НАУКА ЮГА РОССИИ 2018 Т. 14 № 1 С. 41–50 SCIENCE IN THE SOUTH OF RUSSIA 2018 VOL. 14 No 1 P. 41–50

ФИЗИКА

УДК 539.23 DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-1-41-50

ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ АРГОНА НА ПОВЕРХНОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ И АРСЕНИДА ИНДИЯ

© 2018 г. С.Н. Чеботарев^{1, 2}, М.Л. Лунина², Д.Л. Алфимова², Г.А. Еримеев¹, Л.М. Гончарова¹, Л. Туель¹, А.А.А. Мохамед¹

Аннотация. Разработана методика определения коэффициентов распыления двухкомпонентных полупроводников – арсенида галлия и арсенида индия – ионами аргона низких энергий. Предложено методом сканирующей лазерной конфокальной микроскопии измерять объем кратера, образовавшегося под действием бомбардировки поверхности мишени ионами инертного газа. Это в совокупности с экспериментальными данными о токе аргонового пучка и плотности материала позволило рассчитать коэффициент распыления У. С помощью данного метода определены энергетические, угловые и дифференциальные угловые коэффициенты распыления арсенида галлия и арсенида индия. Коэффициенты распыления исследуемых модельных материалов при увеличении угла падения повышаются, достигая некоторого максимального значения при определенном угле θ_{max} . При углах больше θ_{max} эффективность распыления снижается. Для арсенида галлия и арсенида индия максимумы находятся в узком интервале углов $\theta_{max} = 65-70^\circ$. Вблизи зеркального угла падения угловая зависимость коэффициентов распыления возрастает при увеличении угла падения. В диапазоне энергий от 100 до 300 эВ энергетическая зависимость для этих материалов практически линейна. Коэффициенты распыления при нормальной бомбардировке ионами аргона оптимальной энергии 150 эВ составляют Y(GaAs) = 0,41 и Y(InAs) = 0,73. Увеличение времени травления поверхности арсенида галлия и арсенида индия приводит к характерной трансформации рельефа поверхности. Вначале формируется аморфизированная поверхность, преобразующаяся в процессе травления в волнообразную структуру. Для получения равномерного по составу массопотока арсенида галлия необходимо проводить предварительное распыление в течение 3 минут; для образцов арсенида индия необходимо предварительное травление в течение 5 минут.

Ключевые слова: ионная бомбардировка, двухкомпонентные полупроводники, коэффициент распыления, конфокальная микроскопия.

EFFECTS OF IMPACT LOW-ENERGY ARGON IONS ON SINGLE-CRYSTAL SURFACE OF GALLIUM ARSENIDE AND INDIUM ARSENIDE

S.N. Chebotarev^{1, 2}, M.L. Lunina², D.L. Alfimova², G.A. Erimeev¹, L.M. Goncharova¹, L. Touel¹, A.A.A. Mohamed¹

Abstract. We proposed an experimental technique for determining the sputtering yields of two-component semiconductors – gallium arsenide and indium arsenide by low-energy argon ions. It was suggested to measure the volume of a crater formed by inert ions bombarding the target surface using the method of scanning laser confocal microscopy. Together with the experimental data on the current of the argon beam and the density of the material, it is possible to calculate the sputtering yields *Y*. This method was used to determine energetic, angular and differential angular sputtering yields of gallium arsenide and indium arsenide. It is shown that the sputtering yields of the investigated model materials rise with an increasing angle of incidence, reaching

¹ 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, e-mail: chebotarev.sergei@gmail.com

² 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

a maximum value at a certain angle θ_{max} . At angles greater than θ max, the sputtering efficiency is reduced. It was found that for gallium arsenide and indium arsenide, the maxima are in a narrow range of angles $\theta_{max} = 65-70^{\circ}$. Near the specular angle of incidence, the angular dependence of the sputtering yields increases with growing angle of incidence. It was demonstrated that in the energy range from 100 to 300 eV, the energy dependence of yields for these materials is nearly linear. It is established that the sputtering yields for normal bombardment by argon ions at optimum energy of 150 eV are equal to Y(GaAs) = 0.41 and Y(InAs) = 0.73. It is found that an increase in the etching time of the surface of gallium arsenide and indium arsenide leads to a characteristic transformation of the surface relief. At first, an amorphized surface is formed, which transforms into a wavy structure during etching. It is shown that in order to obtain a uniform mass flow of gallium arsenide, it is necessary to carry out preliminary sputtering for 3 minutes. For indium arsenide preliminary etching is necessary for 5 minutes.

