. Власов, А. А. Лопухин,  
Е. В. Пряникова, В. А. Соловьев, А. Н. Семенов, Б. Я. Мельцер, Т. А. Комиссарова,  
Т. В. Львова, С. В. Иванов

*В работе различными аналитическими методами исследовались эпитаксиальные структуры InSb, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на сильнолегированных подложках InSb (100). Подложки предварительно подвергались серной пассивации в Na<sub>2</sub>S. Исследования показали, что образцы имели гладкую поверхность с значениями среднеквадратичной шероховатости менее 1 нм при достаточно хорошем структурном совершенстве. Исследования на просвечивающем электронном микроскопе подтвердили предположение о гладкости интерфейса между подложкой и эпитаксиальным слоем. На полученных структурах изготовлены и исследованы фотодиодные матрицы формата 320×256.*

PACS: 07.07.Df; 07.57.-c; 81.05.Ea; 81.65.Rv

*Ключевые слова:* InSb, МЛЭ, гомоэпитаксия, ИК ФПУ, АСМ, РЭМ, рентгеновская дифрактометрия, ПЭМ.

### Введение

Антимонид индия (InSb) имеет оптимальную для поглощения инфракрасного (ИК) излучения

спектрального диапазона 3—5 мкм ширину запрещенной зоны и высокую подвижность электронов, что делает его важным материалом для фотоэлектронных устройств и приемников ИК-излучения [1—3].

Матрицы на InSb отличаются высокой однородностью свойств по поверхности, большим количеством работоспособных элементов, более низкой ценой в сравнении с аналогичными устройствами на основе твердых растворов кадмий-ртуть-теллур. Все это делает InSb лидирующим материалом для крупноформатных матриц на средневолновый ИК-диапазон [4].

Характеристики матричных приборов, изготовленных на основе эпитаксиальных слоев (ЭС) InSb выше, чем у аналогичных на объемном материале [4—7]. Также в таких устройствах снижены оптические перекрестные помехи (взаимосвязь) и исключены нарушения фоточувствительного слоя, связанные с утончением материала, проводимом при изготовлении матричных приемников из объемного материала [5].

Использование метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) открывает возможности для создания сложных гомо- и гетероэпитаксиальных структур с изменением в процессе роста профиля легирования и толщины слоев [8—10]. Подбирая оптимальные ростовые параметры, можно добиться максимальных значений квантового выхода и низких темновых токов для ИК ФПУ на ЭС InSb.

Бурлаков Игорь Дмитриевич, зам. генерального директора по инновациям и науке, профессор<sup>1,2</sup>.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК, профессор<sup>1,3</sup>.

Мирофьянченко Андрей Евгеньевич, инженер-технолог<sup>1</sup>.

Власов Павел Валентинович, ведущий инженер<sup>1</sup>.

Лопухин Алексей Алексеевич, начальник участка измерений<sup>1</sup>.

Пряникова Екатерина Васильевна, инженер<sup>1</sup>.

Соловьев Виктор Алексеевич, старший научный сотрудник<sup>4</sup>.

Семенов Алексей Николаевич, старший научный сотрудник<sup>4</sup>.

Мельцер Борис Яковлевич, старший научный сотрудник<sup>4</sup>.

Комиссарова Татьяна Александровна, научный сотрудник<sup>4</sup>.

Львова Татьяна Викторовна, научный сотрудник<sup>4</sup>.

Иванов Сергей Викторович, заведующий лабораторией, профессор<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

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

Тел.: 8 (499) 374-94-00, 374-94-01. Факс: 8 (499) 373-68-62.

E-mail: orion@orion-ir.ru ; mirofyanchenko@gmail.com

<sup>2</sup> Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА) (Технический университет).

Россия, 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78.

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

<sup>4</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН.

Россия, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2015 г.

© Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Мирофьянченко А. Е., Власов П. В., Лопухин А. А., Пряникова Е. В., Соловьев В. А., Семенов А. Н., Мельцер Б. Я., Комиссарова Т. А., Львова Т. В., Иванов С. В., 2015

Эпитаксиальные структуры InSb выращиваются на различных подложках. Одной из наиболее часто используемых является подложка из GaAs [8]. Из-за большого рассогласования параметра решетки подложки и ЭС (~14,6 %), такие структуры отличаются наличием большого количества прорастающих дислокаций и требует предварительного выращивания на подложке нескольких буферных слоев [11—13], что является достаточно сложной процедурой. При этом остаются проблемы с ростовыми дефектами в таких структурах. Перспективным является гомоэпитаксиальное выращивание на сильнолегированных подложках InSb [5, 8—10, 14]. Чтобы обеспечить прозрачности подложки в диапазоне 3—5 мкм при охлаждении до криогенных температур за счет эффекта Бурштейна-Мосса [7], подложки легируются Te до уровня порядка  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Очевидным преимуществом таких структур является отсутствие рассогласования параметров решеток, за счет чего значительно повышается качество выращиваемых ЭС [8].

В настоящее время применяются два варианта формирования матриц фоточувствительных элементов (ФЧЭ):

- выращивание однородного слоя *n*-типа InSb с последующим формированием *p*-области проводимости методом ионной имплантации  $Be^+$ ;

- непосредственное выращивание двух слоев *n*- и *p*-типов проводимости методом МЛЭ в процессе роста с последующим формированием мезоструктур фотодиодов в этой структуре.

В данной работе обсуждаются результаты исследования ЭС InSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на сильнолегированной Te подложке InSb, а также некоторые параметры изготовленных на нем фотодидных матриц.

### Выращивание эпитаксиальных слоев InSb

Эпитаксиальные слои нелегированного InSb толщиной ~5 мкм выращивались на сильнолегированной Te (~ $10^{18}$ ) подложке *n*-типа InSb ориентации (100) подготовленной к эпитаксии («epiready») на установке МЛЭ RIBER 32P, оборудованной стандартными источниками In и Sb.

Перед выращиванием для предварительной обработки подложек применялась ранее отработанная схема сульфидирования в одномолярном растворе  $Na_2S$  [15]. Использование серной пассивации позволило снизить температуру отжига подложки до ~400 °С вместо традиционно используемой ~450 °С.

Оценка скорости роста эпитаксиального слоя InSb проводилась при отношении потоков Sb/In > 1 путем измерения осцилляций интенсивности отраженного пучка методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО), период которых соответствовал росту одного монослоя в условиях

двумерного роста. Для измерения величины соотношения потоков Sb/In на поверхность роста осаждалось несколько монослоев In, а монослойные осцилляции ДБЭО измерялись при открытии потока Sb, аналогично работе [16]. Контроль температуры роста  $T_p$  осуществлялся с помощью термопары и инфракрасного пирометра, откалиброванного по известным значениям температуры перестройки поверхностных реконструкций на GaAs, InAs, GaSb и InSb, наблюдаемых с помощью ДБЭО. Кроме того, для более точного контроля ростовых параметров ( $T_p$  и отношения Sb/In) использовалась полученная в работе [10] диаграмма изменений картины ДБЭО от поверхностной при варьировании  $T_p$  или потока Sb.

После отжига под потоком Sb рост эпитаксиального слоя InSb инициировался при  $T_p$  ~350 °С открытием In ячейки (поверхностная реконструкция ( $\sqrt{2} \times \sqrt{2}$ ) 45°). Во время выращивания первых 100 нм слоя температура плавно поднималась до ~410 °С (поверхностная реконструкция псевдо-(1×3), рис. 1), при которой выращивалась оставшаяся часть нелегированного слоя InSb. Соотношение потоков Sb/In при этом поддерживалось равным 1,5—2.



Рис. 1. Картина рефлексов ДБЭО, полученная во время роста эпитаксиального слоя InSb в направлении [110]

Полученные эпитаксиальные структуры исследовались на наличие дефектов, анализировалось их структурное совершенство, состояние поверхности и электрофизические свойства.

