

УДК 537.9

DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-11-17

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР InAs/GaAs С ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ БАРЬЕРАМИ AlGaAs

© 2017 г. Э.Е. Блохин^{1,2}, А.С. Пашенко¹, Л.С. Лунин¹,
С.Н. Чеботарев^{1,2}, Д.Л. Алфимова¹

Аннотация. Проведены исследования фотолюминесценции и темновых вольт-амперных характеристик гетероструктур InAs/GaAs с тремя типами потенциальных барьеров для квантовых точек: GaAs, Al_{0,2}Ga_{0,8}As, Al_{0,4}Ga_{0,6}As. Гетероструктуры выращены методом ионно-лучевой кристаллизации. Наличие пиков излучения фотолюминесценции, обусловленных смачивающим слоем для трех типов потенциальных барьеров, свидетельствует о росте квантовых точек InAs в режиме Странского – Крастанова. Введение в конструкцию широкозонных барьеров AlGaAs приводит к смещению пика излучения фотолюминесценции основных состояний GS в квантовых точках InAs в высокоэнергетическую область (синее смещение) и увеличивает интенсивность пика. В случае использования барьеров Al_xGa_{1-x}As характерным признаком является уменьшение ширины пика излучения на половине максимума излучения в сравнении с потенциальными барьерами GaAs. Изменение состава тройного твердого раствора Al_xGa_{1-x}As с $x = 0,2$ до $x = 0,4$ ат. %, покрывающего сверху квантовые точки InAs, приводит к повышению интенсивности пика излучения основных состояний квантовых точек. Результаты исследования темновых вольт-амперных характеристик экспериментальных образцов показывают, что доминирующими механизмами переноса носителей заряда являются термоэлектронная эмиссия и туннелирование, стимулированное внешним электрическим полем. Использование широкозонных потенциальных барьеров AlGaAs вместо GaAs способствует уменьшению напряжения смещения (до 0,48 В), при котором происходит изменение механизма переноса носителей заряда с термоэмиссионного на туннелирование, стимулированное внешним электрическим полем. Введение потенциального барьера состава Al_{0,4}Ga_{0,6}As позволяет добиться минимального темнового тока 10^{-9} А в гетероструктурах InAs/GaAs с квантовыми точками.

Ключевые слова: гетероструктуры InAs/GaAs, ИК-диапазон, барьер AlGaAs, оптоэлектроника, тройные твердые растворы на основе АПБВ.

THE STUDY OF InAs/GaAs HETEROSTRUCTURES WITH POTENTIAL BARRIERS AlGaAs

E.E. Blokhin^{1, 2}, A.S. Pashchenko¹, L.S. Lunin¹, S.N. Chebotarev^{1, 2}, D.L. Alfimova¹

Abstract. Research has been conducted on the photoluminescence and the dark current-voltage characteristics of InAs/GaAs heterostructures with three types of potential barriers to the quantum dots: GaAs, Al_{0,2}Ga_{0,8}As, Al_{0,4}Ga_{0,6}As. Heterostructures were grown with an ion-beam crystallization method. The presence of the photoluminescence emission peaks specified by the wetting layer for the three types of potential barriers shows the Stransky Krastanow growth mode of InAs quantum dots. The introduction of wide-AlGaAs barriers into the design leads to the shift of the photoluminescence emission peak of the ground states (GS) in the InAs quantum dots into the high-energy region (blue shift) and increases the peak intensity. In case of Al_xGa_{1-x}As barrier usage the characteristic feature is the reduction of the emission peak width at half maximum of the emission, in comparison with the potential barriers of GaAs. It is shown that the change in the composition of the ternary solid solution Al_xGa_{1-x}As from $x = 0.2$ to $x = 0.4$ at. % which coats the InAs quantum dots from

¹ Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: holele@mail.ru

² Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова (Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation), Российская Федерация, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

above increases the emission peak intensity of the quantum dots ground states. The results of the dark current-voltage characteristics study of the experimental samples show that the dominant mechanisms of charge carrier transport are thermionic emission and tunneling stimulated by an external electric field. It was revealed that the use of wide potential barriers AlGaAs instead of GaAs reduces the bias voltage (up to 0.48 V), at which a change of charge transport mechanism from thermionic to tunneling one stimulated by an external electric field takes place. It was found that the Al_{0,4}Ga_{0,6}As potential barrier introduction allows to achieve the minimal dark current 10⁻⁹ A in InAs/GaAs heterostructures with quantum dots.

