

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.315.592

**ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВЕ  
НАНОСТРУКТУР GaInAs, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ  
ИОННО-ЛУЧЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ**

© 2019 И.А. Сысоев\*, Д.А. Гусев\*\*, А.Е. Дембицкий\*\*, А.Ю. Смолин\*\*, В.Ф. Катаев\*\*

\*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет»

\*\*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, Волгодонск, Россия

Экспериментально показана возможность формирования методом ионно-лучевого осаждения квантовых точек на основе трехкомпонентных твердых растворов GaInAs различных составов на поверхность GaAs. Рассмотрены особенности технологии ионно-лучевого осаждения. Определены оптимальные соотношения компонентов твердого раствора GaInAs, при котором квантовые точки характеризуются наименьшими размерами и наибольшей плотностью. Представлены результаты исследования спектров фотолюминесценции, морфологии поверхности полученных наноструктур. Полученные результаты могут представлять практический интерес для применения в многопереходных солнечных элементах с целью повышения их КПД.

*Ключевые слова:* солнечные элементы, наноразмерные структуры, многокомпонентные твердые растворы, ионно-лучевое осаждение, технология, материалы для фотоэлементов.

Поступила в редакцию 18.01.2019

После доработки 19.02.2019

Принята к публикации 21.02.2019

## ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в энергетике стимулируют довольно высокий рост интереса к альтернативным источникам энергии. Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), или солнечные элементы, являются наиболее перспективным, экологически чистым решением вопроса создания альтернативных источников энергии, так как они непосредственно преобразуют солнечное излучение в электрическую энергию в отличие от других существующих источников энергии [1].

В настоящий момент перспективы развития солнечной энергетики связаны с полупроводниковыми гетероструктурами на основе соединений и твердых растворов A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> [1]. Это обусловлено фотоэлектрическими, оптическими, электрофизическими параметрами и характеристиками данных материалов. Важным преимуществом ФЭП на основе гетероструктур по сравнению со структурами на основе кремния являются больший коэффициент полезного действия (кпд), повышенная температурная и радиационная стабильность, а также высокая эффективность преобразования концентрированного солнечного излучения [2]. Однако следует отметить, что существует ряд факторов, которые ограничивают КПД данных ФЭП. В первую очередь к ним относятся потери на термализацию [3].

Одним из основных подходов, позволяющих частично устранить указанную проблему, основывается на последовательном соединении однопереходных солнечных элементов с различной шириной запрещенной зоны через коммутационные туннельные

диоды в многопереходные (МП) гетероструктурные ФЭП [3]. Однако увеличение количества элементов каскада приводит к усложнению конструкции ФЭП, увеличению числа гетерограниц, что влечет за собой возрастание внутренних потерь и, в частности, увеличение последовательного сопротивления ФЭП [4]. Кроме того, для создания высокоэффективных многопереходных солнечных элементов существует ограниченное количество материалов, обеспечивающих согласование постоянных кристаллических решеток.

Современный подход к решению данной проблемы, основан на применении полупроводниковых структур с самоорганизующимися квантовыми точками (КТ). Благодаря дискретному энергетическому спектру КТ появляется возможность решить проблему потерь на термализацию. Управляя размерами, формой КТ и составом матрицы (слой, окружающий КТ), можно контролируемо модифицировать край зоны поглощения дополнительного перехода на КТ, что позволит расширить спектральный диапазон чувствительности и увеличить фототок ФЭП на КТ [5].

Одними из наиболее эффективных на сегодняшний день являются трехпереходные ФЭП на основе GaInP/GaInAs/Ge, так как на сегодняшний день они имеют наибольшее КПД преобразования солнечной энергии в электрическую [5]. Авторами работы [5] методом МПЭ были получены GaAs *p-i-n*-структуры для ФЭП на основе КТ InAs, величина тока короткого замыкания которых на 1%, по сравнению с GaAs – реперной структурой (структурой без внедрения КТ). Использование внедренных слоев КТ InAs в *i* – области вносит значительный вклад во внешнюю квантовую эффективность ФЭП, что также отражено в работе авторов [6], в которой были получены аналогичные результаты методом ионно-лучевого осаждения. В свою очередь внедрение КТ на основе трехкомпонентных твердых растворов Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As позволяет расширить диапазон чувствительности МП ФЭП вплоть до 1,3 мкм и, следовательно, увеличить КПД. В работе [7] авторы показали перспективность синтеза КТ GaInAs с “многомодальным” распределением по размерам, для которых характерна расширенная спектральная чувствительность, методом МОСГФЭ. В основе работы лежало исследование зависимости размеров КТ от состава, а также морфологии поверхности подложки.

