

УДК 621.383.4/5

## Особенности гетероструктур InGaAs/InP, предназначенных для изготовления быстродействующих фотоприемных устройств коротковолнового диапазона ИК-спектра

Е. Д. Коротаев, Н. И. Яковлева, А. Е. Мирофьянченко, А. В. Ляликов

*Рассмотрены особенности построения гетероструктур на основе InGaAs, предназначенных для изготовления быстродействующих фотоприемных устройств коротковолнового диапазона спектра. Проведен анализ их структурного совершенства и морфологии поверхности. Анализ показал, что исследуемые структуры обладают нанощероховатой поверхностью с малым количеством дефектов и структурных несовершенств. Плотность дефектов составила  $\sim 5 \text{ см}^{-2}$ , среднеквадратичное значение шероховатости  $\sim 0,8 \text{ нм}$ , выявлены структурные особенности роста эпитаксиальных слоев.*

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

**Ключевые слова:** InGaAs, InP, коротковолновый инфракрасный спектральный диапазон, гетероэпитаксиальные структуры,  $p-i-n$ -фотодиод, матрица фоточувствительных элементов, фотоприемное устройство.

### Введение

Матричные фотоприемные устройства (ФПУ), чувствительные в коротковолновом инфракрасном (ИК) диапазоне спектра (SWIR), используются для работы в самых различных отраслях применения, например, в космических исследованиях, медицине, неразрушающем контроле, системах оптической связи, оптоволоконной связи, сельском хозяйстве, астрономии и др. Высокие значения чувствительности и обнаружительной способности делают возможным использование ФПУ на основе InGaAs/InP в составе систем высокоточного наведения и сопровождения целей [1, 2].

Развитие прогрессивных эпитаксиальных методов выращивания наноразмерных гетероструктур, в частности, метода МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) [3, 4], позволяет создавать уникальные полупроводниковые соединения на основе твердых растворов  $A^3B^5$ , включая бинарные (AlAs, GaP, InP, AlP), тройные (InGaAs, AlGaAs) и

четверные соединения (InGaAsP, InAlGaAs), которые широко используются для изготовления  $p-i-n$ - и лавинных фотодиодов различных конфигураций, чувствительных в коротковолновом диапазоне спектра [5—7].

Для оптико-электронных систем отображения в коротковолновой ИК-области спектра необходимы фотодиодные матрицы, соединенные по «flip-chip»-технологии с кремниевой электроникой обработки сигнала для преобразования оптического сигнала в электрический. Основными требованиями, предъявляемыми к фотодиодным матрицам, являются высокая чувствительность, большая обнаружительная способность, малое число дефектных элементов, работа на высоких частотах. Отдельные требования предъявляются к уровню темновых токов и шумов матриц, вследствие чего ведутся интенсивные разработки в области конструирования архитектуры исходных гетероструктур на основе тройных растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и совершенствования их кристаллических свойств.

Тройные растворы  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  состоят из двух прямозонных бинарных полупроводниковых соединений InAs и GaAs, которые работают в энергетическом диапазоне 0,36—1,43 эВ. Для материала  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с содержанием индия  $x = 0,53$  молярных долей существует хорошее соответствие кристаллических решеток  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  и подложки фосфида индия InP, ширина запрещенной зоны которой составляет 0,75 эВ при температуре  $T = 300 \text{ К}$ . Использование подложки InP уменьшает рабочий диапазон соединения  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в области

Коротаев Евгений Дмитриевич, инженер НИЦ.  
Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ.  
Мирофьянченко Андрей Евгеньевич, инженер НИЦ.  
Ляликов Алексей Владимирович, вед. инженер НИЦ.  
ОАО «НПО «Орион»».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.  
Тел. (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2014 г.

© Коротаев Е. Д., Яковлева Н. И., Мирофьянченко А. Е., Ляликов А. В., 2014

коротких длин волн. Для сдвига граничной длины волны в длинноволновую область содержание индия должно возрасти. Так например, для получения граничной длины волны 2,4 мкм состав индия должен увеличиться до 80 % (другими словами,  $x = 0,8$  молярных долей), при этом рассогласование кристаллических постоянных решеток между слоем InGaAs и подложкой InP достигает ~1,85 %.

При конструировании фотоприемных устройств сложной архитектуры необходимо компенсировать возможное рассогласование кристаллических решеток эпитаксиальных слоев с помощью специальных переходных слоев, что позволит в фотодиодных матрицах существенно снизить темновые токи и улучшить фотоэлектрические параметры.