Keywords: InAs/GaAs heterostructures, infrared range, AlGaAs potential barrier, optoelectronics, solid solutions based on A^{III}B^V.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой интерес к гетероструктурам на основе материалов A³B⁵ обусловлен перспективой разработки высокоэффективных фоточувствительных оптоэлектронных устройств. Этот шаг оправдан по ряду причин: во-первых, данные материалы позволяют добиться более эффективных результатов по сравнению с фотодетекторами на основе кремния и германия. Во-вторых, благодаря большому разбросу вариантов компоновки данных материалов появляется возможность исследовать 3- и 4-компонентные структуры с совершенно другими свойствами. Создание гетероструктур InAs/GaAs с квантовыми точками позволяет создавать фоточувствительные устройства нового поколения, особенно в ИК-диапазоне спектра. Значительной проблемой существующих детекторов ИК-излучения (HgCdTe, II-type superlattices, GaSb) является необходимость их охлаждения для увеличения обнаружительной способности. Одним из способов решения этой проблемы является выращивание полупроводниковых гетероструктур, в объем которых внедрены квантовые точки. Примером таких гетероструктур могут выступать InAs/GaAs [1–3], Ge/Si [4] и другие [5–12]. Локализация фотогенерированных носителей заряда в квантовой точке по трем направлениям способствует уменьшению термоэлектронной эмиссии и приводит к снижению темнового тока [13; 14]. Традиционными методами выращивания гетероструктур A^{III}B^V являются газофазная эпитаксия металлорганических соединений (MOVPE) [15–17] и молекулярно-лучевая эпитаксия (МВЕ) [18; 19]. При всех несомненных преимуществах указанных методов им присущи и недостатки. В методе MOVPE в ходе химических реакций вблизи поверхности подложки могут образовываться сложные радикалы от неполного термического разложения. Отсутствует возможность управления энергией адатомов. Химические

реакции являются инертными процессами. Главным недостатком МВЕ является высокая стоимость оборудования. В данной работе для выращивания гетероструктур InAs/GaAs был использован один из способов физического распыления материалов – ионно-лучевая кристаллизация (ИЛК). Предложенный вариант осаждения полупроводников имеет существенные преимущества перед многими методами роста из газовой фазы, так как позволяет управлять энергией распыляемых атомарных потоков и их взаимодействием с поверхностью роста [20]. Методы ионного распыления материалов играют существенную роль в технологии полупроводниковых материалов [21]. Известно их применение для проведения селективного травления образцов [22], ионной очистки подложек [23], осаждения изолирующих и пассивирующих покрытий [24], а также напыления металлических контактов [25]. Метод ИЛК используется для выращивания тонких пленок соединений групп III–V [26; 27] и II–VI [28; 29] периодической таблицы химических элементов. Ранее мы сообщали о выращивании методом IBD слоев Si [30; 31], а также гетероструктур в системах InAs/GaAs [32–35] и Ge/Si [36; 37].

Цель данной работы заключается в исследовании влияния потенциальных энергетических барьеров AlGaAs на функциональные характеристики гетероструктур InAs/GaAs.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выращивание гетероструктур с квантовыми точками проводили на экспериментальной установке ионно-лучевой кристаллизации состоящей из вакуумной камеры, источника ионов, держателя подложки, держателя мишени и системы откачки вакуума. Эксперименты по осаждению выполнялись на полуизолирующие подложки арсенида галлия (GaAs) с кристаллографической ориентацией (100). Калибровочные зависимости коэффициента распы-

ления InAs и GaAs от энергии пучка, угла наклона и плотности тока приведены в работах [34; 35].

