

19. *Mashkov K.Yu., Rubtsov V.I., Shtifanov N.V.* Avtomaticheskaya sistema obespecheniya opornoj prokhozimosti mobil'nogo robota [Automatic system of providing support patency of the mobile robot], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie. Vyp. Spetsial'naya robototekhnika* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering], 2012, pp. 95-106.
20. *Zhang A.* Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, No. 22 (11), pp. 1330-1334.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.К. Платонов.

**Носков Владимир Петрович** – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: noskov\_mstu@mail.ru; 105005, г. Москва ул. 2-я Бауманская, 5; тел.: +79166766057; НИИ Специального машиностроения; зав. сектором; кафедра специальной робототехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

**Вазяев Александр Викторович** – e-mail: vazaev@bmstu.ru; тел.: +79153976550; НИИ Специального машиностроения; инженер; кафедра специальной робототехники и мехатроники; аспирант.

**Рубцов Иван Васильевич** – e-mail: noskov\_mstu@mail.ru; тел.: 84992636019; НИИ Специального машиностроения; начальник отдела; кафедра специальной робототехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

**Цариченко Сергей Георгиевич** – ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России; e-mail: tsarichenko\_s@mail.ru; 143903, г. Балашиха, Московская область, мкр. ВНИИПО, 2; тел.: +79037226194; д.т.н.; Центр развития робототехники МЧС России; начальник.

**Noskov Vladimir Petrovich** – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: noskov\_mstu@mail.ru; Russia, 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya st., 5; phone: +79166766057; Special robotics and mechatronics department, NIISM sector head.

**Vazaev Alexander Viktorovich** – e-mail: vazaev@bmstu.ru; phone: +79153976550; the department of special robotics and mechatronics; postgraduate student; NIISM; engineer.

**Rubtsov Ivan Vasil'evich** – e-mail: noskov\_mstu@mail.ru; phone: +74992636019; the department of special robotic and mechnronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Tsarichenko Sergey Vasil'evich** – All Russian Fire Research Institute; e-mail: tsarichenko\_s@mail.ru; 143903, Balashiha, Moscow Region, VNIPO, 12; phone: +79037226194; dr. of eng. sc.; Center telerobotic development EMERCOM; general head.

УДК 621.383.525

**Э.Е. Блохин, А.С. Пащенко**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР INAS/GAAS  
С ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ БАРЬЕРАМИ ALGAAS И GAAS  
ДЛЯ ФОТОДЕТЕКТОРОВ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА\***

*Методом ионно-лучевой эпитаксии получены гетероструктуры с массивом квантовых точек InAs заключенных барьерными слоями GaAs (образцы I типа) и AlGaAs (образцы II типа). Толщина барьерных слоев не превышала 30 нм. Показано, что метод позволяет получать квантовые точки с латеральными размерами до 50 нм. при высоте 10 нм. Получен массив квантовых точек плотностью  $10^9 \text{ см}^{-2}$ . Исследования фотолюминесценции показали пики основных переходов для квантовых точек в диапазоне 1.1 эВ (1150 нм) для*

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 16-38-60127 «код мол\_а\_дк».

образцов первого типа с GaAs барьером, и 1.15 эВ (1050 нм) для образцов второго типа с AlGaAs барьером. Данные области соответствуют ближнему ИК-диапазону. Пик основных переходов для структур с барьером AlGaAs смещен в коротковолновую область на 50–100 нм, и имеет большую интенсивность. Также у образцов второго типа наблюдалось смещение пика смачивающего слоя в коротковолновую область. Ширина основного пика обоих типов образцов составила порядка 0.2–0.25 эВ, что, вероятно, связано с дисперсией размеров квантовых точек. Темновые вольт-амперные характеристики структур показали значение плотности темнового тока порядка  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup> (для образцов первого типа) при температуре 90 К. Для образцов второго типа аналогичная величина составила  $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> при такой же температуре. Отмечалась асимметрия кривых темнового тока при положительном и отрицательном смещении. Для обоих типов образцов наблюдалась деградация характеристик с ростом температуры. При увеличении рабочей температуры до комнатной, значение плотности темнового тока колебалось от  $10^{-1}$  А/см<sup>2</sup> до  $10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>.