В рамках данной работы проведены исследования дефектности и качества поверхности гетероструктур InGaAs/InP, выращенных методом МОСГЭ и предназначенных для изготовления быстродействующих  $p-i-n$ - и лавинных фотодиодов.

### Фоточувствительная гетероструктура

Классическая  $p-i-n$ -гетероструктура с поглощающим слоем  $In_{0,53}Ga_{0,47}As$  представлена на рис. 1. она широко используется для изготовления фотоприемных устройств коротковолнового диапазона ИК-области спектра [8, 9], в том числе с лавинным усилением сигнала [10]. Структура содержит оптически прозрачную подложку InP  $n^+$ -типа, буферный слой InP  $n$ -типа, поглощающий слой  $In_{0,53}Ga_{0,47}As$  собственной проводимости или слаболегированный  $n$ -типа проводимости и широкозонный слой InP  $p^+$ -типа проводимости.

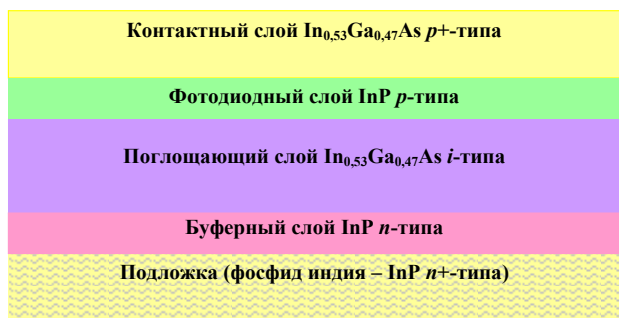


Рис. 1. ГЭС-структура на основе арсенидов

Параметры гетероструктуры следующие:

- состав активного поглощающего слоя —  $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ ,  $x = 0,53$  молярных долей;
- уровень донорной концентрации в рабочем поглощающем слое  $\leq 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;
- оптимальная толщина активного слоя составляет 2,5—3 мкм;

- материал фотодиодного слоя — фосфид индия InP  $p^+$ -типа проводимости;
- толщина фотодиодного слоя составляет 0,5 мкм;
- значение концентрации в фотодиодном слое  $p$ -типа  $\geq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;
- толщина контактного слоя составляет 0,5 мкм;
- значение концентрации в контактном слое  $p^+$ -типа  $\geq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ;
- значение концентрации в подложке InP  $\sim (2-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  выбирается исходя из необходимости получения низкоомного контакта к  $n^+$ -области структуры.

Для того чтобы достигнуть высоких фотоэлектрических параметров матрицы фотодиодов, изготовленной на основе данной структуры, необходимо уменьшать темновые токи и шумы, что в первую очередь, достигается уменьшением уровня фоновой концентрации в собственном поглощающем слое структуры (рис. 1), во-вторых, снижением его дефектности.

Уровень собственной концентрации зависит от условий выращивания методом МОСГЭ, и в значительной степени от температуры роста поглощающего эпитаксиального слоя (ЭС) InGaAs. Проведенные исследования и литературные источники [11, 12] указывают, что оптимальная температура роста ЭС InGaAs составляет  $T = 610-630 \text{ K}$  при соотношении элементов V/III групп более 50. На рис. 2 представлена зависимость уровня фоновой концентрации от температуры роста, полученная при выращивании тестовых образцов ГЭС InGaAs. Зависимость показывает, что оптимальная температурная зона при выращивании InGaAs находится в диапазоне от 610 до 640 K.

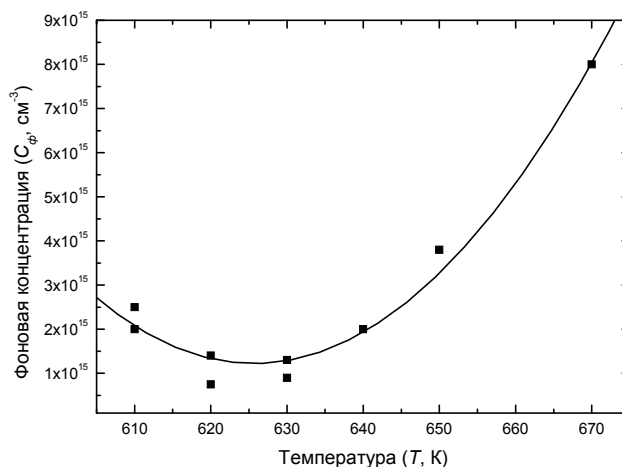


Рис. 2. Зависимость фоновой концентрации  $In_{0,53}Ga_{0,47}As$  от температуры роста