### Характеристики ЭС InSb

Структурные характеристики ЭС InSb исследовались методом рентгеновской дифракции на многоцелевом рентгеновском дифрактометре Bruker Discover D8 в геометрии  $\theta/2\theta$ . Источником рентгеновского излучения являлась рентгеновская трубка (излучение Cu линии  $K\alpha$ ). Ширина рентгеновского пучка составляла 0,5 мм. Оценка структурного совершенства проводилась по ширине пика кривой качания (дифракционное отражение (004)) на половине максимума интенсивности.

Значения ширины пика кривой качания составили для всех образцов менее 40 угловых секунд. Один из результатов рентгенодифракционного анализа приведен на рис. 2, где представлена кривая качания, имеющая наименьшее значение ширины пика, а именно, 34 угловых секунды.

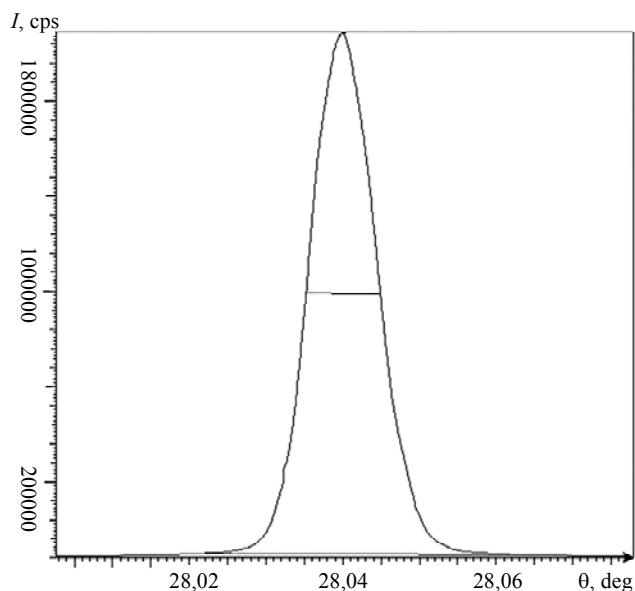


Рис. 2. Кривая качания ЭС InSb

Все образцы имели зеркально-гладкую поверхность при визуальном контроле. Исследования на атомно-силовом микроскопе (АСМ) показаны на рис. 3. Четко видна структура на поверхности при небольшом размере сканирования  $1,5 \times 1,5$  мкм и  $5 \times 5$  мкм. Среднее квадратичное значение шероховатости ни на одном из образцов не превышало 1,5 нм.

Поверхность образцов также исследовалась методами электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе (РЭМ) фирмы TESCAN при ускоряющем напряжении  $\sim 20$  кВ в детекторе вторичных электронов и просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) Philips EM-420. На изображениях, полученных на РЭМ, хорошо видны скопления дефектов на образце (см. рис. 4 слева). Такие крупные дефекты могут приводить к дефектным пикселям на матрице и потере изображения на них. Для сравнения справа приведено изображение аналогичного типа дефекта, полученное на АСМ (рис. 4 справа).