*Инфракрасный фотодетектор; квантовая точка; фотолюминесценция; темновой ток.*

**E.E. Blokhin, A.S. Pashchenko**

### **THE STUDY OF HETEROSTRUCTURES OF INAS/GAAS C POTENTIAL BARRIERS OF ALGAAS AND GAAS PHOTODETECTORS FOR THE NEAR INFRARED RANGE**

*By ion beam epitaxy heterostructures obtained with an array of InAs quantum dots prisoners barrier layers GaAs (samples of type I) and AlGaAs (samples of type II). The thickness of barrier layers is not greater than 30 nm. It is shown that the method allows to obtain quantum dots with lateral dimensions up to 50 nm, at a height of 10 nm. Got a lot of quantum dot density of  $10^9$  cm<sup>-2</sup>. The photoluminescence studies showed major peaks for conversion of quantum dots in the range 1.1 eV (1150 nm) for the samples of the first type barrier GaAs and 1.15 eV (1050 nm) for the samples of the second-type AlGaAs barrier. These areas correspond to the near-infrared. Peak major transitions in structures with barrier AlGaAs shifted to shorter wavelengths of 50-100 nm, and has a greater intensity. Also, samples of the second type of a shift of the peak of the wetting layer to shorter wavelengths. The width of the main peak of both types of samples was about 0.2–0.25 eV, which is probably due to the dispersion of the size of the quantum dots. Dark current-voltage characteristics of the structures showed the density of the dark current of the order of  $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> (for the samples of the first type) at a temperature of 90 K. For the samples of the second type is similar magnitude was  $10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> at the same temperature. There was asymmetry of the curves of the dark current at the positive and negative bias. For both types of samples was observed degradation of performance with increasing temperature. With an increase in the working temperature to room temperature, the dark current density ranged from  $10^{-1}$  A/cm<sup>2</sup> to  $10^{-2}$  A/cm<sup>2</sup>.*

*Infrared photodetector; quantum dot; photoluminescence; dark current.*

**Введение.** Фотодетекторы в настоящее время все более востребованы в областях биологии, медицины. От приборов ночного видения до датчиков атмосферных газов и линий волоконно-оптической связи. К современным фотодетекторам предъявляется ряд требований, а именно, быстроедействие, минимальные внутренние шумы, высокие рабочие температуры, хорошая детектирующая способность. На данный момент перспективными и отвечающими требованиям являются фотодетекторы QDIP (с квантовыми точками) и QWIP (с квантовыми ямами) на основе многокомпонентных твердых растворов АЗВ5 [1]. Данные структуры обладают рядом преимуществ по сравнению с полупроводниковыми детекторами, а именно, за счет введения квантоворазмерных объектов можно добиться высокого значения детектирующей способности  $D^* = 10^8 - 10^{10}$  см<sup>2</sup>·Гц<sup>1/2</sup> при рабочих температурах до 150 К [2–4] и эквивалентной мощности шума  $10^{-13}$  Вт [5, 6]. Чувствительность по току превышает 10 А/Вт. За счет трехмерного ограничения, время жизни носителей заряда в возбужденном состоянии составляет 400 пс, что дает время отклика менее 1 нс [7]. Фотодетекторы с квантовыми точками можно использовать как

для ближнего ИК (1.0 – 1.5 мкм), так и для среднего, дальнего и для мультиспектрального состояния. В работе [8] подробно описана возможность создания мультиспектрального состояния QD-InAs/GaAs гетероструктуры, с детектирующей способностью  $2.96 \cdot 10^{10}$  ( $\lambda = 9$  мкм),  $8.7 \cdot 10^{10}$  ( $\lambda = 7.4$  мкм),  $8.5 \cdot 10^{12}$  ( $\lambda = 6.5$  мкм) и  $2.2 \cdot 10^{10}$  ( $\lambda = 7.4$  мкм)  $\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$  при рабочих температурах 77, 70, 40 и 5 К соответственно. Однако эффективность таких структур пока не превышает 8–12 %, но это значение постоянно возрастает с совершенствованием конструкций и технологий создания.

Наиболее используемыми методами выращивания фотодетектирующих структур являются молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и газофазная эпитаксия (МОСVD) [2–8]. Недостатки этих методов в высокой стоимости и технологической сложности оборудования. Предметом данной работы являются гетероструктуры с массивом квантовых точек InAs, различающихся материалом барьерного слоя, полученные методом ионно-лучевого осаждения (ИЛО). Данным методом можно получать эпитаксиальные слои [9–10] и квантовые точки [11–13]. Метод не требует дорогостоящего оборудования и позволяет проводить процессы ионного травления перед кристаллизацией.

Цель работы заключается в исследовании функциональных характеристик гетероструктур InAs/GaAs с квантовыми точками ограниченных потенциальными барьерами GaAs и AlGaAs, выращенных методом ионно-лучевого осаждения.

**Эксперимент.** Для проведения исследований были выращены два типа образцов. Первый с барьерным слоем GaAs, второй с барьерным слоем AlGaAs. Схематично гетероструктура представлена на рис. 1.