В качестве источника ростового материала для выращивания потенциального барьерного слоя твердого раствора AlGaAs были использованы предварительно синтезированные поликристаллические мишени. Состав шихты рассчитывали из взвешенной навески компонентов в соответствии с необходимым составом твердой фазы получаемой мишени. Общую массу расплава рассчитывали в соответствии с объемом предполагаемого слитка поликристаллической мишени. Были получены два состава тройного твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$: $x = 0,2$ и $x = 0,4$ ат. %. В процессе выращивания давление в ростовой камере составляло $3,7 \cdot 10^{-7}$ Па. Первым выращивали буферный слой n^+ -GaAs при $T = 883$ К. Ускоряющее напряжение пучка составляло 450 В, при этом плотность тока $3,2 \cdot 10^{-4}$ А/см². Далее осаждали барьерный слой i -GaAs в аналогичных условиях. Затем выдерживали паузу в 15 с и снижали температуру до 808 К. Рост квантовых точек InAs происходил при ускоряющем напряжении ионов 250 В и плотности ионного тока $4,5 \cdot 10^{-6}$ А/см². Покрытие КТ верхним барьерным слоем AlGaAs сопровождалось повышением температуры до 823 К. Далее на нем выращивали фронтальный слой n^+ -GaAs. Выращивали три типа экспериментальных образцов: 1) с барьером GaAs; 2) с барьером $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$; 3) с потенциальным барьером $Al_{0,4}Ga_{0,6}As$.

Фотолюминесценцию (ФЛ) гетероструктур InAs/GaAs исследовали при температуре 90 К в

спектральном диапазоне 0,9–1,3 эВ. Оптическая схема измерения фотолюминесценции показана на рисунке 1.

Источником оптического излучения служил инжекционный лазер с длиной волны 402 нм и мощностью излучения 8,5 мВт. Регистрацию фотолюминесцентного сигнала осуществляли с помощью монохроматора МДР-23 и фотоприемного устройства с германиевым фотодиодом ФДГ-3600. Влияние возбуждающего лазерного излучения на спектры фотолюминесценции гетероструктур устраняли с помощью оптического фильтра ЖС-12. Измерение темновых вольтамперных характеристик экспериментальных образцов проводили с помощью измерителя имитанса Е7-20 и приставки УП-1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим фотолюминесцентные свойства выращенных гетероструктур. В процессе возбуждения фотолюминесценции в образце устанавливается некоторый стационарный режим, в котором скорость излучения и рекомбинации приходят в равновесие и зависят от времени жизни фотогенерированного носителя заряда на энергетическом уровне в квантовой точке или образованном смачивающим слоем GaAs. Вследствие этого источником ФЛ в выращенных образцах могут быть основные (GS) состояния в квантовых точках, а также смачивающие слои (WL). На рисунке 2 приведены спектры фотолюминесценции, полученные для трех типов экспериментальных образцов с различными барьерными слоями: GaAs, $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$, $Al_{0,4}Ga_{0,6}As$. Наличие пиков WL (обусловленных смачивающим слоем) в спектрах свидетельствует о росте квантовых точек InAs в режиме Странского – Крастанова [38]. Измеренный спектр фотолюминесценции образца с барьерным слоем GaAs характеризуется наличием пика основных переходов в КТ (GS), соответствующего 1,15 эВ. Большая ширина пика излучения основных состояний обусловлена дисперсией размеров квантовых точек InAs. Широкий спектр излучения характерен для массива квантовых точек. В нем неизбежно существует разброс геометрических размеров КТ и механические напряжения, которые увеличивают фоновую составляющую при возбуждении фотолюминесценции.

По причине близкого расположения квантовых точек друг к другу (поверхностная плотность может колебаться в интервале 10^{10} – 10^{12} см⁻²) в массиве

