

# Метаморфный InGaAs-фотодиод на длине волны 1.55 мкм, выращенный на подложке GaAs

© И.В. Самарцев<sup>1</sup>, Н.В. Байдусь<sup>1</sup>, С.Ю. Зубков<sup>1</sup>, Д.М. Балясников<sup>1</sup>, К.С. Жидяев<sup>1</sup>, А.В. Здравейцев<sup>1</sup>, А.И. Бобров<sup>1</sup>, К.В. Сидоренко<sup>1</sup>, А.В. Нежданов<sup>1</sup>, Д.С. Клементьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> РФЯЦ-ВНИИЭФ НИИИС им. Ю.Е. Седакова, 603952 Нижний Новгород, Россия

E-mail: samartsev@nifti.unn.ru

Поступила в Редакцию 15 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 21 ноября 2024 г.

Принята к публикации 18 декабря 2024 г.

Приведены результаты исследований по созданию фотодиодов на длине волны 1.55 мкм, сформированных на подложках GaAs. InGaAs фотодиодные структуры с InAlGaAs метаморфным буферным слоем с квазикорневым изменением концентрации In выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии. Фотодиоды, изготовленные на основе полученных структур, имели область fotocувствительности до 1.68 мкм. Плотность темнового тока при обратном смещении  $-2$  В составила  $3 \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>. Токовая fotocувствительность на длине волны 1.55 мкм составила 0.6 А/Вт.

**Ключевые слова:** МОС-гидридная эпитаксия, наноматериалы, полупроводники A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>, инфракрасные фотодиоды, темновой ток.

DOI: 10.61011/FTP.2024.12.59832.7348

## 1. Введение

Фотодиоды, работающие на длине волны 1.55 мкм, находят широкое применение в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). Для создания детекторов на данный диапазон сейчас чаще всего применяются  $p-i-n$ -структуры на основе твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с высоким содержанием In, выращенные на InP-подложке. Однако подложки InP, в силу своих механических свойств, хуже поддаются технологии постростовой обработки, чем арсенид галлия. Подложки InP имеют меньший диаметр, что снижает количество получаемых чипов с пластины в технологическом процессе. Кроме того, подложки InP являются дорогостоящими. Таким образом, замена подложек из фосфида индия на GaAs для фотодиодов на длинах волн  $\sim 1.55$  мкм является весьма актуальной.

В настоящее время распространенным подходом при создании рассогласованных A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> структур является применение метаморфных буферных слоев (MBL) для плавного [1] или ступенчатого [2,3] изменения параметра решетки. Известно, что реализация метаморфных структур на арсениде галлия, транспортные и структурные характеристики которых не уступали бы характеристикам InP-структур, затруднена из-за возникновения микрорельефа поверхности и неполного подавления дислокаций, прорастающих в активные слои структуры [4]. Авторами работы [5] продемонстрирован  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  метаморфный фотодиод на длинах волн 1.17–1.29 мкм, плотность дислокаций в приповерхностном слое которого составила  $10^6$  см<sup>-2</sup>. Для достижения больших длин волн требуется значительное увеличение концентрации

In в твердом растворе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , что приведет к увеличению рассогласования с подложкой и увеличению плотности дислокаций в fotocувствительной области.

В настоящей работе рассмотрен способ формирования MBL с квазикорневым профилем концентрации In на подложке GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии (МОГФЭ) с целью создания фотодиодов на длине волны 1.55 мкм.

## 2. Изготовление образцов и методика эксперимента

Исследуемые фотодиодные гетероструктуры были получены методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении (100 мбар) на установке AIX 200RF. Прекурсорами для элементов III и V группы были триметилгаллий, триметилиндий, триметилалюминий и арсин. В качестве газа-носителя использовался водород. Для легирования слоев  $n$ - и  $p$ -типа использовались силан и диэтилцинк соответственно. Температура и скорость роста всех слоев фотодиодной структуры составили 570 °C и 0.5 нм/с соответственно. Для фотодиодной структуры отношение V/III составило 100. Общая схема фотодиодной структуры представлена на рис. 1. На подложке GaAs (001), отклоненной на 2° от точной ориентации в направлении [110], выращивались слои, легированные кремнием до концентрации  $n^+ = (1 \div 5) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>: буферный слой  $n^+-\text{GaAs}:\text{Si}$  толщиной 200 нм, слой  $n^+-\text{In}_{0.07}\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.85}\text{As}:\text{Si}$  постоянного состава толщиной 100 нм, MBL  $n^+-\text{InAlGaAs}:\text{Si}$  толщиной 1500 нм с изменением концентрации  $x(\text{In})$  от 0.07 до 0.56 и инверс-