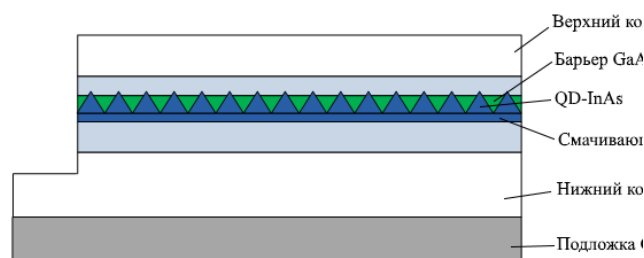


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемых образцов

Подложка основного материала GaAs (ширина запрещенной зоны 1.48 эВ, ориентация (110) предварительно очищалась ионным пучком рабочего газа  $\text{Ag}^+$  с плотностью  $1.8 \text{ мА/см}^2$ , при давлении в камере  $10^{-6}$  Па. Температура при очистке составляла  $500^\circ\text{C}$ , время очистки – 30 минут. Перед напылением основных слоев, температура уменьшалась до  $450^\circ\text{C}$ . С учетом технологических особенностей материалов GaAs, AlGaAs, InAs [14–16] и ранее выполненных работ по ИЛО [9–13] были выбраны оптимальные параметры процесса роста слоев. Угол наклона мишени к ионному пучку составил 45 %, что дало симметричное распределение толщины получаемых слоев. Расстояние от мишени до подложки – 85 мм, выбрано из условия влияния на коэффициент массопереноса и на разброс толщины слоя. Для заданного расстояния диаметр ионного пучка составил 42 мм.

Далее на очищенную подложку наносился контактный слой  $n^+$  - GaAs, толщиной 200 нм путем распыления мишени, легированной теллуром до концентрации  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Перед нанесением слоя InAs температура снижалась еще на  $30^\circ\text{C}$  (до  $420^\circ\text{C}$ ) для избегания десорбции летучего компонента (сохранение стехиометрии состава). Толщина смачивающего слоя InAs составила 4 монослоя, при скорости роста 0.5 нм/с. Затем выращивался барьерный слой GaAs (образец 1) и

$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  (образец 2), толщиной 30 нм. Формирование массива квантовых точек происходило в режиме Странского — Крастанова. Сверху на барьерный слой наносился спейсер толщиной 80 нм для снятия напряжения упругой деформации. Верхним проводящим слоем являлся GaAs, легированный цинком до концентрации  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Исследование поверхности образцов проводилось поэтапно после осаждения арсенида индия на подложку основного материала, при помощи атомно-силового микроскопа Solver HV. Для исследования спектров фотолюминесценции применялась оптическая схема с инжекционным полупроводниковым лазером мощностью 8.5 мВт, с длиной волны излучения 402 нм (соответствует энергии 3 эВ). Образцы освещались со стороны слоя выращенных квантовых точек. В качестве фотоприемного устройства использовался германиевый фотодиод. Измерения темновых вольт-амперных характеристик гетероструктур проводились при помощи измерителя иммитанса E7-20, соединенного с ртутным зондом MDC 802B-150 при температурах 90 и 300 К.

**Результаты и обсуждение.** Ниже на рис. 2 приведены 2D (а) и 3D (б) АСМ-изображения поверхности структуры, обработка результатов проводилась стандартным программным интерфейсом микроскопа и прикладными численными методами. Размеры квантовых точек определялись путем деконволюции профилей АСМ-изображений, при помощи компьютерного моделирования [17]. На исследуемой области образцов удалось обнаружить скопление квантовых точек с разбросом по латеральному размеру 20–80 нм, высота островков составила от 8 до 20 нм.

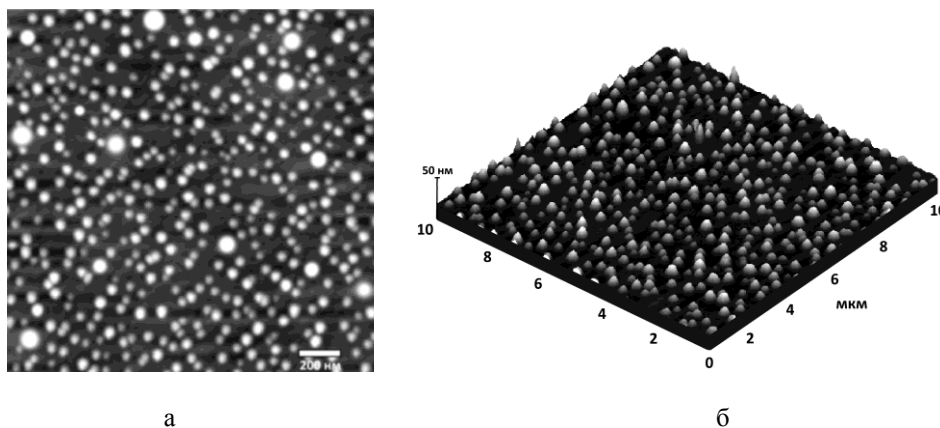


Рис. 2. АСМ 2D (а) и 3D (б) изображения поверхности образцов с массивом квантовых точек InAs выращенных методом ИЛО