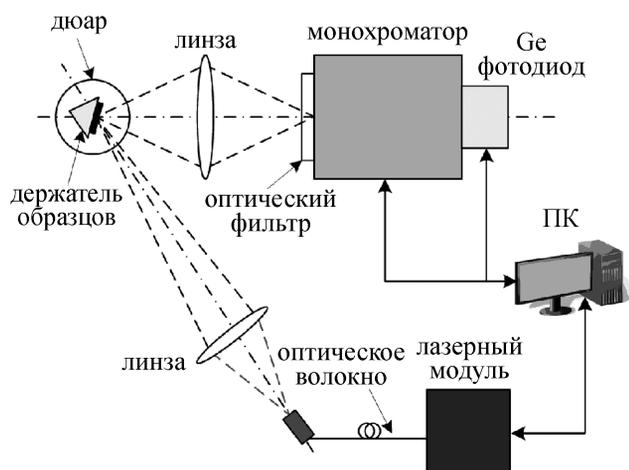


Рис. 1. Оптическая схема измерения фотолюминесценции экспериментальных образцов

Fig. 1. Optical measuring circuit of photoluminescence of experimental samples

возникает перекрытие волновых функций электронов на дискретных уровнях, вследствие чего создается энергетическая подзона в квантовой яме. Ее положение определяет спектр излучения и поглощения. Чем меньше разброс размеров КТ и влияние механических напряжений, тем будет меньше ширина энергетической подзоны и, соответственно, спектра ФЛ. При толщине барьерного слоя 10 нм все квантовые точки InAs находятся в электростатическом поле барьера GaAs, которое обеспечивает эмиссию возбужденных электронов с уровней КТ в объемную матрицу i-GaAs гетероструктуры по двум основным механизмам: надбарьерная тепловая эмиссия и туннелирование. При этом величина потенциального барьера для электронов составляет $\approx 0,52$ эВ. Второй, менее интенсивный пик излучения WL смещен в синюю область спектра – 1,26 эВ. Данный пик характеризует излучательные переходы в смачивающем слое.

Наличие в конструкции наногетероструктуры барьерных слоев, ограничивающих квантовые точки InAs, имеет несколько функциональных назначений. Одним из них является создание потенциального барьера для локализации носителей заряда в квантовой яме, образованной квантово-размерным островком. Другое назначение барьерных слоев носит технологический характер. Их введение в конструкцию наногетероструктуры должно снимать возникшие упругие деформации и механические

напряжения на поверхности. При характерном расхождении параметров кристаллической решетки в гетеросистемах АПВВ более 6 % в процессе самоорганизации велика вероятность релаксации гетерограницы путем генерации дислокаций несоответствия. Релаксация гетероинтерфейса может произойти при увеличении толщины покрывающего барьерного слоя.

Рассмотрим спектры фотолюминесценции образцов с потенциальными барьерами AlGaAs. Данный тройной твердый раствор является широкозонным полупроводниковым материалом, в котором ширина запрещенной зоны зависит от состава в пределах 1,4–2,1 эВ. В ранних работах [39; 40] по получению структур с квантовыми точками говорилось об улучшении функциональных характеристик при использовании в качестве потенциального барьера широкозонного материала. Нами был использован состав $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ с шириной запрещенной зоны 1,71 эВ. Как видно из рисунка 2, пик основных состояний (GS) в КТ с барьером $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ по отношению к GaAs смещен в область высоких энергий на ≈ 39 мэВ. При этом следует отметить, что смещение пика WL смачивающего слоя не наблюдается, так как квантовые точки InAs покрывались только сверху. Вероятно, применение широкозонного барьера изменяет распределение сил упругой деформации в слое квантовых точек, что приводит к смещению пика GS в область высоких энергий. Спектр фотолюминесценции образца с потенциальным барьером $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ отличается высокой интенсивностью пика GS и, соответственно, смачивающего слоя, что обусловлено большей степенью локализации фотогенерированных носителей заряда в квантовой яме, образованной квантовой точкой InAs. Величина потенциального энергетического барьера $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ для x , равного 0,2 и 0,4 ат. %, для электронов составляет соответственно 0,65 и 0,77 эВ.

Очевидно, что введение в конструкцию гетероструктуры InAs/GaAs барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ будет оказывать влияние на транспорт носителей заряда в квантовых точках, однако фотолюминесценция может дать лишь информацию о положении энергетических уровней в них. Для исследования транспорта носителей заряда были исследованы темновые вольт-амперные характеристики экспериментальных образцов. Определение механизмов транспорта носителей заряда из квантовых точек InAs, покрытых разными барьерными слоями, проводили измерением темнового тока при температуре 90 К. Результаты измерений приведены на рисунке 3.