Широко применяемые технологические методы МПЭ и МОСГФЭ для выращивания КТ на основе бинарных и многокомпонентных соединений и твердых растворов АШВУ, давно и надежно зарекомендовали себя. Однако наряду с отработанностью технологии и несомненными преимуществами данные методы являются технически сложными и дорогостоящими, в связи с чем, в настоящее время широкое развитие получили альтернативные методы. К одним из таких относится ионно-лучевое осаждение (ИЛО), рассмотренное нами ранее в работах [8, 9].

Настоящая работа посвящена получению КТ на основе твердых растворов GaInAs различных составов методом ИЛО, исследованию влияния состава на размер КТ, а также исследованию их фотоэлектрических свойств.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследуемые образцы были получены методом ИЛО в режиме роста Странски – Крастанова. Конструкция установки и методика получения КТ подробнее рассмотрена нами ранее в работе [10]. В экспериментах использовались стандартные подложки арсенида галлия АГЧО (100) с концентрацией носителей заряда *n* – типа  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , диаметром – 35 мм.

В качестве исходных компонентов использовались Ga и InAs. Экспериментальные исследования проводились для следующих составов твердых растворов: 1) Ga<sub>0,9</sub>In<sub>0,1</sub>As, 2) Ga<sub>0,7</sub>In<sub>0,3</sub>As, 3) Ga<sub>0,65</sub>In<sub>0,35</sub>As, 4) Ga<sub>0,76</sub>In<sub>0,24</sub>As,

5) Ga<sub>0,85</sub>In<sub>0,15</sub>As.

Исходные компоненты взвешивались на высокоточных аналитических весах и смешивались в необходимых пропорциях. Полученная таким образом смесь компонентов измельчалась до порошкообразного состояния однородной фракции (размер зерен 0,2–0,3 мкм), затем тщательно перемешивалась и спрессовывалась. Подготовленные мишени GaInAs различных составов помещались в ячейки кассеты источника, ориентированные под углом 45° по отношению к подложке.

Для подложек GaAs проводилась стандартная предварительная подготовка, по завершению которой они закреплялись в ячейках кассеты, предназначенной для выращиваемых соединений. После установки распыляемых мишеней и осаждаемых подложек в ячейки технологических кассет, в ростовой камере ИЛО создавался вакуум (остаточное давление  $5 \times 10^{-4}$  Па).

Предварительно в каждой серии экспериментов проводилась очистка поверхности подложек сфокусированным ионным пучком аргона (рабочее давление  $7 \times 10^{-4}$  Па). Приведем параметры ионной очистки: время очистки – 30 мин; энергия ионов в пучке – 800 эВ; ток ионного пучка – 25 мА. По завершению процесса очистки, включался регулируемый резистивный нагреватель, при помощи которого устанавливалась необходимая температура осаждаемых подложек, распыляемая мишень определенного состава совмещалась с соответствующей подложкой GaAs и осуществлялся процесс ИЛО квантовых точек GaInAs.

Выращивание КТ InGaAs проводилось при следующих ростовых параметрах, определенных нами ранее в ходе предварительных экспериментов [10]: температура подложки – 550°С, время процесса осаждения составляло – 3 мин, энергия ионов в пучке – 1000 эВ, величина тока ионного пучка – 25 мА. На первом этапе экспериментальных исследований выращивались КТ гетероструктуры с «незакрытыми» слоями GaInAs/GaAs различных составов. Далее для исследования спектров фотолюминесценции, полученные КТ закрывались материалом матрицы GaAs. При этом каждая подложка с выращенными КТ различного состава совмещалась с распыляемой ячейкой, содержащей материал матричного слоя.