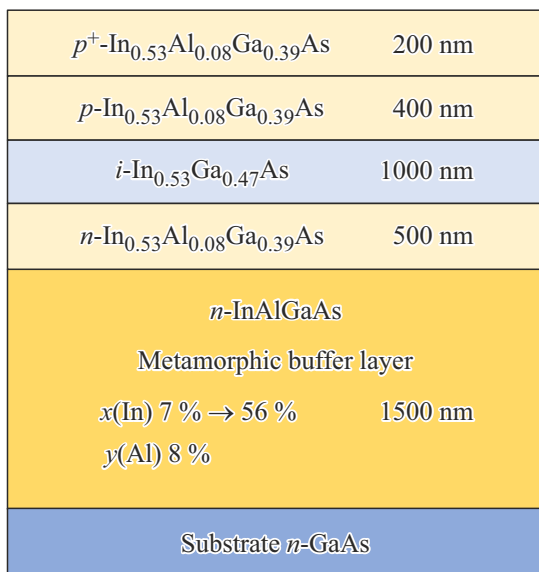


Рис. 1. Схема фотодиодной структуры. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

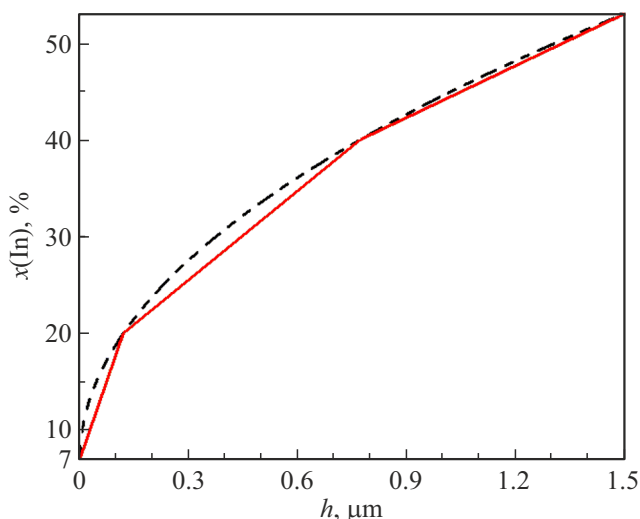


Рис. 2. Расчетный профиль содержания In в MBL — сплошная линия, аппроксимируемая функция — пунктирная линия.

ный слой  $n^+-\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.39}\text{As}:\text{Si}$  толщиной 100 нм. Инверсный слой необходим для уменьшения механических напряжений в эпитаксиальных слоях структуры. Известно, что верхняя часть MBL растет псевдоморфно [6], а значит, кристаллическая решетка на его поверхности испытывает напряжение сжатия. Поэтому для уменьшения степени механического напряжения на MBL формировался инверсный переход, т.е. выращивался слой с меньшим содержанием In, а значит, и с меньшим периодом решетки, который совпадал с периодом сжатой решетки на поверхности MBL. Последующие слои расщивались с тем же содержанием In, что и в инверсном слое. Далее формировалась  $p-i-n$ -структура с концентрацией легирующей при-

меси в  $p$ - и  $n$ -областях на уровне  $(2-4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , состоящая из слоев  $n-\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.39}\text{As}:\text{Si}$  толщиной 400 нм,  $i-\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  толщиной 1000 нм,  $p-\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.39}\text{As}:\text{Zn}$  толщиной 400 нм. На завершающей стадии формировался контактный слой  $p^+-\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.39}\text{As}:\text{Zn}$  с концентрацией примеси  $p^+ = (1-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и толщиной 200 нм. Толщина слоев рассчитывалась исходя из времени и скорости роста, которые были получены на основе исследования предварительно выращенных тестовых слоев с таким же составом. Состав тестовых слоев определялся методами рентгеновской дифрактометрии и спектроскопии фотолюминесценции. Измерения эффекта Холла использовались для подтверждения и оценки уровня легирования тестовых слоев.