Компьютерный анализ статистических данных по поверхности позволил определить, что большая часть нанокластеров InAs имеют размеры менее 50 нм, однако на поверхности также присутствуют островки большего размера (более 50 нм), что говорит о некоторой неоднородности. Ниже на рисунке 3 представлен график распределения плотности квантовых точек по латеральным размерам на рассматриваемом участке  $10 \times 10 \text{ мкм}$ . Как видно из гистограммы, плотность квантовых точек на исследуемом участке составила порядка  $10^3 \text{ штук/мкм}^2$  что соответствует плотности порядка  $10^9 \text{ см}^{-2}$ .

Полученные результаты морфологии поверхности образцов совпадают с работами сторонних исследований по данной тематике [18–20].

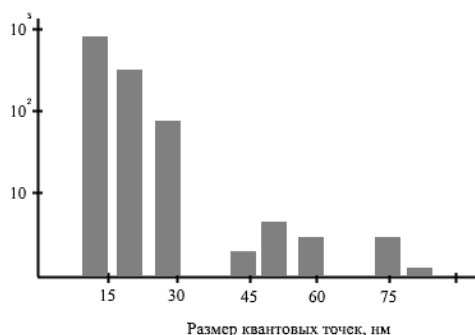


Рис. 3. Гистограмма размерности квантовых точек InAs

На рис. 4 изображены спектры фотолюминесценции, полученные для двух типов образцов с различными барьерными слоями. Образцы первого типа (барьерный слой GaAs) дают пик основных переходов в КТ при 1.12 эВ, что соответствует  $\lambda = 1.2$  мкм. Большая ширина основного пика связана с дисперсией размеров квантовых точек. При толщине барьерного слоя 30 нм, все квантовые точки находятся в электростатическом поле этого барьера, которое обеспечивает эмиссию возбужденных электронов с уровней КТ в матрицу гетероструктуры по двум основным механизмам: надбарьерная тепловая эмиссия и туннелирование. При уменьшении толщины барьера можно наблюдать смещение основного пика в длинноволновую область спектра. Однако, при нанесении тонкого покровного слоя, длинноволновое смещение пропадает, что, скорее всего, связано с вкладом сил упругой деформации в массиве квантовых точек.

Второй по интенсивности пик смещен в коротковолновую область спектра 1.3 эВ ( $\lambda = 953$  нм). Данный пик характеризует излучательные переходы в смачивающем слое. После нанесения барьерного слоя на массив квантовых точек, смачивающий слой меняет свой состав и представляет собой раствор  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ . Данный пик с длиной волны 953 нм соответствует 35 % содержанию индия в растворе.

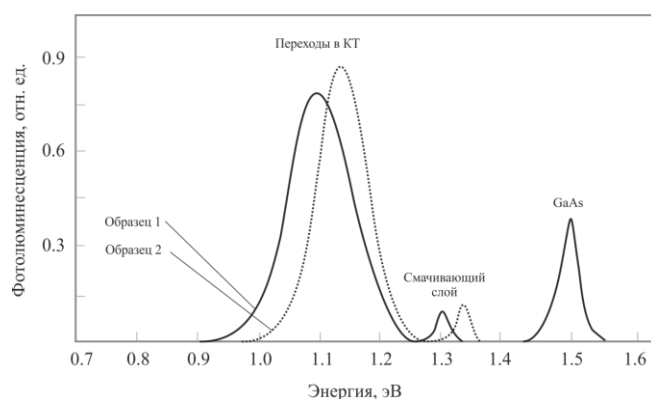


Рис. 4. Фотолюминесценция образцов первого (барьерный слой GaAs) и второго (барьерный слой AlGaAs) типов

Последний пик графика (1,5 эВ, 890 нм) соответствует краю собственного поглощения в слое GaAs. Данный пик не имеет высокой интенсивности, так как довольно малая часть излучения доходит до этой области структуры.

Образцы второго типа выращивались с барьерным слоем AlGaAs. Данный раствор является широкозонным и ширина запрещенной зоны зависит от состава в пределах 1.4–2.1 эВ. В ранних работах [21, 22] по получению структур с квантовыми точками говорилось об улучшении функциональных характеристик при применении в качестве барьера широкозонного материала (уменьшение значения темнового тока). Нами был использован состав  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  с шириной запрещенной зоны 1,71 эВ. Как видно из спектра фотолюминесценции, основной пик перехода в массиве квантовых точек сместился в коротковолновую область на 70 нм (что связано с применением широкозонного барьера), аналогично и смещение смачивающего слоя, в связи с изменением его состава. При применении широкозонного барьера изменяется распределение сил упругой деформации в слое квантовых точек, что приводит к смещению пика в коротковолновую область. Стоит отметить увеличение интенсивности пика основных переходов по сравнению с барьером GaAs. По-видимому, это связано с увеличением числа возбужденных электронных состояний (за счет удерживающего потенциала), и с уменьшением скорости поверхностной безызлучательной рекомбинации в последующих слоях структуры.