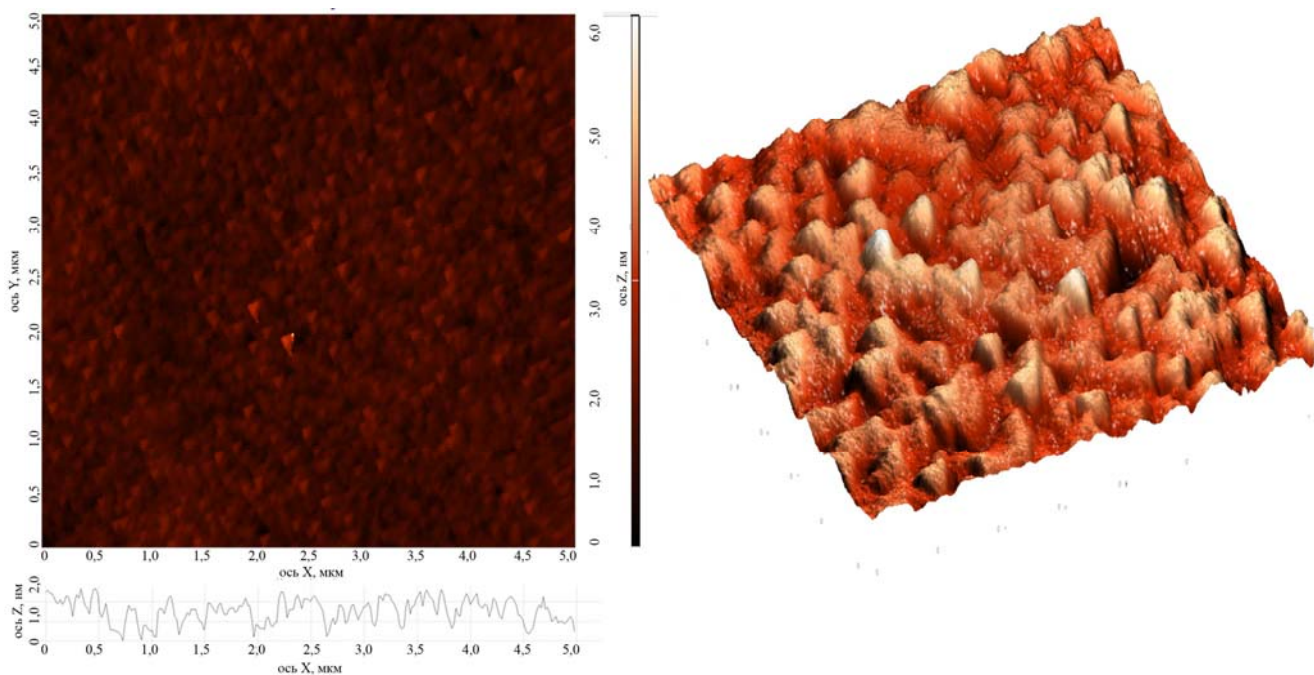


Рис. 3. Изображения поверхности ЭС InSb, полученные на АСМ. Слева изображение  $5 \times 5$  мкм, справа 3D-изображение участка  $1,5 \times 1,5$  мкм