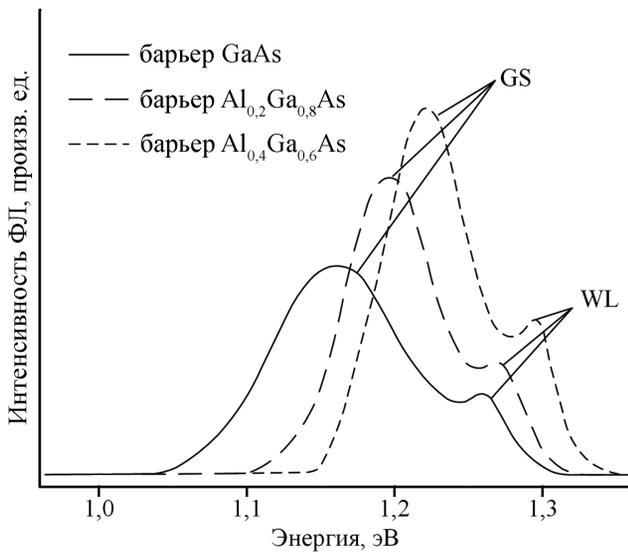


Рис. 2. Измеренные спектры фотолюминесценции экспериментальных образцов с различными потенциальными барьерами

Fig. 2. The measured photoluminescence spectra of the experimental samples with different potential barriers

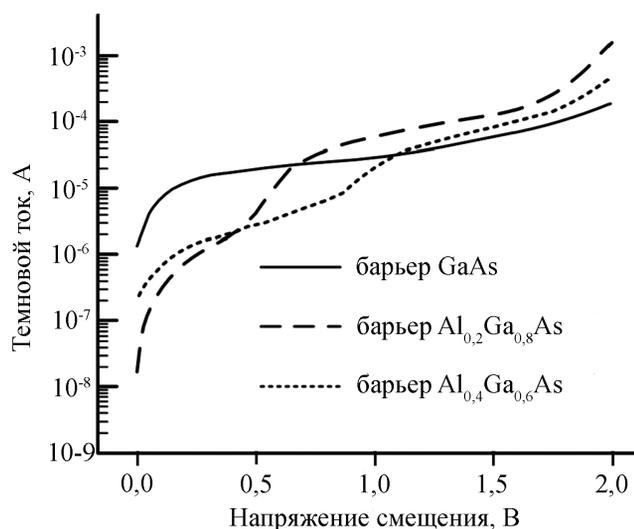


Рис. 3. Измеренные темновые вольт-амперные характеристики наногетероструктур InAs/GaAs с различными потенциальными барьерами

Fig. 3. The measured dark current-voltage characteristics of the nanoheterostructures InAs/GaAs with different potential barriers

Видно, что на кривых вольт-амперных характеристик можно выделить два участка: 1) 0,0–0,5 В; 2) 0,5–2 В. Мы считаем, что на участке 1 основным механизмом переноса носителей заряда из квантовой точки в область континуума зоны проводимости гетероструктуры является термоэлектронная эмиссия из квантовой ямы, образованной КТ InAs. Для всех типов барьерных слоев на этом участке отмечен выход термоэмиссионного тока в насыщение. Участок 2 характеризуется неравнозначным изменением тока с увеличением напряжения смещения. Изменение механизма переноса с термоэмиссионного на резонансное туннелирование, вызванное внешним электрическим полем, происходит при напряжении более 1,5 В и обусловлено смещением зонной энергетической диаграммы в направлении поля. Подобное поведение характерно только для образцов с потенциальными барьерами $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Одновременно с этим ширина потенциального барьера уменьшается, в силу чего вероятность туннелирования носителя через барьерный слой AlGaAs существенно возрастает. Основным механизмом транспорта носителей из КТ InAs становится туннельный ток, стимулированный внешним электрическим полем. Как видно из рисунка 3, при состав-