Keywords: ion bombardment, binary semiconductors, sputtering yield, confocal microscopy.

ВВЕДЕНИЕ

Наноструктурированные материалы являются объектами пристального научного интереса [1–3]. Это обусловлено их значительным прикладным потенциалом при создании лазеров, оптических сенсоров, устройств фотоники, фотоэлектрических преобразователей на основе многослойных гетероструктур [4; 5]. Интенсивное развитие наноэлектроники повысило интерес к получению новых классов материалов. Особую актуальность приобретают исследования, направленные на изучение механизмов кристаллизации тонких пленок и низкоразмерных гетеросистем.

Общепризнанными и хорошо исследованными технологическими методами получения таких наногетеструктур являются молекулярно-лучевая и газофазная эпитаксии [6; 7]. Помимо указанных методов для выращивания наноматериалов активно адаптируются классические ростовые методы: жидкофазная эпитаксия [8], зонная сублимацион-



Рис. 1. Энергетические зависимости коэффициентов распыления GaAs и InAs.

Fig. 1. Energy dependences of the sputtering yields of GaAs and InAs.

ная перекристаллизация [9–11], распыление лазерными [12], электронными [13] и ионными пучками [14]. В недавних наших работах представлены первоначальные результаты получения методом ионно-лучевой кристаллизации квантово-размерных гетероструктур Ge/Si [15; 16] и InAs/GaAs [17– 19].

Ростовой массопоток в методе ионно-лучевой кристаллизации формируется распылением поверхности мишени ускоренными ионами инертного газа [20]. Многочисленные эксперименты указывают на предпочтительное использование ионных пучков по сравнению с атомарными потоками [21]. Ионные пучки легче создать, и удобнее управлять их геометрическими и энергетическими характеристиками. Кроме того, применение ионных пучков инертных газов позволяет предотвращать химическое взаимодействие бомбардирующих частиц с мишенью.

Цель представленной работы состоит в изучении эффектов воздействия ионов аргона с энергиями от 100 до 500 эВ на поверхность двухкомпонентных кристаллических полупроводников InAs и GaAs.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Получение образцов проводили в лабораторной установке ИВ-За, оснащенной вакуумной камерой из нержавеющей стали, форвакумным насосом Varian DS 302, турбомолекулярным насосом на магнитном подвесе Leybold Turbovac 340, источником ионов KDC 40 и крио-ловушкой, охлаждаемой жидким азотом. Для измерения вакуума применяли манометр Ionivac ITR 90, работающий по принципу Баярда. Максимальная глубина вакуума после шестичасовой работы вакуумной системы

составляла 5 · 10⁻⁷ Па. Преимущество выбранного ионного источника заключается в возможности относительно независимого регулирования энергии и плотности ионного потока. Управление ионным источником осуществлялось KRI KSC-контроллером. Измерение величины ионного тока проводилось коллектором Фарадея с входным отверстием диаметром 1 мм, закрепленном на держателе мишени. Объектами исследования служили двухдюймовые пластины GaAs и InAs с кристаллографической ориентацией (001).

Скорость ионно-лучевого распыления определяется массопотоком распыленного материала, который характеризуется коэффициентом распыления. Для создания сверхмалых скоростей роста на подложке (доли монослоя в секунду) необходимо обеспечить условия реализации минимальных коэффициентов распыления. Для нахождения коэффициентов распыления обычно используют прецизионное взвешивание, измерение высоты ступеньки маскированного слоя на подложке, а также разновидности этих методов. Нами предложено измерять объем образовавшегося на мишени кратера, что в совокупности с данными о токе аргонового пучка и плотности материала позволяет рассчитать коэффициент распыления У по формуле:

$$Y = \frac{eN_A\rho}{MIt}V,$$

где е – заряд электрона, $N_{\!_A}$ – число Авогадро, ρ – плотность материла, M – молярная масса, *I* – сила тока ионного пучка, *t* – время распыления, *V* – объем образовавшегося кратера.