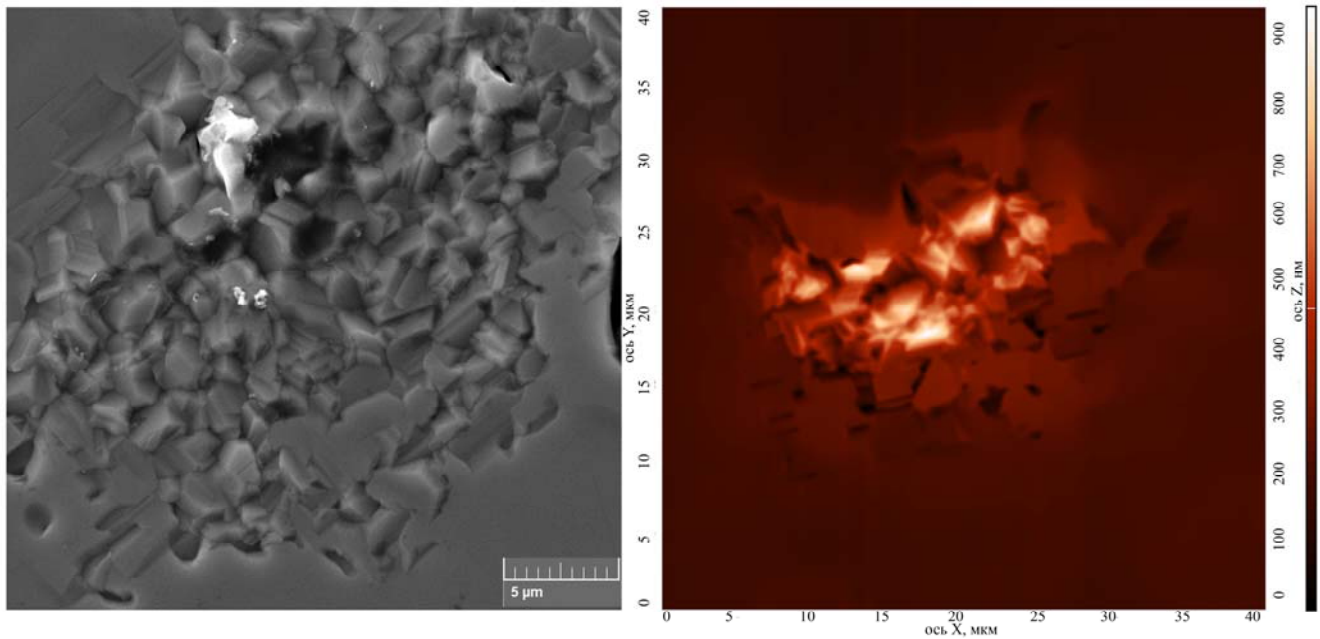


Рис. 4. Слева изображение группы дефектов, полученное на РЭМ; справа — изображение схожего дефекта, полученное на АСМ, высота около 900 нм

Исследования на ПЭМ, проведенные в геометрии поперечного сечения на микроскопе, свидетельствуют о гладкости интерфейса подложка/эпитаксиальный слой и об отсутствии каких-либо протяженных структурных дефектов в исследованном образце (рис. 5). Наклонные линии и темные точки являются артефактами, возникшими в процессе подготовки образца путем ионного травления.

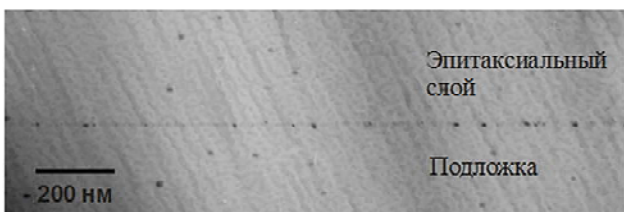


Рис. 5. Изображение, полученное ПЭМ гомоэпитаксиальной структуры InSb в геометрии поперечного сечения, рефлекс (220)

Электрофизические характеристики измерялись по эффекту Холла методом Ван-дер Пау, проведенные на слоях InSb толщиной  $\sim 2$  мкм, выращенных на подложках полуизолирующего GaAs (001) в тех же условиях, что и при гомоэпитаксии. Образцы продемонстрировали  $n$ -тип проводимости с концентрацией электронов  $7,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $2,9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и подвижностью  $59200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  и  $46300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при температурах 80 и 300 К соответственно. Концентрация электронов в данном случае определялась большой концентрацией структурных дефектов, образующихся вследствие сильного рассогласования постоянных решетки

GaAs и InSb ( $\Delta a/a \sim 14\%$ ). Реальную остаточную концентрацию электронов в слое в данном случае определить сложно, но, судя по величине подвижности, она находится на уровне  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