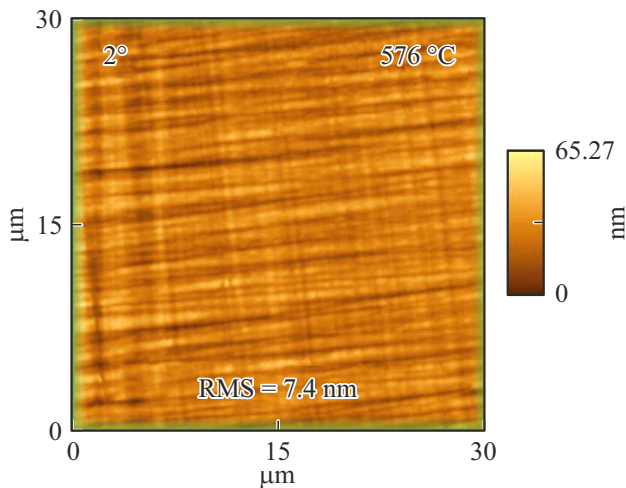
Процесс формирования MBL заключался в постепенном увеличении содержания In по квазикорневому закону от 7 до 56%. Расчетное распределение концентрации In в MBL представлено на рис. 2 красной линией, а аппроксимируемая функция изображена черной пунктирной линией.

MBL обеспечивает переход от периода решетки GaAs (5.6533 Å) к периоду решетки  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  (5.8687 Å), а постепенное уменьшение градиента концентрации In позволяет снизить плотность дислокаций вблизи поверхности роста и повысить качество эпитаксиальных слоев (ЭС) [6–8].

В отличие от In концентрация Al оставалась неизменной для всех слоев, где он присутствовал, и составляла  $\sim 8\%$ . Исследования влияния добавления Al в метаморфный слой, температуры роста, использования отклоненных и неотклоненных подложек проведены на тестовых структурах, которые представляли собой выращенный на подложке метаморфный слой.

### 3. Результаты и обсуждение

Структуры, содержащие MBL на основе InGaAs, демонстрировали развитую морфологию поверхности, при этом (среднеквадратичное отклонение высоты поверхности) RMS составляла 40.9 нм, поэтому для уменьшения шероховатости поверхности в состав метаморфного слоя добавлено 8% Al. Эффект уменьшения RMS продемонстрирован на тестовых образцах с аналогичными параметрами, отличавшимися только наличием Al в составе метаморфного слоя. Для исследования влияния добавления Al в состав метаморфного слоя на RMS поверхности были выращены тестовые структуры, представляющие собой метаморфные слои толщиной 1.8 мкм на подложках GaAs, отклоненных от точной ориентации в направлении [110] на  $2^\circ$ . В одном случае метаморфный слой был на основе тройного раствора InGaAs, а в другом — четверного InAlGaAs. Температура роста тестовых структур составила  $600^\circ\text{C}$ , а скорость лежала в диапазоне 0.7–0.8 нм/с. Благодаря добавлению Al



**Рис. 3.** Топограмма поверхности структуры, полученной при температуре роста 570 °С на подложке GaAs (001) с отклонением на 2°.

удалось снизить RMS с 40.9 до 14.4 нм. Морфология поверхности была исследована с помощью атомно-силовой микроскопии (AFM).

Для выявления оптимальных режимов роста проведены исследования шероховатости поверхности структур, полученных при различных температурах на отклоненных и неотклоненных подложках. С этой целью была выращена серия однотипных тестовых структур, содержащих MBL на основе InAlGaAs, на двух типах подложек и при разных температурах. В эксперименте использовались точно ориентированные подложки GaAs (001) и подложки GaAs (001), отклоненные на 2° от точной ориентации в направлении [110]. При этом температуры роста составили 460, 570 и 770 °С. Использование разных температур роста приводило к необходимости корректировать потоки металлоорганических соединений. Подбор ростовых параметров осуществлялся с помощью коэффициентов распределения [9], которые связывают отношения элементов III группы в твердой фазе с отношением потоков соответствующих металлоорганических соединений в газовой фазе.