Оптическая и электронная микроскопия не могут быть использованы для измерения объема V. Атомно-силовая микроскопия не позволят измерять объекты с размерами более 50 × 50 мкм. Идеальным вариантом решения этой задачи является лазерная сканирующая конфокальная микроскопия. Встроенное программное обеспечение используемого нами лазерного сканирующего микроскопа Keyence VK-9700 автоматически рассчитывает объем кратера, что позволяет найти коэффициент распыления исследуемых полупроводников.

В экспериментах ток пучка составлял 120 мкА. диаметр пучка – 1,2 см. Время воздействия ионным пучком на мишень выбиралось равным 3 минутам. Это позволило снизить влияние формирования рельефа на процесс распыления. Использование сверхмалых плотностей тока обусловлено необ-

НАУКА ЮГА РОССИИ 2018 Том 14 **№** 1 ходимостью достижения минимальных скоростей распыления в доли монослоя в секунду. Ускоряющее напряжение, определяющее энергию ионов, варьировалось в диапазоне от 100 до 500 В. Энергия ионов в 100 эВ близка к пороговым значениям распыления. Использование меньших энергий приводит к невоспроизводимому и слабо управляемому процессу распыления. Для получения наноструктур разрабатываемым технологическим способом использование ионов с энергией больше 500 эВ не требуется из-за высоких коэффициентов распыления. Эксперименты при заданном ускоряющем напряжении повторяли трижды для получения статистически подтвержденных результатов. Энергетическую зависимость коэффициентов распыления измеряли с шагом 50 эВ.

Для оценки пространственной равномерности массопотока, определяющей однородность толщины слоя на подложке, необходимо знать дифференциальные угловые коэффициенты распыления Y₀. Этот параметр показывает количество атомов N_{ar}, распыленных одним ионом внутрь элементарного телесного угла $d\Omega$:

$$Y_{\Omega} = \frac{N_{\rm at}}{N_{\rm HOH} d\Omega}.$$

Экспериментально из ионного пучка диафрагмой диаметром 1 мм вырезали узкий пучок. Мишень устанавливали под различными углами. Вокруг мишени на расстоянии 5 см закрепляли 10 подложек диаметром 5 мм. Угловой шаг между мини-подложками составлял 20°. Их располагали так, чтобы они не экранировали первичный ионный пучок. Подложки выкалывали из пластин

2.0

• GaAs



Е_{Аг+}=150 эВ

Рис. 2. Угловые зависимости коэффициентов распыления GaAs и InAs.

Fig. 2. Angular dependences of the sputtering yields of GaAs and InAs.

модельных материалов для создания условий гомоэпитаксиального роста. Исследование дифференциального коэффициента распыления проводили в плоскости падения пучка.

Изменение состава приповерхностной области двухкомпонентных мишеней проводили в режиме *in situ* методом электронной оже-спектроскопии на



Рис. 3. Дифференциальные угловые коэффициенты распыления GaAs. **Fig. 3.** Differential angular sputtering yields of GaAs.

установке JEOL JAMP 9500F. Травление поверхности осуществляли ионным аргоновым пучком энергией 500 эВ. Угол наклона пучка по отношению к вектору нормали мишени составлял 30°. По данным оже-спектроскопии определялась мольная доля произвольного *i*-ого химического элемента в приповерхностном слое [22].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты исследования энергетической зависимости коэффициентов распыления выбранных модельных материалов приведены на рисунке 1. Экспериментальные данные в диапазоне 200–400 эВ не выявили крутого перегиба кривой, как это наблюдалось в работе [23]. Вероятно, в данных Дж. Комаса и К.Б. Купера присутствовала некоторая метрологическая погрешность, обусловленная либо скачком тока плазменного разряда, либо использованием не совсем хорошо препарированных подложек.

Выполненные эксперименты позволили найти коэффициенты распыления модельных полупроводниковых материалов (GaAs, InAs) для нормально падающего ионного пучка низких энергий $E_{\rm Ar+} = 100-500$ эВ. Особый интерес представляют результаты в диапазоне энергий от 100 до 200 эВ. Для выбранных материалов коэффициент распыления меньше единицы. Эффективность распыления невысока, что позволяет получить при малых плотностях ионного тока низкую скорость распыления.