Приведем параметры осаждения материала матричного слоя GaAs: энергия ионов при осаждении матричного слоя составляла – 1000 эВ, ток ионного пучка 25 мА, время осаждения – 4 минуты.

Исследование спектров фотолюминесценции (ФЛ) проводилось в спектральном диапазоне 700 – 1000 нм (T=300°K). В качестве источника возбуждающего оптического излучения использовался инжекционный лазер P = 8 Вт/(см<sup>2</sup>·с), длина волны которого – 402 нм. В качестве фотодетектора использовался германиевый фотодиод ФДГ с рабочим спектральным диапазоном длин волн от 0,5 до 2 мкм.

Исследование поверхности полученных образцов КТ InGaAs проводили на атомно – силовом микроскопе NM – MDT Ntegra.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки влияния состава твердого раствора GaInAs на размеры КТ в процессе формирования методом ионно-лучевого осаждения были проведены АСМ – исследования гетероструктур с «незакрытыми» одиночными слоями КТ, выращенных на GaAs – подложках (100). Установлено, что при температуре 550°С, времени выращивания 3 минуты, энергии ионов 1000 эВ и величине ионного тока 25 мА, на поверхности подложки GaAs в зависимости от состава твердого раствора образуются квантовые точки GaInAs куполообразной формы в диапазоне размеров от 6 до 55 нм. Процентное содержание Ga в твердом растворе при этом изменялось в пределах от 0,65 до 0,9 ат %.

Для КТ на основе составов  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{As}$ ,  $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{As}$ ,  $\text{Ga}_{0,76}\text{In}_{0,24}\text{As}$ ,  $\text{Ga}_{0,85}\text{In}_{0,15}\text{As}$  характерны наименьшие размеры 6-17 нм. Высота КТ составляет 8-20 нм, а поверхностная плотность составляет довольно высокие значения (в среднем  $6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ). Как известно, с уменьшением размеров КТ ширина запрещенной зоны полупроводниковых материалов увеличивается, кроме того факт увеличения поверхностной плотности КТ на основе данных твердых растворов позволяет говорить о перспективности применения полученных результатов для формирования на их основе *p-i-n* – структур для ФЭП. На основе полученных результатов возможно формирование вертикально связанных слоев КТ, что способствует увеличению КПД ФЭП на основе гетероструктур.

В тоже время при исследовании результатов, полученных на основе первого состава  $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ , было установлено, что максимальный размер КТ увеличивается до 55–60 нм при увеличении атомной доли Ga в твердом растворе до 0,9 %. Полученные результаты представлены на рисунке 1. Результаты АСМ – исследований поверхности образца с КТ на основе твердого раствора  $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$  свидетельствуют о том, что средний размер наноструктур составляет 35-60 нм, высота – 30-50 нм. Данные проведенного статистического анализа указывают, что поверхностная плотность полученных КТ составляет довольно низкие значения  $1 \times 10^{10} \text{ мм}^{-2}$ . Возможно, полученные результаты являются следствием увеличения упругой энергии деформации, которая растет с увеличением доли Ga в твердом растворе. Возрастающие при этом вследствие разности постоянных решеток напряжения приводят к тому, что размер КТ увеличивается, а плотность уменьшается.

Необходимо также отметить, что полученные результаты свидетельствуют о том, что латеральная составляющая скорости роста КТ в данном случае является выше нормальной. В этом случае происходит срастание зародышевых островков в планарный эпитаксиальный слой. Это объясняется тем, что при температуре подложки  $550^\circ\text{C}$  изначальной энергии подложки GaAs достаточно для формирования сплошной пленки твердого раствора GaInAs. Наряду с КТ, имеющими максимальное распределение по размерам 50-55 нм, на поверхности подложки также наблюдаются группы островков с характерными размерами 35-65 нм. Полученные результаты можно охарактеризовать, как многомодальное распределение КТ по размерам.