На рис. 5 и 6 представлены зависимости плотности темновых токов для образцов первого и второго типов соответственно. Для обоих типов гетероструктур характерна асимметрия кривых темнового тока при положительном и отрицательном смещении. Это связано в первую очередь с асимметрией размеров квантовых точек. При малом смещении возрастает число заполненных электронами состояний в квантовых точках. Когда большая часть состояний занята, увеличение темнового тока не наблюдается. Дальнейшее увеличение смещения приводит к уменьшению барьера и к экспоненциальному увеличению темнового тока. Из рисунка 5 видно, что при нулевом смещении плотность темнового тока структуры с GaAs барьером составляет  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup> (при температуре 90 К). При увеличении смещения до 0.8 В, значение темнового тока возрастает на три порядка ( $10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>). Дальнейшее смещение приводит к увеличению темнового тока до  $10^0$  А/см<sup>2</sup>, после чего внешнее напряжение не влияет на характеристику. При температуре 90 К вклад в темновой ток вносит только туннельный эффект. При увеличении температуры, значение темнового тока возрастает, за счет вклада термоэлектронной эмиссии. Из графика видно, что при комнатной температуре (300 К) значение темнового тока порядка  $10^{-1}$  А/см<sup>2</sup>.

При использовании в качестве барьерного слоя раствора AlGaAs наблюдается значительное уменьшение плотности темнового тока при нулевом смещении ( $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>). Более широкозонный материал служит барьером для термоэмиссионного тока, тем самым уменьшая его темновой ток. При увеличении температуры, характеристика деградирует аналогично образцам с барьером GaAs.

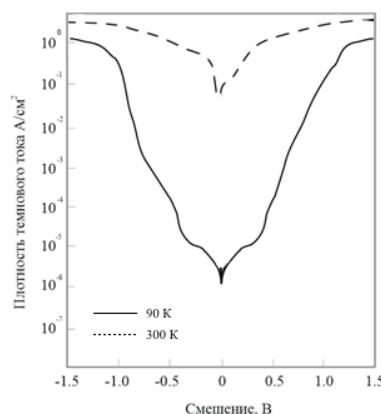


Рис. 5. Плотность темнового тока в первом типе образцов с GaAs барьерным слоем

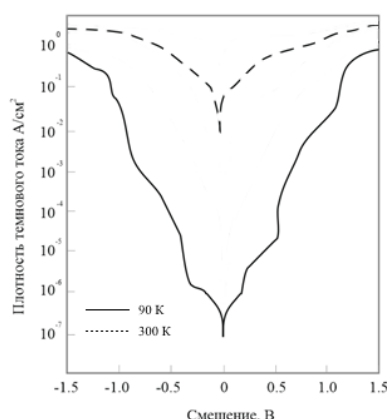


Рис. 6. Плотность темнового тока во втором типе образцов с AlGaAs барьерным слоем

**Заключение.** Продемонстрирована возможность получения фотодетектирующих гетероструктур InAs/GaAs с квантовыми точками методом ионно-лучевого осаждения. Проведенное АСМ исследование морфологии поверхности образцов показало наличие квантовых точек InAs с латеральными размерами до 50 нм, высотой порядка 10 нм с плотностью  $10^9 \text{ см}^{-2}$ . Полученные результаты хорошо коррелируют с экспериментальными работами сторонних авторов [1–13].

Выполненные исследования темновых ВАХ показали, что в структурах с барьерным слоем AlGaAs величина плотности темнового тока ( $10^{-7} \text{ А/см}^2$ ) на порядок ниже, чем в структурах с барьером GaAs ( $10^{-6} \text{ А/см}^2$ ) при температуре 90 К. Для обоих типов гетероструктур замечено резкое увеличение плотности темнового тока до значений  $10^{-1} \text{ А/см}^2$  (для образцов первого типа), и  $10^{-2} \text{ А/см}^2$  (для образцов второго типа) при температуре 300 К.