Представленные ниже результаты исследования угловой зависимости получены для энергий 150 эВ. Выбор такой энергии обусловлен технологическими ограничениями ионной пушки: 100 эВ – нижняя граница формирования пучка. Большие энергии неинтересны по причине значительной интенсивности распыления. Угол падения пучка менялся от нормального ($\theta = 0^{\circ}$) до слабо скользящего ($\theta = 75^{\circ}$). Область интереса – углы падения в диапазоне от 30 до 60°. Шаг поворота мишени составлял 15°. При исследовании на лазерном конфокальном микроскопе наблюдалось изменение формы образующегося кратера. Круглый в поперечном сечении кратер при увеличении угла падения пучка приобретал ярко выраженную эллипсоидальную форму. Полученные результаты по угловым коэффициентам представлены в обобщенном виде на рисунке 2. Кривые

не приводили к нормализированному виду из-за неудобства использования таких обработанных данных в последующих экспериментах. Построенные графики отражают непосредственно измеренные коэффициенты распыления при различных углах падения ионного пучка.

зависимость Энергетическая коэффициента распыления позволяет судить об эффективности процесса формирования массопотока при ионно-лучевом распылении. Угловая зависимость коэффициента распыления определяет интегральную эффективность процесса при различных углах падения пучка. Установлено, что коэффициенты распыления исследуемых модельных материалов при увеличении угла падения повышаются. Достигая некоторого максимального значения при определенном угле θ_{max} , эффективность распыления снижается. Для арсенида галлия и арсенида индия максимумы находятся интервале 65-70°. Вблизи зеркального угла падения ($\theta = 45^{\circ}$) угловая зависимость коэффициентов распыления линейно возрастает при увеличении угла падения. Важно отметить, что такой плавный характер изменения эффективности распыления повышает управляемость процесса ионно-лучевого распыления.

Результаты измерений дифференциальных угловых коэффициентов распыления GaAs приведены в полярных координатах на рисунке 3, для InAs – на рисунке 4. Исследования выполнены для углов 0, 30, 45°. Для каждого угла использовали три различных энергии ионов – 100, 150 и 200 эВ. Относительно дифференциальных угловых коэффициентов распыления двухкомпонентных модельных материалов – арсенида галлия и арсенида индия – можно сделать следующие выводы. Распределение достаточно узкое и локализовано вблизи направления падения ионного пучка. Увеличение энергии ионов приводит к росту дифференциального коэффициента распыления для всех углов падения пучка. Угловая зависимость ближе к зеркальному закону, что отличает эти материалы от однокомпонентных - кремния и германия. Впрочем, зеркальный закон также не полностью выполняется.

Управление ростовым процессом предполагает возможность контролируемого изменения технологических параметров и временную стабильность их поддержания. Важнейшими технологическими параметрами ионно-лучевой кристаллизации являются температура подложки и скорость осаждения квазислоя из распыленного массопотока. Перечис-

ых углах Предметом этой части исследований являлось исследование влияния ионной бомбардировки на эволюцию морфологии поверхности. Распыление пропость контеграль- $\beta = 0^{\circ}$

ленные параметры достаточно просто контролиру-

ются и не зависят от времени. Однако процесс рас-

пыления может меняться при эрозии поверхности

мишени, вызванной воздействием ионного пучка.



Рис. 4. Дифференциальные угловые коэффициенты распыления InAs.

Fig. 4. Differential angular sputtering yields of InAs.

НАУКА ЮГА РОССИИ 2018 Том 14 № 1

водилось при постоянном токе 120 мкА и энергии ионов 150 эВ. Диаметр пучка равнялся 3,8 см. Угол падения пучка – 60°. Средняя скорость травления в указанном режиме составила для арсенида галлия 4,7 МС/мин, для арсенида индия – 8,9 МС/мин. Исследование особенностей ионного травления мо-



Рис. 5. Изменение рельефа поверхности при различном времени травления аргоновым пучком.

Fig. 5. Change in surface relief during etching by argon beam with variable times.

дельных полупроводниковых материалов показало сходный характер изменения рельефа поверхности.