ве твердого раствора $x = 0,4$ ат. % барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ приводит к уменьшению напряжения, при котором происходит изменение механизма переноса носителей заряда до 0,48 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования гетероструктур InAs/GaAs с квантовыми точками, покрытыми сверху различными потенциальными барьерами, показали, что введение в конструкцию широкозонных барьеров AlGaAs приводит к смещению пика излучения фотолюминесценции основных состояний в квантовых точках InAs в высокоэнергетическую область (синее смещение) и увеличивает интенсивность пика. Этот эффект обусловлен повышением степени локализации носителей заряда в квантовой яме за счет увеличения потенциального барьера, образованного широкозонным барьером $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Показано, что изменение состава тройного твердого раствора с $x = 0,2$ до $x = 0,4$ ат. % способствует повышению интенсивности пика излучения фотолюминесценции квантовых точек и уменьшению его ширины на половине максимума излучения. Результаты исследования темновых вольт-амперных характеристик экспериментальных образцов показывают, что использование широкозонных потенциальных барьеров AlGaAs вместо GaAs приводит к уменьшению напряжения, при котором происходит изменение механизма переноса носителей заряда с термоэмиссионного на туннелирование, стимулированное внешним электрическим полем. Установлено, что при использовании потенциального барьера состава $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ позволяет добиться минимального темнового тока 10^{-9} А в гетероструктурах InAs/GaAs с квантовыми точками. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных фотодетекторов ближнего ИК-диапазона.

Работа выполнена в рамках государственного задания Южного научного центра РАН (№ 007-01114-16 ПР, проект № 0256-2014-0001), а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 16-38-60127 мол_а_дк и гранта Президента Российской Федерации МК-5115.2016.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

- Hirakawa K., Lee S.-W., Lelong P., Fujimoto S., Hirofani K., Sakaki H. 2002. High-sensitivity modulation-doped quantum dot infrared photodetectors. *Journal Microelectronic Engineering*. 63(1): 185–192. doi: 10.1016/S0167-9317(02)00606-8
- Brunkov P.N., Kovsh R., Ustinov V.M., Musikhin Y.G., Ledentsov N.N., Konnikov S.G., Polimeni A., Patanè A.,