Образцы, выращенные при температуре 460 °С, обладали наименьшей шероховатостью поверхности среди всех структур (14.7 и 5.3 нм для точно ориентированных и отклоненных подложек соответственно), но низкая температура не позволила обеспечить достаточную степень легирования структуры кремнием, поскольку при данной температуре не происходит эффективного разложения моносилана [9], который использовался в качестве прекурсора легирующей примеси *n*-типа. Поэтому в нашем случае применение низких температур не подходит для формирования фоточувствительных структур, поскольку не достигается необходимый уровень легирования, достаточный для формирования качественного *p-n*-перехода. При температуре 770 °С структуры имели наиболее развитый рельеф поверхно-

сти. Значения RMS превысили 100 нм для двух типов подложек, а перепады высот составили > 700 нм в некоторых областях структуры. Такой развитый рельеф поверхности свидетельствует о низком кристаллическом качестве материала. Образцы, выращенные при температуре 570 °С, показали различный результат на отклоненных и неотклоненных подложках. Структура, сформированная на точно ориентированной подложке, демонстрировала поверхность, покрытую островками, при этом RMS составила 13.7 нм. Наличие островков может указывать на то, что релаксация механических напряжений в MBL происходила не за счет образования дислокаций несоответствия, а за счет формирования островков. На образце, выращенном на отклоненной подложке, наблюдалась сетка дислокаций, пересекающихся под углом 90°, а величина RMS уменьшилась до 7.4 нм. Наличие явно выраженной дислокационной сетки на AFM снимке и относительно невысокое значение RMS в совокупности с невысокой плотностью дефектов в поверхностном слое ( $10^6 \text{ см}^{-2}$ ) может свидетельствовать о хорошем кристаллическом качестве полученной структуры, которое, видимо, достигается за счет релаксации механических напряжений путем образования дислокаций несоответствия, подавляющее большинство которых остается в латеральной плоскости и не проникает в рабочую область структуры. При этом дислокации несоответствия проявляются на поверхности в виде пересекающихся под углом 90° линий и создают микрорельеф поверхности (рис. 3) [10].

На основе проведенных экспериментов для формирования фоточувствительной структуры была выбрана температура роста 570 °С и подложка GaAs (001) с поверхностью, отклоненной на 2° от ориентации в направлении [110].

Методами селективного травления и AFM определена плотность дислокаций в поверхностном слое, которая составила  $10^6 \text{ см}^{-2}$ . Эта величина превышает плотность дислокаций подложек, используемых в эксперименте, всего на 2 порядка, что, согласно литературным данным [5], является хорошим результатом для структур с MBL.

На основе полученной структуры изготовлены фотодиоды и исследованы их характеристики. Со стороны структуры и подложки были нанесены омические контакты методом термического испарения в вакууме. Со стороны структуры напылялась пленка Ti/Pd/Au, со стороны подложки — пленка AuGe. Затем была вытравлена мезаструктура с диаметром 1.4 мм и глубиной 1 мкм. Для уменьшения влияния поверхностных темновых токов проведена очистка и пассивация поверхности образцов методом плазмохимического травления в кислородной плазме с последующим термическим окислением при 250 °С.

На рис. 4 представлена типичная вольт-амперная характеристика полученных фотодиодов. Темновой ток при обратном смещении -2 В составил  $4 \cdot 10^{-5}$  А, что соответствует плотности тока  $3 \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>.

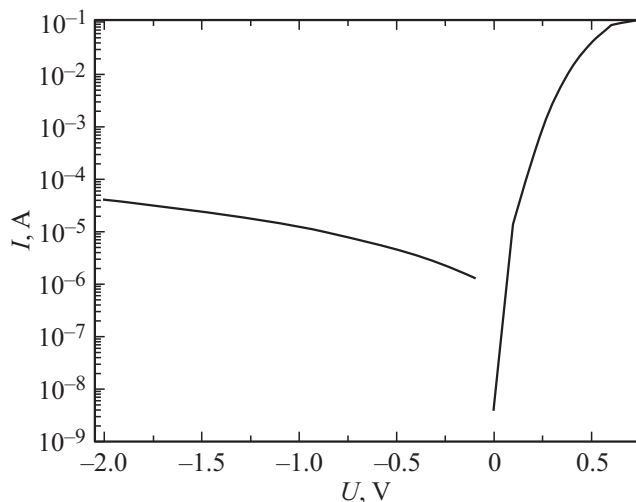


Рис. 4. Типичная вольт-амперная характеристика фотодиодов при комнатной температуре.