Типичный пример эволюции поверхности при различном времени травления поверхности GaAs(001) иллюстрируется рисунком 5. Увеличение времени травления поверхности приводит к характерной трансформации рельефа поверхности. Вначале формируется аморфизированная поверхность, преобразующаяся в процессе травления в волнообразную структуру. Наблюдается упорядочивание волн перпендикулярно направлению падения ионного пучка. Дальнейшее увеличение времени травления не приводит к значительному изменению рельефа. Происходит стравливание гребней и впадин, что при низких скоростях процесса приводит к постепенному уменьшению толщины мишени. Отметим, что используемые в методе ионно-лучевого распыления низкие скорости и небольшое время выращивания слоев приводят к незначительному износу мишени и, следовательно, позволяют достичь хорошей управляемости процессом.

Задача создания ростового массопотока из двухкомпонентных мишеней распылением ионным пучком наталкивается на необходимость изучения стехиометрии состава распыленного вещества. Экспериментальные исследования, проведенные на металлических сплавах Cu – Ni [24] и Au – Cu [25], подтверждают гипотезу о преимущественном распылении одного из компонентов. Дж.Е. Мак-Гир отметил факт нестехиометрического распыления арсенида галлия, но детальных исследований не выполнил [26]. Изучение начальной фазы распыления арсенида индия, насколько нам известно, ранее не проводилось.

Измеренные оже-спектры мишеней GaAs(001) и InAs(001) показаны на рисунке 6. В диапазоне 0–1500 эВ идентифицируются спектральные линии: 107, 158, 1115, 1142 и 1298 эВ, соответствующие оже-переходам в атомах галлия, 140, 146, 203, 1323, 1359 эВ – оже-переходам в атомах мышьяка, 121, 443, 450, 664, 708, 826 эВ – оже-переходам в атомах индия. Оценку мольных долей проводили по пикам, имеющим максимальную интенсивность: галлий – I(1115), мышьяк – I(1323) и индий – I(826). Используя описанную методику, регистрировали оже-спектры распыленных мишеней при разном времени травления.

Полученные результаты проиллюстрированы на рисунке 7. Видно, что распыление мишени GaAs(001) происходит вначале нестехиометрично. На ранних стадиях поверхность обогащена галлием. Наблюдается преимущественное распыление мышьяка. После одной минуты травления мишень имеет состав Ga_{0,6}As_{0,4}. Увеличение времени распыления приводит к постепенному выравниванию состава. Необходимо около 5 минут для достижения стехиометрического состава мишени GaAs(001).

Травление мишени InAs(001) в течении 1 минуты приводит к значительному обогащению приповерхностного слоя мышьяком. Состав мишени на ранних этапах распыления сильно изменен – $In_{0,8}As_{0,2}$. Поверхность обогащена индием. Травление примерно в течении 3 минут приводит к выравниванию состава приповерхностного слоя. Отметим, что наблюдаемые эффекты, по-видимому, связаны с лучшей передачей импульса атома аргона сходному по массе атому мышьяка. Выравнивание концентрации, предположительно, объясняется наблюдаемой аморфизацией поверхности, что приводит к среднестатистическому равенству скоростей распыления компонентов мишеней.

Проведенные исследования распыления двухкомпонентных мишеней указывают на первоначальную сильную астехиометрию распыления двухкомпонентных мишеней. Травление в течение некоторого промежутка времени приводит к выравниванию концентраций распыляемых компонент, что проявляется в стехиометрическом распылении мишеней GaAs и InAs. Для получения равномерного по составу массопотока, создаваемого аргоновым ионным распылением таких мишеней, необходимо проводить предварительное распыление мишеней при экранированных подложках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы эффекты низкоэнергетического распыления арсенида галлия и арсенида индия. Установлено, что в процессе травления формируется аморфизированная поверхность, переходящая в стабильную во времени волнообразную структуру, упорядоченную перпендикулярно направлению падения ионного пучка. Показано, что для получения равномерного по составу массопотока GaAs необходимо проводить предварительное распыление в течение 3 минут, для InAs в течение 5 минут при экранированных подложках. Продемонстрировано, что в диапазоне энергий от 100 до 300 эВ энергетическая зависимость для этих материалов практически линейна. Установлено, что коэффициенты распыления при нормальной бомбардировке ионами аргона оптимальной энергии 150 эВ составляют

НАУКА ЮГА РОССИИ 2018 Том 14 № 1



Рис. 6. Оже-спектры GaAs и InAs. **Fig. 6.** Auger spectra of GaAs and InAs.