Необходимо отметить, что на кристаллическое совершенство, плотность, а также, размер КТ существенное влияние оказывает состояние поверхности подложки, на которой происходит формирование КТ и, в том числе, рост на разориентированных подложках. Данные факты также требуют проведения дополнительных исследований в условиях ИЛО.

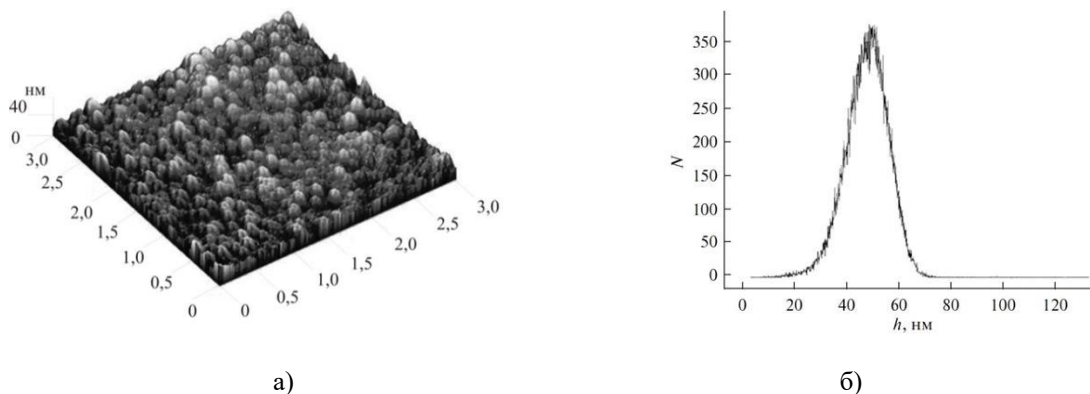


Рисунок 1 – а) 3D АСМ – изображение наноструктур  $\text{Ga}_x\text{InAs}_{1-x}\text{-GaAs}$  полученных методом ИЛО; б) зависимость количества островков (N) от их размера (h) [а] 3D AFM image of  $\text{Ga}_x\text{InAs}_{1-x}\text{-GaAs}$  nanostructures obtained by the ILO method; б) dependence of the number of islands (N) on their size (h)]

На рисунке 2 представлены результаты исследований спектров фотолюминесценции полученных КТ различных составов.