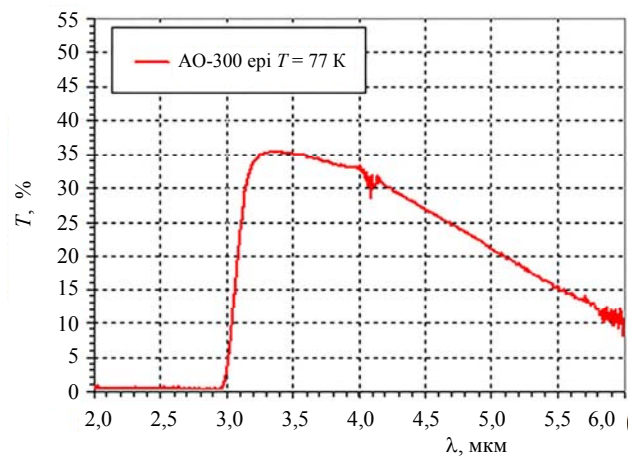


Рис. 6. Спектр пропускания подложки epi InSb

На рис. 6 показан спектр пропускания  $T$  непросветленной подложки толщиной 500 мкм при температуре 77 К. Видно, что в спектральном диапазоне 3—5 мкм пропускание составляет 35 % — 20 % соответственно. Пропускание ограничено отражением от обеих непросветленных поверхностей подложки (на уровне 41 %) и поглощением на свободных носителях сильнолегированной подложки, которое возрастает в длинноволновой области спектра. Оценки показывают, что при утончении подложки до 20—200 мкм и просветления тыльной поверхности поглощение в ней будет несущественно.



### Создание фотодиодной матрицы

На выращенных структурах изготовлены фотодиодные матрицы формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм [17].

Матричные фоточувствительные элементы (МФЧЭ) на основе ЭС InSb изготавливались по мезотехнологии (рис. 7), включающей прецизионное ионно-лучевое травление структуры индиевых микроконтактов и последовательное напыление слоев металлических контактов к *p*- и *n*-областям. При этом *p*-область формировалась имплантацией  $Be^+$  в одностадийном режиме с последующим отжигом.



Рис. 7. Схема эпитаксиальной структуры InSb на основе мезотехнологии

Поверхность InSb покрыта пассивирующим диэлектрическим покрытием, в котором вскрыты контактные окна. На контактной площадке находятся индиевые микростолбики высотой 4—6 мкм (рис. 8).

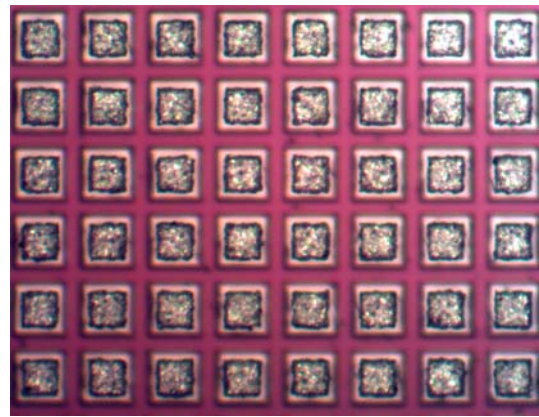


Рис. 8. Фотография МФЧЭ на основе эпитаксиальной структуры InSb формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм

На фоточувствительных элементах эпитаксиальных структур (МФЧЭ) измерены вольтамперные характеристики (ВАХ). В таблице представлены средние значения напряжения на участке пробоя обратной ветви ВАХ при токах 1, 5 и 10 нА соответственно. Для сравнения в таблице представлены характерные значения напряжения на участке пробоя для МФЧЭ, изготовленных тем же методом из объемного материала типа ИСЭ-1В и ИСЭ-2В, а также критерии годности, обеспечивающие изготовление матричных фотоприемных устройств (МФПУ) с заданными характеристиками. Из таблицы следует, что по напряжению на участке пробоя эпитаксиальные структуры уступают объемным, что может быть объяснено несколько большей концентрацией доноров в слое InSb. Однако по этому параметру эпитаксиальные структуры соответствуют критериям годности, поэтому они могут быть использованы для изготовления МФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм.

Таблица

Напряжения на участке пробоя обратной ветви ВАХ

№ пластин	$U_{\text{пробоя}}, \text{ В при токе}$			Концентрация доноров в ФЧ-слое, $\text{см}^{-3}$
	1 нА	5 нА	10 нА	
АО297-1 ер1	0,8	0,9	1	$>10^{15}$
АО300-1 ер1	0,6	0,7	0,8	$>10^{15}$
АО303-1 ер1	0,5	0,6	0,7	$>10^{15}$
АО297-2 ер1	0,8	0,9	0,9	$>10^{15}$
ИСЭ-1В	0,1	1,5	3,5	$(0,3-1,2) \cdot 10^{14}$
ИСЭ-2В	1,5	2,0	2,1	$(0,2-1,1) \cdot 10^{15}$
Критерий годности	—	$> 0,5$	$> 0,6$	—

### Заключение

В работе представлены результаты комплексного исследования эпитаксиальных структур, выращенных методом МЛЭ на сильнолегированной подложке InSb. Здесь *p*-область формировалась на

выращенных структурах имплантацией ионов Be. Качество ЭС исследовалось рядом аналитических методов. В целом, качество ЭС InSb пока уступает объемному InSb. Тем не менее, виден значительный потенциал гомоэпитаксиальных структур InSb.