- Main P.C., Eaves L., Kapteyn C.M. 1999. Emission of electrons from the ground and first excited states of self-organized InAs/GaAs quantum dot structures. *Journal of Electronic Materials*. 28(5): 486–490. doi: 10.1007/s11664-999-0099-6
3. Chakrabarti S., Stiff-Roberts D., Su X.H., Bhattacharya P., Ariyawansa G., Perera G.U. 2005. High-performance mid-infrared quantum dot infrared photodetectors. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 38(13): 2135–2141. doi: 10.1088/0022-3727/38/13/009
 4. Yakimov A.I., Dvurechenskii A.V., Proskuryakov Y.Y., Nikiforov A.I., Pchelyakov O.P., Teys S.A., Gutakovskii A.K. 1999. Normal-incidence infrared photoconductivity in Si p-i-n diode with embedded Ge self-assembled quantum dots. *Applied Physics Letters*. 75(10): 1413. doi: 10.1063/1.124710
 5. Kudo M., Mishima T., Iwamoto S., Nakaoka T., Arakawa Y. 2004. Long-wavelength luminescence from GaSb quantum dots grown on GaAs substrates. *Physica E Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 21(2): 275–278. doi: 10.1016/j.physe.2003.11.030
 6. Shuhui Z., Lu W., Zhenwu S., Yanxiang C., Haitao T., Huaiju G., Haiqiang J., Wenxin W., Hong C., Liancheng Z. 2012. The structural and optical properties of GaSb/InGaAs type-II quantum dots grown on InP (100) substrate. *Nanoscale Research Letters*. 7: 87. doi: 10.1186/1556-276X-7-87
 7. Böhrer J., Krost A., Bimberg D. 1994. Carrier dynamics in staggered-band lineup n-InAlAs/n-InP heterostructures. *Applied Physics Letters*. 64(15): 1992. doi: 10.1063/1.111716
 8. Hayne M., Provoost R., Zundel M.K., Manz Y.M., Eberl K., Moshchalkov V.V. 2000. Electron and hole confinement in stacked self-assembled InP quantum dots. *Physical Review B*. 62: 10324–10328. doi: 10.1103/PhysRevB.62.10324
 9. Sugisaki M., Ren H.-W., Nair S., Nishi K., Masumoto Y. 2002. External-field effects on the optical spectra of self-assembled InP quantum dots. *Physical Review B*. 66: 235309. doi: 10.1103/PhysRevB.66.235309
 10. Ribeiro E., Maltez R.L., Carvalho W., Ugarte D., Medeiros-Ribeiro G. 2002. Optical and structural properties of InAsP ternary self-assembled quantum dots embedded in GaAs. *Applied Physics Letters*. 81(16): 2953–2955. doi: 10.1063/1.1513215
 11. Liu G., Chuang S.-L., Park S.-H. 2000. Optical gain of strained GaAsSb/GaAs quantum-well lasers: A self-consistent approach. *Journal of Applied Physics*. 88(10): 5554. doi: 10.1063/1.1319328
 12. Liang B., Lin A., Pavarelli N., Reyner C., Tatebayashi J., Nunna K., He J., Ochalski T.J., Huyet G., Huffaker D.L. 2009. GaSb/GaAs type-II quantum dots grown by droplet epitaxy. *Nanotechnology*. 20(45): 455604. doi: 10.1088/0957-4484/20/45/455604
 13. Ryzhii V. 2001. Physical model and analysis of quantum dot infrared photodetectors with blocking layer. *Journal of Applied Physics*. 89(9): 5117. doi: 10.1063/1.1359759
 14. Phillips J. 2002. Evaluation of the fundamental properties of quantum dot infrared detectors. *Journal of Applied Physics*. 91(7): 4590–4594. doi: 10.1063/1.1455130
 15. Li S., Chen Q., Sun S., Li Y., Zhu Q., Li J., Wang X., Han J., Zhang J., Chen C., Fang Y. 2013. InAs/GaAs quantum dots with wide-range tunable densities by simply varying V/III ratio using metal-organic chemical vapor deposition. *Nanoscale Research Letters*. 8: 367. doi: 10.1186/1556-276X-8-367
 16. Hospodková A., Oswald J., Pangrác J., Kuldová K., Zíková M., Vyskočil J., Hulicius E. 2015. Growth and properties of the MOVPE GaAs/InAs/GaAsSb quantum dot structures. *Physica B Condensed Matters*. 480: 14–22. doi: 10.1016/j.physb.2015.09.002
 17. Yin Z., Tang X., Liu W., Deny S., Zhao J., Zhang D. 2007. Study of InAs/GaAs quantum dots grown by MOVPE under the safer growth conditions. *Journal of Nanoparticle Research*. 9(5): 877–884. doi: 10.1007/s11051-006-9161-y
 18. Sakaki H. 2003. Progress and prospects of advanced quantum nanostructures and roles of molecular beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth*. 251(1–4): 9–16. doi: 10.1016/S0022-0248(03)00831-5
 19. Zolotaryov A., Heyn C., Hansen W. 2008. MBE-growth of InAs/GaAs(001) quantum dots at low temperatures. *Journal of Crystal Growth*. 310(18): 4122–4125. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2008.07.013
 20. Greene J.E. 2006. Epitaxial crystal growth by sputter deposition: Applications to semiconductors. Part 2. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 11(3): 189–227. doi: 10.1080/01611598308244063
 21. Seshan K. 2012. *Handbook of Thin Film Deposition*. New York, William Andrew Publishing: 629 p.
 22. Reagor D.W., Butko V.Y. 2005. Highly conductive nanolayers on strontium titanate produced by preferential ion-beam etching. *Nature Materials*. 4: 593–596. doi: 10.1038/nmat1402
 23. Razek N., Schindler A., Rauschenbach B. 2007. Ultra-high vacuum direct bonding of a p-n junction GaAs wafer using low-energy hydrogen ion beam surface cleaning. *Vacuum*. 81(8): 974–978. doi: 10.1016/j.vacuum.2006.12.003
 24. Kim W.J., Koo W.H., Jo S.J., Kim C.S., Baik H.K., Lee J., Im S. 2005. Passivation effects on the stability of pentacene thin-film transistors with SnO₂ prepared by ion-beam-assisted deposition. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 23(6): 2357–2362. doi: 10.1116/1.2102969
 25. Ke J.J., Tsai K.T., Dai Y.A., He J.H. 2012. Contact transport of focused ion beam-deposited Pt to Si nanowires: From measurement to understanding. *Applied Physics Letters*. 100(5): 053702. doi: 10.1063/1.3680251
 26. Szczyrbowski J., Czaplá A., Jachimowski M. 1977. D.C. sputtering of thin indium arsenide films. *Thin Solid Films*. 42(2): 193–200. doi: 10.1016/0040-6090(77)90417-5
 27. Greene J.E., Barnett S.A., Cadien K.C., Ray M.A. 1982. Growth of single crystal GaAs and metastable (GaSb)_{1-x}Ge_x alloys by sputter deposition: Ion-surface interaction effects. *Journal of Crystal Growth*. 56(2): 389–401. doi: 10.1016/0022-0248(82)90458-4
 28. Takeuchi M., Sakagawa Y., Nagasaka H. 1976. Photoconduction and photovoltaic effects in sputtered CdS films. *Thin Solid Films*. 33(1): 89–98. doi: 10.1016/0040-6090(76)90590-3
 29. Zozime A., Cohen-Solal G., Bailly F. 1980. Growth of thin films of Cd_xHg_{1-x}Te solid solutions by cathodic sputtering in a mercury vapour plasma. *Thin Solid Films*. 70(1): 139–152. doi: 10.1016/0040-6090(80)90421-6
 30. Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Bolobanova L.N. 2012. Ion beam deposition of photoactive nanolayers for silicon solar cells. *Inorganic Materials*. 48(5): 439–444. doi: 10.1134/S0020168512050111