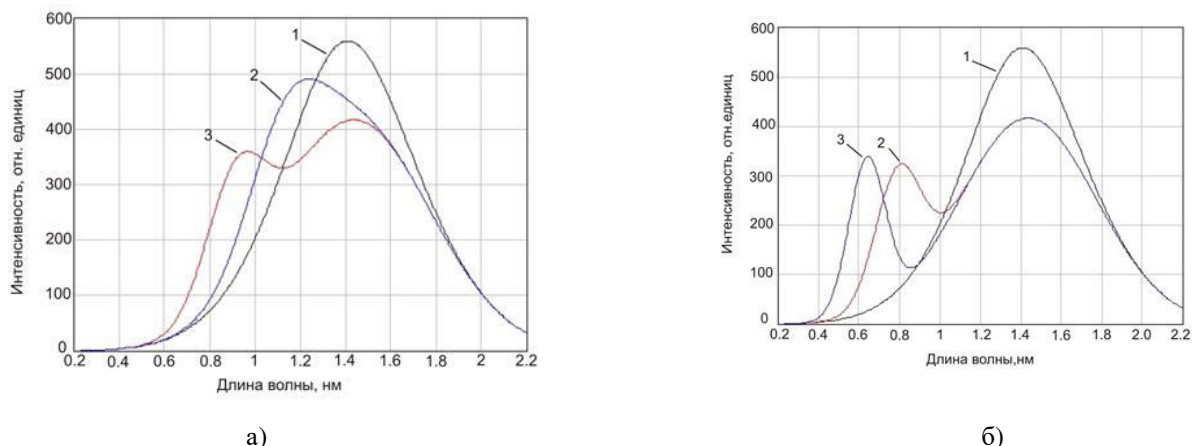


Рисунок 2 – Спектры фотолюминесценции полученных КТ GaInAs – GaAs различных составов: а) 1 –  $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ ; 2 –  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{As}$ ; 3 –  $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{As}$ ; б) 1 –  $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ ; 2 –  $\text{Ga}_{0,76}\text{In}_{0,24}\text{As}$ ; 3 –  $\text{Ga}_{0,85}\text{In}_{0,15}\text{As}$  [Photoluminescence spectra of obtained GaInAs – GaAs QDs of various compositions: а) 1 –  $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ ; 2 –  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{As}$ ; 3 –  $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{As}$ ; б) 1 –  $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ ; 2 –  $\text{Ga}_{0,76}\text{In}_{0,24}\text{As}$ ; 3 –  $\text{Ga}_{0,85}\text{In}_{0,15}\text{As}$ ]

Результаты исследования спектров ФЛ для 1-ого, 2-ого и 3-го состава свидетельствуют о том, что увеличение концентрации Ga в твердом растворе приводит к коротковолновому сдвигу спектра. Также хорошо видно, что с изменением состава наноструктур изменяется и положение пика фотолюминесценции. Так при увеличении индия в составе пик смещается в сторону меньших энергий. Для 3-го состава (рисунок 2 а.) ФЛ разбивается на два пика. Пик, соответствующий длине волны 9 нм – КТ GaInAs, пик, соответствующий длине волны 1,44 нм – материалу подложки GaAs.

На рисунке 2 б, отчетливо видны два характерных пика соответствующих длине волны (0,66 и 0,8 нм) – соответствующих 4-му и 5-му составу КТ GaInAs, в то время, как для 1-ого состава характерно смещение пика в коротковолновую область, что свидетельствует также об увеличении размера КТ.

Также необходимо отметить, что положение максимума ФЛ (энергию локализации электронно-дырочных пар  $E_{exc}$ ) можно использовать для оценки среднего объема КТ. Энергия локализации зависит от объема и от формы квантово-размерного объекта. Отчетливо видны два ярко выраженных пика, что говорит о ФЛ подложечного материала (GaAs) и фотолюминесценции КТ GaInAs. Изменение положения пика ФЛ слоя с квантовыми точками GaInAs наблюдается в коротковолновой области [10].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной исследовательской работы методом ионно-лучевого осаждения были получены квантовые точки на основе трехкомпонентного твердого раствора GaInAs различных составов. На основе полученных результатов определено оптимальное соотношение компонентов в твердом растворе, при котором квантовые точки характеризуются наименьшими размерами, а также увеличивается их плотность. Представлены результаты исследования спектров фотолюминесценции, морфологии поверхности полученных наноструктур. Полученные результаты могут представлять практический интерес в качестве активных слоев полупроводниковых  $p-i-n$  – структур для эффективных фотоэлектрических преобразователей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леденцов, Н.Н.* Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры [Текст] / Н.Н. Леденцов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, вып. 4. – С. 385-410.
2. *Лунин, Л.С.* Новые возможности ионно-лучевых технологий в задачах получения оптоэлектронных устройств на основе многокомпонентных соединений АЗВ5 [Текст] / Л.С. Лунин, И.А. Сысоев // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. – 2003. – Спец. вып. С. 53-54.
3. *Лунин, Л.С.* Ионно-лучевое осаждение фотоактивных нанослоев кремниевых солнечных элементов [Текст] / Л.С. Лунин, С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко, Л.Н. Балабанова // Неорган. материалы. – 2012. – Т. 48. – № 5. – С. 517-522.
4. *Лунин, Л.С.* Исследование фоточувствительных гетероструктур InAs/GaAs с квантовыми точками, выращенных методом ионно-лучевого осаждения [Текст] / Л.С. Лунин [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2011. – № 6. – С. 58-62.
5. *Блохин, С.А.* Фотоэлектрические преобразователи AlGaAs/GaAs с массивом квантовых точек InGaAs [Текст] / С.А. Блохин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, вып. 4. – С. 537-542.
6. *Чеботарев, С.Н.* Исследование фототока в солнечных элементах на гетероструктурах с массивом квантовых точек / С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. 2013. Вып. № 2. – С. 97-99.
7. *Салий, Р.А.* Определение технологических параметров роста в системе InAs-GaAs для синтеза «многомодальных» квантовых точек InAs методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений [Текст] / Р.А. Салий [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2015. – 49, вып. 8.
8. *Благин, А.В.* Физико-технологические особенности ионно-лучевого осаждения наноразмерных структур на основе твердых растворов АЗВ5 [Текст] / А.В. Благин [и др.] // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. – 2011. № 5. – С. 125-128.
9. *Лунин, Л.С.* Формирование квантовых точек InAs на подложках GaAs методом ионно-лучевого осаждения / Л.С. Лунин, И.А. Сысоев, С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко // Вестн. Южного науч. центра РАН. – 2010. – Т. 6, № 4. – С. 46-49.
10. *Сысоев, И.А.* Формирование массивов квантовых точек Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub>/GaAs в процессе ионно-лучевого осаждения [Текст] / И.А. Сысоев [и др.] // Неорганические материалы. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 237-244.