Для повышения качества МФПУ на основе эпитаксиальных слоев InSb необходимо оптимизировать методы выращивания, формировать  $p-n$ -переход в процессе эпитаксиального роста, а также улучшать качество пассивации мезоструктур при изготовлении МФЧЭ.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-2787.2014.9.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
2. Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. и др. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 43.
3. Дирочка А. И., Корнеева М. Д., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 37.
4. Klipstein P., Mizrahi U., Fraenkel R., Shtrichman I. // J. Defence Science. 2013. V. 63. No. 6. P. 555.
5. Ashley T., Burke T. M., Emeny M. T., Gordon N. T., Hall D. J., Lees D. J., Chris J., Milner D. // SPIE. 2003. V. 5074. P. 95.
6. Elliott C. T. // SPIE. 1996. V. 2744. P. 452.
7. Sun W., Huitao F., Peng Z., Zhang L., Zhang X., Zhang L., Lu Z., Si J., Emelyanov E., Putyato M., Semyagin B., Pchelyakov O., Preobrazhenskii V. // J. Infrared. Physic. & Technology. 2014. V. 62. P. 143.
8. Vangala S. R., Qian X., Grzesik M., Santeufemio C., Goodhue W. D., Allen L. P., Dallas G., Dauplaise H., Vaccaro K., Wang S. Q., Bliss D. // J. Vac. Sci. Technol. 2006. V. 24. No. 3. P. 1643.
9. Pham H. T., Yoon S. F., Boning D., Wicaksono S. // J. Vac. Sci. Technol. 2007. V. 25. No. 1. P. 11.
10. Noreika J., Francombe M. H., Wood C. E. C. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. No. 12. P. 7416.
11. Philips J. D., Biefeld R. M. // J. of Crystal Growth. 2000. V. 209. No. 4. P. 567.
12. Tran T. L., Hatami F., Masselink W. T., Kunets V. P., Salamo G. J. // J. of Electronic Materials. 2008. V. 37. No. 12. P. 1799.
13. Komissarova T. A., Semenov A. N., Kirilenko D. A., Mel'tser B. Ya., Solov'ev V. A., Sitnikova A. A., Paturi P., Ivanov S. V. // J. Semiconductors. 2014. V. 48. No. 3. P. 1.
14. Мирофьянченко А. Е., Коротаев Е. Д., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 55.
15. L'vova V., Dunaevskii M. S., Lebedev M. V., Shakhmin A. L., Sedova I. V., and Ivanov S. V. // J. Semiconductors. 2013. V. 47. No. 5. P. 721.
16. Michel E., Singh G., Slivken S., Besikci C., Bove P., Ferguson I., and Razeghi M. // J. Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 3338.
17. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Соловьев В. А., Семенов А. Н., Мельцер Б. Я., Комиссарова Т. А., Львова Т. В., Иванов С. В. // Тезисы Фотоника-2015. 2015. С. 47.

## Investigation of InSb structures grown by molecular beam epitaxy

*I. D. Burlakov<sup>1,2</sup>, K. O. Boltar<sup>1,3</sup>, A. E. Mirofyanchenko<sup>1</sup>, P. V. Vlasov<sup>1</sup>, A. A. Lopukhin<sup>1</sup>, E. V. Pryanikova<sup>1</sup>, V. A. Solov'ev<sup>4</sup>, A. N. Semenov<sup>4</sup>, B. Ya. Mel'tser<sup>4</sup>, T. A. Komissarova<sup>4</sup>, T. V. L'vova<sup>4</sup>, and S. V. Ivanov<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Orion R&P Association, Inc.