Обнаружены пики фотолюминесценции для основных переходов в массиве квантовых точек InAs 1.1 эВ (для барьера GaAs) и 1.15 эВ (для барьера AlGaAs). Стоит отметить, что пик основных переходов в структурах с барьером AlGaAs имеет большую интенсивность, чем пик с барьером GaAs. Установлено, что для смещения спектра в длинноволновую область необходимо использовать барьеры меньшей толщины. Полученные результаты фотолюминесценции и зависимостей плотности темнового тока показывают возможность применения используемых гетероструктур для фотодетекторов ближнего ИК-диапазона. Выявлено, что для достижения плотностей темнового тока менее  $10^{-8} \text{ А/см}^2$  следует увеличивать количество слоев КТ InAs, и уменьшать толщины барьерных и покровных слоев выращиваемых гетероструктур.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Alfimova D.L., Lunin L.S., M.L. Lunina M.L.* Growth and properties of GaIn<sub>1-y</sub>PzAs<sub>1-x-z</sub>Bix solid solutions on GaP substrates // *Inorganic Materials*. – 2014. – Vol. 50, Issue 2. – P. 113-119.
2. *Shih-Yen LIN, Yao-Jen.* Comparison of InAs/GaAs Quantum Dot Infrared Photodetector and GaAs/(AlGa)As Superlattice Infrared Photodetector // *J. Appl. Phys.* – 2001. – Vol. 40, No. 12. – P. 1290-1292.
3. *Kwang Moo KIM, Young Ju Park, Cheong Hyun ROH.* Shape and interband transition behavior of InAs quantum dots dependent on number of stacking cycles // *J. Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 42, No. 1. – P. 54-57.

4. *Wei-Hsun Lin, Kuang-Ping Chao.* The influence of In composition on InGaAs-capped InAs/GaAs quantum-dot infrared photodetectors // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 106, No. 9. – P. 054512-1-054512-3.
5. *David A. Ramirez, Jiayi Shao, Majeed M. Hayat, and Sanjay Krishna.* Midwave infrared quantum dot avalanche photodiode // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 97. – P. 212-215.
6. *Rajeev V. Shenoi, Jessie Rosenberg, Thomas E. Vandervelde.* Multispectral Quantum Dots-in-a-Well Infrared Detectors Using Plasmon Assisted Cavities // *Ieee Journal of Quantum Electronics.* – 2010. – Vol. 46, No. 7. – P. 1051-1057.
7. *Perera A.G.U., Aytac Y., Ariyawansa G., Matsik S.G., Buchanan M.* Photo Detectors for Multi-Spectral Sensing // *IEEE International Conference on Nanotechnology (Portland August 15-18, 2011).* – USA, 2011. – P. 286-291.
8. *Eui-Tae Kim, Zhonghui Chen, and Anupam Madhukar.* Tailoring detection bands of InAs quantum-dot infrared photodetectors using  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  strain-relieving quantum wells // *Applied physics letters.* – 2001. – Vol. 79, No. 20. – P. 3441-3443.
9. *Lunin L.S., Sysoev I.A., Alfimova D.L., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S.* A study of photo-sensitive InAs/GaAs heterostructures with quantum dots grown by ion-beam deposition // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* – 2011. – Vol. 5, Issue 3. – P. 559-562.
10. *Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Irkha V.A.* Features in the formation of Ge/Si multilayer nanostructures under ion-beam-assisted crystallization // *Technical Physics Letters.* – 2013. – Vol. 39, Issue 8. – P. 726-729.
11. *Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Bolobanova L.N.* Ion beam deposition of photoactive nanolayers for silicon solar cells // *Inorganic Materials.* – 2012. – Vol. 48, Issue 5. – P. 439-444
12. *Pashchenko A.S., Chebotarev S.N., Lunin L.S.* Carrier transport in multilayer InAs/GaAs quantum dot heterostructures grown by ion beam crystallization // *Inorganic Materials.* – 2015. – Vol. 51, Issue 3. – P. 197-200.
13. *Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Williamson A., Irkha V.A., Gamidov V.A.* Ion beam crystallization of InAs/GaAs(001) nanostructures // *Technical Physics Letters.* – 2015. – Vol. 41, Issue 7. – P. 661-664.
14. *Joseph E. Greene.* Epitaxial crystal growth by sputter deposition: Applications to semiconductors. Part I // *Department of metallurgy coordinated science laboratory materials research laboratory.* – 2006. – Vol. 11, No. 1. – P. 47-97.
15. *Zhengmao Ye, Joe C. Campbell.* Normal-incidence InAs self-assembled quantum dot infrared photodetectors with a high detectivity // *IEEE journal of quantum electronics.* – 2002. – Vol. 38, No. 9. – P. 1234-1237.
16. *Phillips J., Bhattacharya P., Kennerly S. W., Beekman D. W., and Dutta M.* Self-assembled InAs-GaAs quantum dot intersubband detectors // *IEEE J. quantum electron.* – 1999. – Vol. 35, No. 6. – P. 936-943.
17. *Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Dudnikov S.A.* Correlation between the size and photoluminescence spectrum of quantum dots in InAs-QD/GaAs // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* – 2013. – Vol. 7, Issue 1. – P. 36-40.
18. *Amtout A., Raghavan S., Rotella P.* Theoretical modeling and experimental characterization of InAs/InGaAs quantum dots in a well detector // *J. Appl. Phys.* – 2004. – Vol. 96, No. 7. – P. 3781-3786.
19. *Beattie N.S.* Analysis of InAs/GaAs quantum dot solar cells using  $\text{Suns} - V_{oc}$  measurements // *Solar energy materials & solar cells.* – 2014. – Vol. 130. – P. 241-245.
20. *Wang S.Y., Lin S.D., Wu H.W.* Low dark current quantum-dot infrared photodetectors with an AlGaAs current blocking layer // *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 78. – P. 1023-1025.
21. *Lin S.Y.* High-performance InAs/GaAs quantum dot infrared photodetectors with a single-sided  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  blocking layer // *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 78. – P. 2784-2786.
22. *Chen Z.H.* Normal incidence InAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  quantum dot infrared photodetectors with undoped active region // *J. Appl. Phys.* – 2001. – Vol. 89. – P. 4558-4563.