## REFERENCES

- [1] Ledentsov N.N. Geterostruktury` s kvantovy`mi tochkami: poluchenie, svojstva, lazery` [Heterostructures with Quantum Dots: Obtaining, Properties, Lasers]. Fizika i texnika poluprovodnikov [Physics and Technology of Semiconductors]. 1998. Vol. 32. Issue. 4. P. 385-410 (in Russian).
- [2] Lunin L.S. Novy`e vozmozhnosti ionno-luchevy`x texnologij v zadachax polucheniya optoe`lektronny`x ustrojstv na osnove mnogokomponentny`x soedinenij A3V5 [New Possibilities of Ion-Beam Technologies in the Problems of Obtaining Optoelectronic Devices Based on A3B5Multicomponent Compounds]. Izv. vuzov. Severo-Kavkazskij region. Texn. nauki [North Caucasian Region University Bulletin Technical Science]. 2003. Special. no. P. 53-54 (in Russian).
- [3] Lunin L.S. Ionno-luchevoe osazhdenie fotoaktivny`x nanosloev kremnievy`x solnechny`x e`lementov [Ionic-Beam Deposition of Photoactive Nanolayers of Silicon Solar Cells]. Neorgan. materialy` [Inorganic Materials]. 2012. T. 48. № 5. P. 517-522 (in Russian).
- [4] Lunin L.S. Issledovanie fotochuvstvitel`ny`x geterostruktur InAs/GaAs s kvantovy`mi tochkami, vy`rashhenny`x metodom ionno-luchevogo osazhdeniya [Study of Photosensitive Heterostructures of InAs / GaAs with Quantum Dots Grown by the Method of Ion-Beam Deposition]. Poverxnost`. Rentgenovskie, sinxrotronny`e i nejtronny`e issledovaniya [Surface. X-ray, Synchrotron and Neutron Studies]. 2011. № 6. P. 58-62 (in Russian).
- [5] Bloxin S.A. et al. Fotoe`lektricheskie preobrazovateli AlGaAs/GaAs s massivom kvantovy`x toчек InGaAs [AlGaAs / GaAs Photoelectric Converters with an InGaAs Quantum Dot Array]. Fizika i texnika poluprovodnikov [Semiconductor Physics and Technology]. 2009. T. 43. V. 4. S. 537-542 (in Russian).
- [6] Chebotarev S.N., Pashhenko A.S. Issledovanie fototoka v solnechny`x e`lementax na