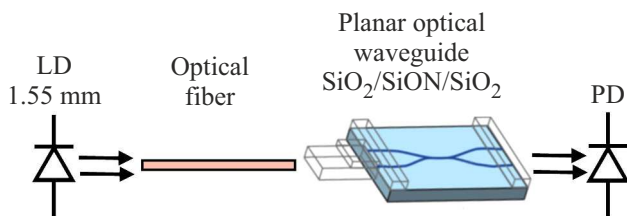


Рис. 5. Принципиальная схема стыкованных элементов.

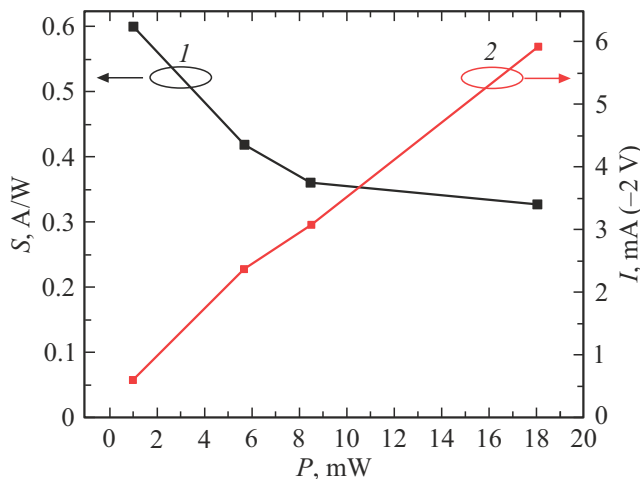


Рис. 6. Результаты исследования зависимости фоточувствительности и фототока от мощности падающего излучения на длине волны 1550 нм. График 1 — фоточувствительность, график 2 — значения фототока при смещении  $-2$  В.

Спектральная зависимость фототока изготовленных фотодиодов, измеренная при комнатной температуре, имеет область фоточувствительности до 1.68 мкм на уровне 50% от максимума. Длина волны 1.55 мкм расположена на уровне 83% от максимума интенсивности.

Получена зависимость токовой фоточувствительности на длине волны 1.55 мкм от мощности падающего излучения [11]. Для этого проведена стыковка фотодиода, полученного в данной работе, и  $\text{SiO}_2/\text{SiON}/\text{SiO}_2$  волновода. Оптические потери в волноводе составили 3 дБ/см. Волновод в свою очередь был стыкован с оптическим волокном, в которое заводилось излучение полупроводникового лазера с длиной волны 1.55 мкм. Принципиальная схема стыковки представлена на рис. 5. Результаты исследований зависимости фоточувствительности и фототока от мощности падающего излучения представлены на рис. 6.

Из рис. 5 видно, что при увеличении мощности падающего излучения происходит снижение фоточувствительности, что может быть связано с приближением фотодиода к режиму насыщения. Максимум фоточувствительности в диапазоне мощностей 1–18 мВт достигается при мощности излучения 1 мВт, при этом значение фоточувствительности составляет 0.6 А/Вт. Данное значение фоточувствительности сопоставимо с фоточувствительностью на данной длине волны промышленных фотодиодов [12], выращенных на согласованных подложках InP, которая составляет  $\sim 1$  А/Вт.

Такое значение фоточувствительности в совокупности с низким значением плотности темнового тока указывает на перспективность подходов, применяемых в настоящей работе, для создания фотодиодов на длину волны 1.55 мкм, выращенных на подложке GaAs.