Уровень дефектности поглощающего слоя зависит от двух факторов: наличия примесей и

дефектов, возникающих вследствие нарушений кристаллической решетки растущего слоя. Для получения эпитаксиальных слоев  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  высокого структурного совершенства необходимо обеспечить равенство постоянных кристаллических решеток твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и подложки. Данное условие выполняется при использовании подложки из фосфида индия  $\text{InP}$ , которая по кристаллической структуре соответствует  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  при мольном составе арсенида индия  $x_{\text{InAs}} = 0,53$ . При этом даже при небольшом отклонении от заданного состава возникают силы напряжения, приводящие к формированию дислокаций и ухудшению кристаллической структуры эпитаксиального поглощающего слоя  $\text{InGaAs}$ , что подтверждает рис. 3, на котором показана зависимость интенсивности фотолюминесценции  $\text{InGaAs}$  от величины рассогласования периодов кристаллических решеток подложки и слоя. Достижение максимального значения фотолюминесценции ГЭС  $\text{InGaAs}$  служит в данном случае критерием качества кристаллической структуры поглощающего слоя.

Рис. 3 показывает, что идеальная кристаллическая структура слоя достигается лишь в небольшом интервале соотношений постоянных кристаллических решеток —  $[+1, -1] \%$ .

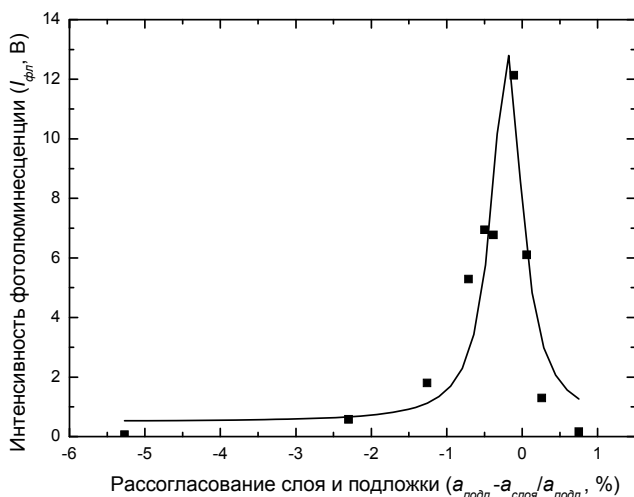


Рис. 3. Зависимость интенсивности фотолюминесценции  $\text{InGaAs}$  от величины рассогласования периодов кристаллической решетки подложки и слоя

Проведенные исследования режимов роста методом МОСГЭ и исследования спектров фотолюминесценции тестовых образцов позволили достигнуть при выращивании методом МОСГЭ уровня фоновой концентрации поглощающего слоя  $\text{InGaAs}$   $n = 0,5\text{--}2,0 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует лучшим зарубежным аналогам [13]. Подвиж-

ность электронов в ЭС  $\text{InGaAs}$  при 300 К для тестовых образцов изменялась в пределах  $7800\text{--}9000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , что подтверждает возможность работы при высоких частотах.

### Методы и результаты исследований ГЭС $\text{InGaAs}$

Структурное качество кристаллических решеток тестовых образцов ГЭС  $\text{InGaAs}$  диаметром 50,8 мм исследовалось методом рентгеноструктурного анализа на высокоразрешающем дифрактометре D8 DISCOVER HR фирмы Bruker (Германия). Рентгенодифракционные спектры снимались методами  $(\theta\text{--}2\theta)$ ,  $\omega$  и  $\psi$ -сканирования (рис. 4).