Y(GaAs) = 0,41 и *Y*(InAs) = 0,73. Дифференциальные угловые коэффициенты GaAs и InAs более локализованы вблизи направления падения ионного пучка, что отличает эти материалы от однокомпонентных – кремния и германия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту № 17-08-01206-а.



Рис. 7. Хронограмма астехиометрии распыления GaAs и InAs. **Fig. 7.** Nonstoichiometry chronogram of GaAs and InAs sputtering.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Минтаиров С.А., Калюжный Н.А., Надточий А.М., Максимов М.В., Рувимов С.С., Жуков А.Е. 2017. Оптические свойства гибридных наноструктур «квантовая яма-точки», полученных методом МОС-гидридной эпитаксии. Физика и техника полупроводников. 51(3): 372-377. doi: 10.21883/ FTP.2017.03.44210.8394
- 2. Беляев К.Г., Усикова А.А., Жмерик В.Н., Копьев П.С., Иванов С.В., Торопов А.А., Брунков П.Н. 2015. Плазмонное усиление люминесценции желто-красной области спектра в нанокомпозитах InGaN/Au. Физика и техника полупроводников. 49(2): 254-260.
- 3. Васильевский И.С., Пушкарев С.С., Грехов М.М., Виниченко А.Н., Лаврухин Д.В., Коленцова О.С. 2016. Особенности диагностики метаморфных наногетероструктур InAlAs/ InGaAs/InAlAs методом высокоразрешающий рентгеновской дифрактометрии в режиме отеда-сканирования. Физика и техника полупроводников. 50(4): 567-573.
- 4. Gordeev N.Yu., Rumyantsev O.I., Savenko I.G., Pavusov A.S., Zubov F.I., Maximov M.V., Zhukov A.E. 2013. Refractive index of laser active region based on InAs/InGaAs quantum dots. Journal of Nanophotonics. 7(1): 073087. doi: 10.1117/1. JNP.7.073087
- 5. Luque A., Linares P.G., Mellor A., Andreev V., Marti A. 2013. Some advantages of intermediate band solar cells based on type II quantum dots. Applied Physics Letters. 103(12): 123901. doi: 10.1063/1.4821580
- 6. Timofeev V.A., Nikiforov A.I., Zinovyev V.A., Teys S.A., Pchelvakov O.P. 2015. Formation of Ge/Si nanoscale structures at different growth conditions by molecular beam epitaxy. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. 10(1): 99-103. doi: 10.1166/ino.2015.1714
- 7. 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(1): 1-5. doi: 10.1186/1556-276X-8-367
- 8. Моисеев К.Д., Пархоменко Я.А., Анкудинов А.В., Гущина Е.В., Михайлова М.П., Титков А.Н., Яковлев Ю.П. 2007. Квантовые точки InSb/InAs, полученные методом жидкофазной эпитаксии. Письма в журнал технической физики. 33(7): 50-57.
- 9. Лозовский В.Н., Лозовский С.В., Чеботарев С.Н. 2006. Моделирование массопереноса примесей при зонной сублимационной перекристаллизации в цилиндрической ростовой зоне. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 3: 60-63.
- 10. Лозовский В.Н., Лозовский С.В., Чеботарев С.Н. 2007. Исследование краевого температурного эффекта при зонной сублимационной перекристаллизации. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 5: 52-56.
- 11. Лозовский В.Н., Лозовский С.В., Чеботарев С.Н., Ирха В.А. 2007. Осаждение тугоплавких металлов на рельефные подложки методом зонной сублимационной перекристаллизации. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 4: 68-70.