- heterostrukturax s massivom kvantovy`x toчек [Investigation of Photocurrent in Solar Cells on Heterostructures with an Array of Quantum Dots] *Izv. vuzov. Severo-Kavkazskij region. Texn. nauki.* [North Caucasian Region University Bulletin Technical Science]. 2013. № 2. S. 97-99 (in Russian).
- [7] Salij R.A. et al. Opredelenie texnologicheskix parametrov rosta v sisteme InAs-GaAs dlya sinteza «mnogomodal`ny`x» kvantovy`x toчек InAs metodom gazofaznoj e`pitaksii iz metalloorganicheskix soedinenij [Determination of Technological Parameters of Growth in the InAs-GaAs System for the Synthesis of “Multimodal” InAs Quantum Dots by the Method of Gas Phase Epitaxy from Organometallic Compounds]. *Fizika i texnika poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Technology]. 2015. T. 49. V. 8 (in Russian).
- [8] Blagin A.V. Fiziko-texnologicheskie osobennosti ionno-luchevogo osazhdeniya nanorazmerny`x struktur na osnove tverdyy`x rastvorov A3B5 [Physico-Technological Features of Ion-Beam Deposition of Nanosized Structures Based on A3B5 Solid Solutions]. *Izv. vuzov. Severo-Kavkazskij region. Texn. nauki.* [North Caucasian Region University Bulletin Technical Science]. 2011. № 5. P. 125-128 (in Russian).
- [9] Lunin L.S. Formirovanie kvantovy`x toчек InAs na podlozhkax GaAs metodom ionno-luchevogo osazhdeniya [Formation of InAs Quantum Dots on GaAs Substrates by Ion-Beam Deposition]. *Vestn. Yuzhnogo nauch. centra RAN* [Southern Scientific center of RAS Bulletin]. 2010. T. 6. № 4. P. 46-49 (in Russian).
- [10] Sysoev I.A. Formirovanie massivov kvantovy`x toчек GaIn1-xAsyP1-y/GaAs v processe ionno-luchevogo osazhdeniya [The Relationship between the Sizes of Quantum Dots in InAs-QD / GaAs with the Photoluminescence Spectrum]. *Neorganicheskie materialy`* [Inorganic Materials]. 2014. T. 50. №3. P. 237-244 (in Russian).

### Elements for Solar Batteries on the GaInAs Nanostructure Basis Obtained by Ion-Beam Deposition Method

I.A. Sysoev<sup>\*1</sup>, D.A. Gusev<sup>\*\*2</sup>, A.E. Dembitsky<sup>\*\*3</sup>, A.Yu. Smolin<sup>\*\*4</sup>, V.F. Kataev<sup>\*\*5</sup>

*\*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education "North Caucasian Federal University", Pushkin street, 1, Stavropol, Russia 355009*

*<sup>1</sup>ORCID iD: 0000-0001-5415-0782*

*WoS Researcher ID: Q-1522-2015*

*e-mail: eianpisia@yandex.ru*

*\*\*Volgodonsk Engineering-Technical Institute – Branch of NRNU «MEPhI», Lenin street, 73/94, Volgodonsk, Russia 347360*

*<sup>2</sup>ORCID iD: 0000-0002-4997-9497*

*WoS Researcher ID: M-9350-2016*

*e-mail: dmon\_@mail.ru*

*<sup>3</sup>ORCID iD: 0000-0003-4616-621X*

*WoS Researcher ID: O-3133-2018*

*e-mail: demartev@gmail.com*

*<sup>4</sup>ORCID iD: 0000-0002-0148-2086*

*WoS Researcher ID: F-4089-2017*

*e-mail: smol\_vol@mail.ru*

*<sup>5</sup>ORCID iD: 0000-0001-5217-0991*

*WoS Researcher ID: Q-1673-2018*

*e-mail: kataev.v.f.@gmail.com*

**Abstract** – The study experimentally showed the possibility of quantum dots formation based on three-component InGaAs solid solutions of various compositions on the surface of GaAs by the method of ion-beam deposition of quantum dots. The features of the technology of ion – beam deposition are considered. The optimal ratios of the of the GaInAs solid solution components are determined at which the quantum dots are characterized by the smallest dimensions, and the technological conditions are established where their density increases. The results of the study of the photoluminescence spectra and the surface morphology of the obtained nanostructures are presented. The results obtained may be of practical interest as materials for the formation of highly efficient solar cell panels on their basis, which are widely used as alternative environmentally friendly energy sources in the energy sector at present .

**Keywords:** solar cells, nanoscale structures, multicomponent solid solutions, ion beam deposition, technology, materials for photovoltaic cells.