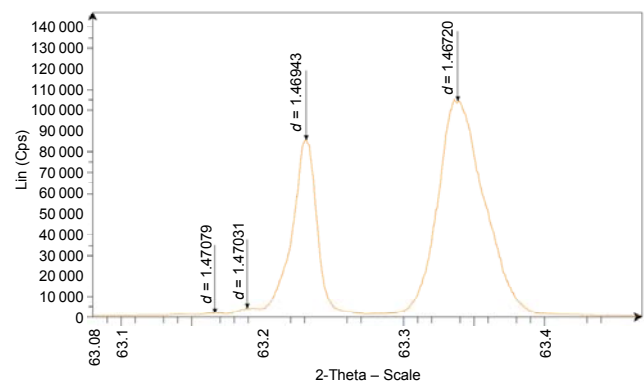


Рис. 4. Рентгенодифракционный спектр тестового образца  $\text{InGaAs}$

Спектры  $(\theta\text{--}2\theta)$ -сканирования содержат, кроме основных пиков (левый пик —  $\text{InP}$ , правый пик —  $\text{InGaAs}$ ) от эпитаксиальных слоев структуры, нескольких промежуточных подслоев. Ширина основных пиков находится в пределах нескольких десятых градусов, что свидетельствует о высоком структурном совершенстве образцов  $\text{InGaAs}$ .

Исследования морфологии поверхности тестовых образцов структур  $\text{InGaAs}$  проводились на атомно-силовом микроскопе «NTEGRA Maximus» отечественной фирмы «NT MDT». Среднее значение шероховатости на площади  $20 \times 20 \text{ мкм}$  составляет 1,9 нм, среднеквадратичное значение шероховатости у исследуемого образца находилось в пределах 0,8 нм, что свидетельствует о высоком качестве поверхности. Был выявлен характер роста эпитаксиальных слоев тестовых структур, на поверхности образца (рис. 5) отчетливо видны террасы с отдельными кристаллическими образованиями пирамидальной формы высотой до 2 нм. Высота ступенек террасы была менее 0,5 нм.

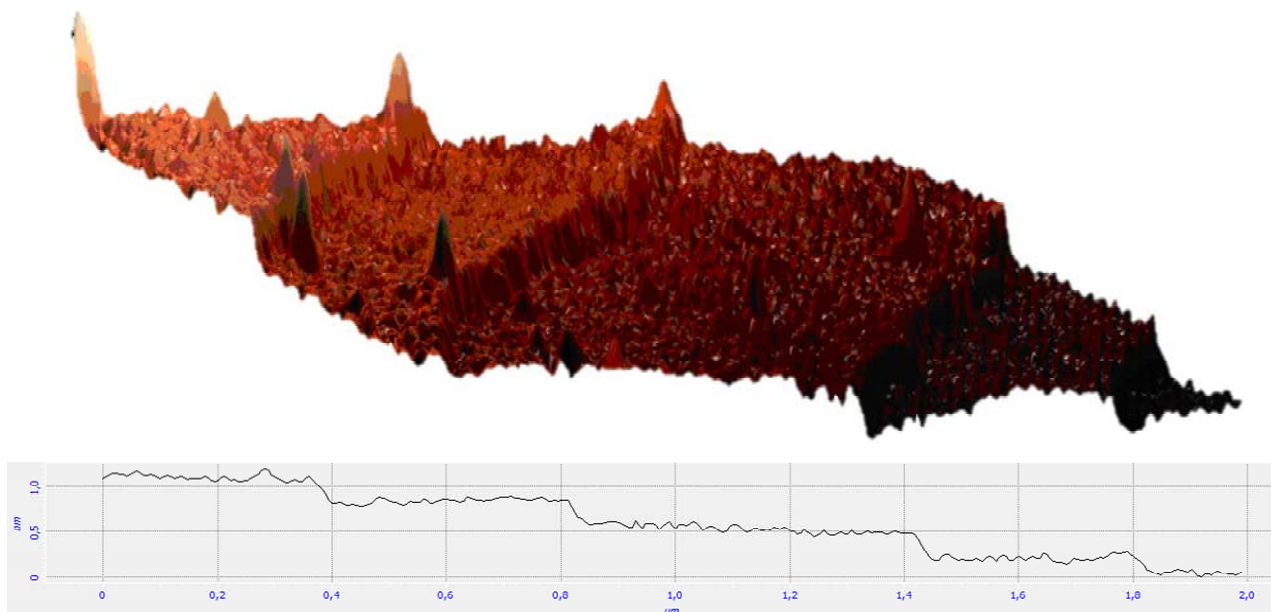


Рис. 5. Поверхность тестового образца — результат сканирования на атомно-силовом микроскопе NTEGRA фирмы «NT MDT»

Количество дефектов и их распределение по поверхности тестовых образцов исследовались на автоматизированном оптическом анализаторе поверхности Candela CS 10R (США). На рис. 6 (а, б) представлены поверхность тестового образца и карта распределения дефектов.