## 4. Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs сформированы структуры InGaAs фотодиодов на основе InAlGaAs метаморфного слоя с квазикорневым профилем концентрации In. Применение такой конструкции MBL, добавление Al, подбор оптимальной температуры роста и ориентации подложки позволили создать фотодиоды на длинах волн до 1.68 мкм с низким темновым током. Для фотодиодов с диаметром мезаструктуры 1.4 мм темновой ток при комнатной температуре и обратном смещении  $-2$  В составил  $4 \cdot 10^{-5}$  А, что соответствует плотности тока  $3 \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>. Таким образом, предложенная конструкция MBL является перспективной для формирования фоточувствительных структур на длину волны 1.55 мкм.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2022-0007.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] N.J. Quitariano, E.A. Fitzgerald. *J. Appl. Phys.*, **102**, 033511 (2007).
- [2] H.G. Nguyen, H.W. Yu, Q.H. Luc, Y.Z. Tang, V.T.H. Phan, C.H. Hsu, E.Y. Chang, Y.C. Tseng. *Nanotechnology*, **25**, 48520 (2014).
- [3] I.V. Samartsev, S.M. Nekorkin, B.N. Zvonkov, V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, I.J. Pashenkin, N.V. Dikareva, A.B. Chigineva. *Semiconductors*, **52** (12), 1564 (2018).
- [4] Yang He, Yurun Sun, Yan Song, Yongming Zhao, Shuzhen Yu, Jianrong Dong. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 065501 (2016).
- [5] I.V. Samartsev, B.N. Zvonkov, N.V. Baidus, A.B. Chigineva, K.S. Zhidyaev, N.V. Dikareva, A.V. Zdoroveyshchev, A.V. Rykov, S.M. Plankina, A.V. Nezhdanov, A.V. Ershov. *Semiconductors*, **57** (6), 488 (2023).
- [6] J. Tersoff. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 693 (1993).
- [7] A. Bosacchi, A.C. De Riccardis, P. Frigeri, S. Franchi, C. Ferrari, S. Gennari, L. Lazzarini, L. Nasi, G. Salviati, A.V. Drigo, F. Romanato. *J. Cryst. Growth*, **175** (176), 1009 (1997).
- [8] L. Lazzarini, C. Ferrari, S. Gennari, A. Bosacchi, S. Franchi, M. Berti, A.V. Drigo, F. Romanato, G. Salviati. *Microsc. Semicond. Mater. Conf. (Oxford, April 7–10, 1997)*. [Inst. Phys. Conf. Ser. № 157].
- [9] Р.Х. Акчурина, А.А. Мармалюк. *МОС-гидридная эпитаксия в технологии материалов фотоники и электроники* (М., Техносфера, 2018) с. 488.
- [10] R. Kumar, A. Bag, P. Mukhopadhyay, S. Das, D. Biswas. *Electron. Mater. Lett.*, **12**, 356 (2016).
- [11] J. Zhang, J. Verbist, B. Moeneclaey, J. Van Weerdenburg, R. Van Uden, H. Chen, J. Van Campenhout, C. Okonkwo, X. Yin, J. Bauwelinck, G. Roelkens. *IEEE Photonics J.*, **8** (1), 1 (2016).
- [12] <https://azimp.ru/>

Редактор Г.А. Оганесян

**Metamorphic InGaAs photodiode with wavelength 1.55  $\mu\text{m}$ , grown on GaAs substrate**

I.V. Samartsev<sup>1</sup>, N.V. Baidus<sup>1</sup>, S.Yu. Zubkov<sup>1</sup>, D.M. Balyasnikov<sup>1</sup>, K.S. Zhidyaev<sup>1</sup>, A.V. Zdoroveishchev<sup>1</sup>, A.I. Bobrov<sup>1</sup>, K.V. Sidorenko<sup>1</sup>, A.V. Nezhdanov<sup>1</sup>, D.S. Klementev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Nizhny Novgorod State University, 603022 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> Scientific Research Institute Measuring Systems named J.E. Sedakov, 603952 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The article presents the results of investigation of photodiodes for 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength, grown on GaAs substrates. InGaAs photodiode structures with InAlGaAs metamorphic buffer layer with quasi-root change of In concentration were grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) has been developed. Photodiodes created based on the obtained structures had photosensitivity region up to 1.68  $\mu\text{m}$ . The dark current density at reverse bias of  $-2\text{ V}$  was  $3 \cdot 10^{-3}\text{ A/cm}^2$ . The photosensitivity at wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$  was 0.6 A/W.