## REFERENCES

1. *Alfimova D.L., Lunin L.S., M.L. Lunina M.L.* Growth and properties of  $\text{GaIn}_{1-y}\text{PzAs}_1-x-z\text{Bi}_x$  solid solutions on GaP substrates, *Inorganic Materials*, 2014, Vol. 50, Issue 2, pp. 113-119.
2. *Shih-Yen LIN, Yao-Jen.* Comparison of InAs/GaAs Quantum Dot Infrared Photodetector and GaAs/(AlGa)As Superlattice Infrared Photodetector, *J. Appl. Phys.*, 2001, Vol. 40, No. 12, pp. 1290-1292.
3. *Kwang Moo KIM, Young Ju Park, Cheong Hyun ROH.* Shape and interband transition behavior of InAs quantum dots dependent on number of stacking cycles, *J. Appl. Phys.*, 2003, Vol. 42, No. 1, pp. 54-57.
4. *Wei-Hsun Lin, Kuang-Ping Chao.* The influence of In composition on InGaAs-capped InAs/GaAs quantum-dot infrared photodetectors, *J. Appl. Phys.*, 2009, Vol. 106, No. 9, pp. 054512-1-054512-3.
5. *David A. Ramirez, Jiayi Shao, Majeed M. Hayat, and Sanjay Krishna.* Midwave infrared quantum dot avalanche photodiode, *Appl. Phys. Lett.*, 2010, Vol. 97, pp. 212-215.
6. *Rajeev V. Sheno, Jessie Rosenberg, Thomas E. Vandervelde.* Multispectral Quantum Dots-in-a-Well Infrared Detectors Using Plasmon Assisted Cavities, *Ieee Journal of Quantum Electronics*, 2010, Vol. 46, No. 7, pp. 1051-1057.
7. *Perera A.G.U., Aytac Y., Ariyawansa G., Matsik S.G., Buchanan M.* Photo Detectors for Multi-Spectral Sensing, *IEEE International Conference on Nanotechnology (Portland August 15-18, 2011)*. USA, 2011, pp. 286-291.
8. *Eui-Tae Kim, Zhonghui Chen, and Anupam Madhukar.* Tailoring detection bands of InAs quantum-dot infrared photodetectors using  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  strain-relieving quantum wells, *Applied physics letters*, 2001, Vol. 79, No. 20, pp. 3441-3443.
9. *Lunin L.S., Sysoev I.A., Alfimova D.L., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S.* A study of photo-sensitive InAs/GaAs heterostructures with quantum dots grown by ion-beam deposition, *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2011, Vol. 5, Issue 3, pp. 559-562.
10. *Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Irkha V.A.* Features in the formation of Ge/Si multilayer nanostructures under ion-beam-assisted crystallization, *Technical Physics Letters*, 2013, Vol. 39, Issue 8, pp. 726-729.
11. *Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Bolobanova L.N.* Ion beam deposition of photoactive nanolayers for silicon solar cells, *Inorganic Materials*, 2012, Vol. 48, Issue 5, pp. 439-444
12. *Pashchenko A.S., Chebotarev S.N., Lunin L.S.* Carrier transport in multilayer InAs/GaAs quantum dot heterostructures grown by ion beam crystallization, *Inorganic Materials*, 2015, Vol. 51, Issue 3, pp. 197-200.
13. *Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Williamson A., Irkha V.A., Gamidov V.A.* Ion beam crystallization of InAs/GaAs(001) nanostructures, *Technical Physics Letters*, 2015, Vol. 41, Issue 7, pp. 661-664.
14. *Joseph E. Greene.* Epitaxial crystal growth by sputter deposition: Applications to semiconductors. Part I, *Department of metallurgy coordinated science laboratory materials research laboratory*, 2006, Vol. 11, No. 1, pp. 47-97.
15. *Zhengmao Ye, Joe C. Campbell.* Normal-incidence InAs self-assembled quantum dot infrared photodetectors with a high detectivity, *IEEE journal of quantum electronics*, 2002, Vol. 38, No. 9, pp. 1234-1237.
16. *Phillips J., Bhattacharya P., Kennerly S. W., Beekman D. W., and Dutta M.* Self-assembled InAs-GaAs quantum dot intersubband detectors, *IEEE J. quantum electron.*, 1999, Vol. 35, No. 6, pp. 936-943.
17. *Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Dudnikov S.A.* Correlation between the size and photoluminescence spectrum of quantum dots in InAs-QD/GaAs, *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2013, Vol. 7, Issue 1, pp. 36-40.
18. *Amtout A., Raghavan S., Rotella P.* Theoretical modeling and experimental characterization of InAs/InGaAs quantum dots in a well detector, *J. Appl. Phys.*, 2004, Vol. 96, No. 7, pp. 3781-3786.
19. *Beattie N.S.* Analysis of InAs/GaAs quantum dot solar cells using Suns – Voc measurements, *Solar energy materials & solar cells*, 2014, Vol. 130, pp. 241-245.
20. *Wang S.Y., Lin S.D., Wu H.W.* Low dark current quantum-dot infrared photodetectors with an AlGaAs current blocking layer, *Appl. Phys. Lett.*, 2001, Vol. 78, pp. 1023-1025.