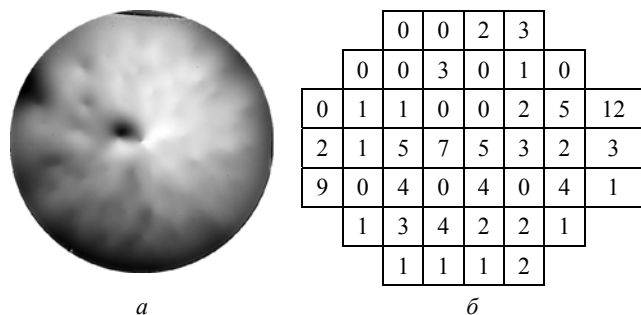


Рис. 6. Поверхность образца (а) и карта распределения дефектов (б), полученные на автоматизированном оптическом анализаторе поверхности Candela CS 10R

Количество дефектов на поверхности тестового образца составило — 98 шт., плотность дефектов равнялась  $5,76 \text{ см}^{-2}$ , что подтверждает кристаллическое совершенство структуры и соответствует лучшим зарубежным аналогам.

Апробация выращенных образцов проводилась путем изготовления матриц фотодиодов в выращенных структурах. Матрицы фотодиодов изготавливались на основе технологической линейки, имеющейся в НПО «Орион». При этом гетероструктура InGaAs разделялась на мезаэлементы методом ионного травления [10], после чего защищалась диэлектриком Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Глубина травления мезаструктуры задавалась временем и скоро-

стью травления ионами аргона до буферного слоя n-InP через маску фоторезиста, что позволяло останавливать процесс травления на требуемой глубине, разделяя элементы матрицы. Финишное химическое травление поверхности проводилось с целью удаления нарушенного слоя, образовавшегося при ионном травлении. Методами фотолитографии и травления в диэлектрике вскрывались окна до контактных слоев n- и p-типа проводимости с целью формирования омических контактов к слоям n- и p-типа. Процессы напыления слоев различных металлов использовались для формирования омических контактов к фотодиодам. Активная область каждого элемента матрицы имела размеры 20×20 мкм, шаг между элементами составлял 30 мкм. Фотодиоды детектировали излучение в традиционном для материала In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As спектральном диапазоне 0,9—1,7 мкм.

На рис. 7 представлены темновые вольтамперные характеристики p-i-n-фотодиодов в различных тестовых матрицах, изготовленных на основе ГЭС InGaAs. Исследование темновых токов фотодиодов и их численное моделирование показало повышенные токи через уровни ловушек в запрещенной зоне и увеличенные генерационно-рекомбинационные токи, природа которых связана с особенностями гетероструктуры на границах узкозонного поглощающего слоя InGaAs [14, 15]. Для уменьшения темновых токов предпочтительно использовать структуры с барьерами. Достоинством рассмотренной в данной работе архитектуры ГЭС InGaAs является возможность ее использования в высокоэффективных и быстродействующих применениях.

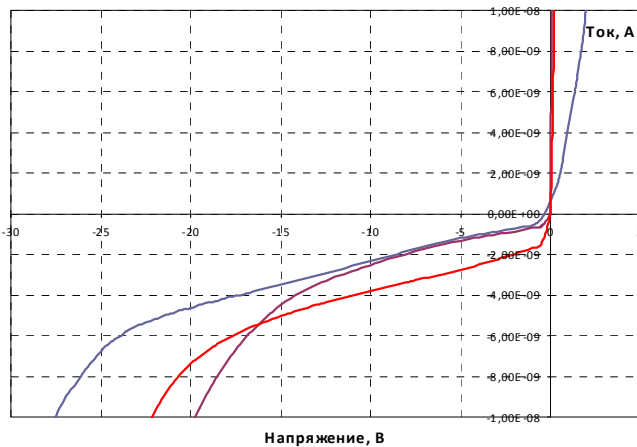


Рис. 7. Темновые ВАХ  $p-i-n$ -фотодиодов в тестовых матрицах, изготовленных на основе ГЭС InGaAs

### Заключение

Проведенный анализ структурного совершенства и морфологии поверхности ГЭС InGaAs/InP показал, что исследуемые структуры обладают нанощероховатой поверхностью с малым количеством дефектов и структурных несовершенств. Плотность дефектов составила  $\sim 5 \text{ см}^{-2}$ , среднеквадратичное значение шероховатости  $\sim 0,8 \text{ нм}$ , выявлены структурные особенности роста эпитаксиальных слоев в виде отдельных террас высотой до  $0,5 \text{ нм}$  с отдельными кристаллическими пирамидальными образованиями высотой  $1-2 \text{ нм}$ .