31. Pashchenko A.S., Chebotarev S.N., Lunin L.S., Irkha V.A. 2016. Specific features of doping with antimony during the ion-beam crystallization of silicon. *Semiconductors*. 50(4): 545–548. doi: 10.1134/S1063782616040199
32. Lunin L.S., Sysoev I.A., Alfimova D.L., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S. 2011. Photoluminescence of i-Ga_xIn_{1-x}As/n-GaAs heterostructures containing a random InAs quantum dot array. *Inorganic Materials*. 47(8): 816–818. doi: 10.1134/S0020168511080103
33. Pashchenko A.S., Chebotarev S.N., Lunin L.S. 2015. Carrier transport in multilayer InAs/GaAs quantum dot heterostructures grown by ion beam crystallization. *Inorganic Materials*. 51(3): 197–200. doi: 10.1134/S0020168515020144
34. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Williamson A., Lunin L.S., Irkha V.A., Gamidov V.A. 2015. Ion beam crystallization of InAs/GaAs(001) nanostructures. *Technical Physics Letters*. 41(7): 661–664. doi: 10.1134/S1063785015070056
35. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Irkha V.A., Lunina M.L. 2016. Morphology and optical investigations of InAs-QD/GaAs heterostructures obtained by ion-beam sputtering. *Journal of Nanotechnology*. 2016: 5340218. doi: 10.1155/2016/5340218
36. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Irkha V.A. 2013. Features in the formation of Ge/Si multilayer nanostructures under ion-beam-assisted crystallization. *Technical Physics Letters*. 39(8): 726–729. doi: 10.1134/S1063785013080178
37. Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S. 2013. Structure of Ge nanoclusters grown on Si(001) by ion beam crystallization. *Inorganic Materials*. 49(5): 435–438. doi: 10.1134/S0020168513050075
38. Trukhanov E.M., Teys S.A. 2016. Types of surface modulation in a Ge–Si(111) heterosystem. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 80(6): 641–644. doi: 10.3103/S106287381606037X
39. Lin S.Y. 2001. High-performance InAs/GaAs quantum dot infrared photodetectors with a single-sided Al_{0.3}Ga_{0.7}As blocking layer. *Applied Physics Letters*. 78(18): 2784–2786. doi: 10.1063/1.1365950
40. Chen Z.H., Baklenov O., Kim E.T., Mukhametzhano I., Tie J., Madhukar A., Ye Z., Campbell J.C. 2001. Normal incidence InAs/Al_xGa_{1-x}As quantum dot infrared photodetectors with undoped active region. *Journal of Applied Physics*. 89(8): 4558–4563. doi: 10.1063/1.1356430

Поступила 15.09.2016