9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru ; mirofyanchenko@gmail.com

<sup>2</sup> Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automatics (MIREA)

78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

<sup>3</sup> Moscow Institute of Physics and Technique

9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

<sup>4</sup> Ioffe Institute of Physics and Technique of the RAS

26 Politekhniceskaya str., S.-Petersburg, 194021, Russia

Received December 17, 2015

*In this paper, the epitaxial structures of InSb grown by molecular beam epitaxy on heavily doped substrates were investigated by different analytical methods. Before growth, substrates were treated in Na<sub>2</sub>S. All samples had a mirror-like surface with root-mean-square roughness less than 1 nm along with high structural quality. Transmission electron microscopy investigations found out a high interface quality. After that, the 320×256 focal plane arrays were fabricated.*

PACS: 07.07.Df; 07.57.-c; 81.05.Ea; 81.65.Rv

*Keywords:* InSb, MBE, homoepitaxy, FPA, AFM, SEM, X-ray diffraction, TEM.

## REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
2. I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, A. M. Fikachev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 43 (2007).
3. A. I. Dirochla, M. D. Korneeva, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 37 (2011).
4. P. Klipstein, U. Mizrahi, R. Fraenkel, and I. Shtrichman, *J. Defence Science* **63**, 555 (2013).
5. T. Ashley, T. M. Burke, M. T. Emeny, N. T. Gordon, D. J. Hall, D. J. Lees, J. Chris, and D. Milner, *SPIE* **5074**, 95 (2003).
6. C. T. Elliott, *SPIE* **2744**, 452 (1996).
7. W. Sun, F. Huitao, Z. Peng, L. Zhang, X. Zhang, L. Zhang, Z. Lu, J. Si, E. Emelyanov, M. Putyato, B. Semyagin, O. Pchelyakov, and V. Preobrazhenskii, *J. Infrared. Physic. & Technology* **62**, 143 (2014).
8. S. R. Vangala, X. Qian, M. Grzesik, C. Santeufemio, W. D. Goodhue, L. P. Allen, G. Dallas, H. Dauplaise, K. Vaccaro, S. Q. Wang, and D. Bliss, *J. Vac. Sci. Technol.* **24**, 1643 (2006).
9. H. T. Pham, S. F. Yoon, D. Boning, and S. Wicaksono, *J. Vac. Sci. Technol.* **25**, 11 (2007).
10. J. Noreika, M. H. Francombe, and C. E. C. Wood, *J. Appl. Phys.* **52**, 7416 (1981).
11. J. D. Philips and R. M. Biefeld, *J. of Crystal Growth* **209**, 567 (2000).
12. T. L. Tran, F. Hatami, W. T. Masselink, V. P. Kunets, and G. J. Salamo, *J. Electronic Materials* **37**, 1799 (2008).
13. T. A. Komissarova, A. N. Semenov, D. A. Kirilenko, B. Ya. Meltser, V. A. Solov'ev, A. A. Sitnikova, P. Paturi, and S. V. Ivanov, *J. Semiconductors* **48** (3), 1 (2014).
14. A. E. Mirifyanchenko, E. D. Korotaev, and N. I. Iakovleva, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 55 (2014).
15. V. L'vova, M. S. Dunaevskii, M. V. Lebedev, A. L. Shakhmin, I. V. Sedova, and S. V. Ivanov, *J. Semiconductors* **47** (5), 721 (2013).
16. E. Michel, G. Singh, S. Slivken, C. Besikci, P. Bove, I. Ferguson, and M. Razeghi, *J. Appl. Phys. Lett.* **65**, 3338 (1994).
17. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, V. A. Solov'ev, A. N. Semenov, B. Ya. Mel'tser, T. A. Komissarova, T. V. L'vova, and S. V. Ivanov, in *Proc. Photonics-2015* (2015), p. 47.