Таким образом, выращенные методом МОСГЭ гетероструктуры InGaAs/InP пригодны для изготовления быстродействующих фотоприемных устройств коротковолнового диапазона спектра. Для достижения высоких фотоэлектрических параметров матриц фотодиодов на основе

соединений InGaAs требуется прецизионный контроль толщин и уровней легирования эпитаксиальных слоев, входящих в состав структуры.

### Литература

1. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47.
2. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 82.
3. Campbell J. C., Demiguel S., Ma F., et al. // IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 2004. V. 10. No. 4, P. 777.
4. Chemical Vapour Deposition: Precursors, Processes and Applications. Edited by A.C. Jones and M. L. — Hitchman Royal Society of Chemistry, 2009.
5. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
6. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. — М.: Физматкнига, 2010.
7. Болтарь К. О., Чинарева И. В., Лопухин А. А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.
8. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
9. Abhay M Joshi, Frank Heine, and Thomas Feifel // Proc. of SPIE. 2006. V. 6220. P. 622003.
10. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В. и др. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 45.
11. Yen-Wei CHEN, Wei-Chou HSU, Rong-Tay HSU, et al. // Jap. J. Appl. Phys. 2003. V. 42. P. 4249.
12. Мармалюк А. А. // Известия вузов. Сер. Материалы электронной техники. 2005. № 1. С. 17.
13. Stringfellow G. B. Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice (2-nd Edition). — Academic Press, New York, 1999.
14. Troska J., Gill K., Grabit R., and Vasey F. / CMS Note. 1997/102, 1997.
15. Walters R. J., Shaw G. J., Summers G. P., et al. // IEEE Trans. on Nuclear Sciences. 1992. V. 39. No. 6. P. 2257.

## Main features of InGaAs/InP heterostructures intended for SWIR highspeed operation applications

E. D. Korotaev, N. I. Iakovleva, A. E. Mirifianchenko, and A. V. Lialikov

Orion R&P Association  
46/2 Entuziastov shosse, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received September 29, 2014

*The main features of InGaAs/InP heterostructures intended for SWIR high-efficiency and highspeed operation applications have been studied. Structural properties and surface morphology have been analyzed by X-ray diffraction and AFM methods. The surface morphology of samples has nanoirregular character, and the root mean square (RMS) roughnesses was of  $0.8 \text{ nm}$ , the defect density was of  $5 \text{ cm}^{-2}$ . The surface encloses the relatively narrow and pyramidal peaks correspond to*

***the InGaAs absorption and cap layer of sample with a larger diffuse scattering perpendicular to the normal line.***

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

*Keywords:* InGaAs, InP, SWIR, heterostructures, *p-i-n* photodiode, FPA, photoreceiver.

#### References

1. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 47 (2011).
2. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 82 (2011).
3. J. C. Campbell, S. Demiguel, F. Ma, et al., *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **10**, 777 (2004).
4. *Chemical Vapour Deposition: Precursors, Processes and Applications*. Edited by A.C. Jones and M. L. Hitchman (Royal Society of Chemistry, 2009).
5. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
6. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *The Current Status and Main-Line Trackage for Development of Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2010) [in Russian].
7. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Lopukhin, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 5, 10 (2013).
8. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 131 (2014).
9. Abhay M Joshi, Frank Heine, and Thomas Feifel, *Proc. SPIE.* **6220**, 622003. (2006).
10. N. I. Iakovleva, K. O. Boltar, M. V. Sednev, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 2, 45 (2014).
11. Yen-Wei CHEN, Wei-Chou HSU, Rong-Tay HSU, et al., *Jap. J. Appl. Phys.* **42**, 4249 (2003).
12. A. A. marmalyuk, *izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser. Materialy Elektron. Tekhn.*, No. 1, 17 (2005).
13. G. B. Stringfellow, *Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice (2-nd Edition)*. (Academic Press, New York, 1999).
14. J. Troska, K. Gill, R. Grabit, et al., *CMS Note 1997/102*, (1997).
15. R. J. Walters, G. J. Shaw, G. P. Summers, et al., *IEEE Trans. on Nuclear Sciences* **39**, 2257 (1992).