21. Lin S.Y. High-performance InAs/GaAs quantum dot infrared photodetectors with a single-sided Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As blocking layer, *Appl. Phys. Lett.*, 2001, Vol. 78, pp. 2784-2786.
22. Chen Z.H. Normal incidence InAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As quantum dot infrared photodetectors with undoped active region, *J. Appl. Phys.*, 2001, Vol. 89, pp. 4558-4563.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор В.Н. Лозовский.

**Блохин Эдуард Евгеньевич** – Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова (НПИ); e-mail: holele@mail.ru; 346428, г. Новочеркасск, ул. Провсешения, 132; тел.: 89185678145, 89185678145; базовая кафедра ЮНЦ РАН «Нанотехнология в электронике»; аспирант; ассистент.

**Пашченко Александр Сергеевич** – Южный научный центр Российской академии наук; e-mail: as.pashchenko@gmail.com; 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41; тел.: 88635255459; старший научный сотрудник лаборатории кристаллов и структур для твердотельной электроники ЮНЦ РАН.

**Blokhin Eduard Evgenyevich** – Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI); e-mail: holele@mail.ru; 346428, Novocherkassk, Prosveshcheniya st., 132; phone: +79185678145; base chair Southern Scientific Center RAS «Nanotechnology in electronics»; graduate student; assistant.

**Pashchenko Alexander Sergeevich** – Southern Scientific Center RAS; e-mail: as.pashchenko@gmail.com; 344006, Rostov-on-Don, pr. Chekhov, 41; phone: +78635255459; senior researcher, laboratory of crystals and structures for solid-state electronics, Southern Scientific Center RAS; cand. of phys. and math. sc.

УДК 004.932.2

**Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.А. Баранцев, А.Б. Фельдман**

### **ТЕХНОЛОГИЯ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ\***

*Рассматривается решение задачи обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов с помощью системы технического зрения. Источником изображений является один видеодатчик, установленный на борту летательного аппарата. Повышение безопасности полетов понимается как снижение ситуационной неопределенности вокруг летательного аппарата. В научно-техническом плане решение данной проблемы заключается в разработке технических средств мониторинга окружающей обстановки. Технология анализа позволяет в автоматическом режиме обнаруживать опасные ситуации. Для летательных аппаратов опасным считается сближение с другими воздушными средствами и птицами, с поверхностью земли, с высотными строениями и линиями электропередач. Для повышения безопасности полетов с помощью эффективного применения других авиационных систем описываемая технология осуществляет распознавание воздушных и наземных объектов и визуальных ориентиров. По результатам анализа информации об окружающей обстановке вокруг летательного аппарата принимается решение о наличии опасности столкновения, выбирается наиболее опасная ситуация и прогнозируется время до столкновения. Бортовая система технического зрения может предупредить экипаж о возникновении опасности столкновения, подсказать местоположение важных ориентиров: взлетно-посадочной полосы, диспетчерских вышек, линий электропередач или полностью контролировать окружающую обстановку и движение воздушного средства, например, для движения по оптимальной траектории полета. Обнаружение и распознавание наземных объектов и визуальных ориентиров основано на сопоставлении данных видеосъемки, выпол-*

\* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, идентификатор проекта RFMEFI57414X0056 (соглашение от 27 июня 2014 г. №14.574.21.0056).