- 12. Elarde V.C., Rangarajan R., Borchardt J.J., Coleman J.J. 2005. Room-temperature operation of patterned quantum-dot lasers fabricated by electron beam lithography and selective area metal-organic chemical vapor deposition. Photonics Technology Letters. 17(5): 935-937. doi: 10.1109/LPT.2005.844555
- 13. Eisenhawer B., Zhang D., Clavel R., Berger A., Michler J., Christiansen S. 2011. Growth of doped silicon nanowires by pulsed laser deposition and their analysis by electron beam induced current imaging. Nanotechnology. 22(7): 075706. doi: 10.1088/0957-4484/22/7/075706
- 14. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Zhivotova E.N., Erimeev G.A., Lunina M.L. 2017. Obtaining and doping of InAs-QD/GaAs(001) nanostructures by ion beam sputtering. Beilstein Journal of Nanotechnology. 8(1): 12-20. doi: 10.3762/bjnano.8.2
- 15. Лунин Л.С., Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунина М.Л. 2012. Ионно-лучевая кристаллизация нанокластеров Ge на Si (001). Вестник Южного научного центра. 8(2): 9–12.
- 16. Лозовский В.Н., Ирха В.А., Чеботарев С.Н. 2012. Методика получения нанометок и их применение для позиционирования в сканирующей зондовой микроскопии. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 78(9): 33-36.
- 17. Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Williamson А., Лунин Л.С., Ирха В.А., Гамидов В.А. 2015. Ионно-лучевая кристаллизация наноструктур InAs/GaAs(001). Письма в журнал технической физики. 41(13): 102-110.
- 18. Чеботарев С.Н., Лунина М.Л., Алфимова Д.Л., Еримеев Г.А., Гончарова Л.М., Мохамед А.А.А. 2017. Индуцированные механические напряжения и электрические поля в наногетероструктурах с квантовыми нитями. Наука Юга России. 13(3): 18-26. doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-3-18-26
- 19. Чеботарев С.Н., Лунина М.Л., Лунин Л.С., Пащенко А.С., Арустамян Д.А., Еримеев Г.А., Яценко А.Н. 2016. Моделирование упругой деформации и пьезоэлектрического потенциала на поверхности полупроводника AlN(0001) с внедренными гексагональными квантовыми точками InN. Известия ЮФУ. Технические науки. 4(177): 32-39.
- 20. Лозовский В.Н., Чеботарев С.Н., Ирха В.А., Валов Г.В. 2010. Получение и использование позиционных меток в сканирующей зондовой микроскопии. Письма в журнал технической физики. 36(16): 1-5.
- 21. Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунин Л.С., Ирха В.А. 2016. Закономерности ионно-лучевой кристаллизации свойства полупроводниковых наногетероструктур InAs-OD/ GaAs(001). Российские нанотехнологии. 11(7-8): 51-57.
- 22. Ichimura S.R., Shimizu T., Ikuta B. 1982. Backscattering correction for quantitative Auger analysis: II. Verifications of the backscattering factors through quantification by AES. Surface Science. 115: 259-269. doi: 10.1016/0039-6028(82)90406-X
- 23. Comas J., Cooper C.B. 1966. Sputtering yields of several semiconducting compounds under argon ion bombardment. Journal of Applied Physics. 37(7): 2820–2822. doi: 10.1063/1.1782130
- 24. Okutani T.M., Shikata M., Shimizu R. 1980. Investigation on surface compositions of Cu-Ni alloy under Ar^+ ion bombardment by ISS and in situ AES measurements. Surface Science. 99(3): L410-L418. doi: 10.1016/0039-6028(80)90545-2

- Kang H.J., Shimizu R., Okutani T. 1982. ISS measurement of surface composition of Au–Cu alloys by simultaneous ion bombardments with Ar⁺ and He⁺ ions. *Surface Science*. 116: L173–L178. doi: 10.1016/0039-6028(82)90672-0
- McGuire G.E. 1978. Effects of ion sputtering on semiconductor surfaces. *Surface Science*. 76: 130–147. doi: 10.1016/0039-6028(78)90072-9

REFERENCES

- Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Nadtochiy A.M., Maximov M.V., Rouvimov S.S., Zhukov A.E. 2017. Optical properties of hybrid quantum-well–dots nanostructures grown by MOCVD. *Semiconductors*. 51(3): 357–362. doi: 10.1134/ S1063782617030198
- Belyaev K.G., Usikova A.A., Jmerik V.N., Kop'ev P.S., Ivanov S.V., Toropov A.A., Brunkov P.N. 2015. Plasmoninduced enhancement of yellow-red luminescence in InGaN/Au nanocomposites. *Semiconductors*. 49(2): 247–253. doi: 10.1134/S1063782615020049
- Vasil'evskii I.S., Pushkarev S.S., Grekhov M.M., Vinichenko A.N., Lavrukhin D.V., Kolentsova O.S. 2016. Features of the diagnostics of metamorphic InAlAs/InGaAs/ InAlAs nanoheterostructures by high-resolution X-ray diffraction in the ω-scanning mode. *Semiconductors*. 50(4): 559–565. doi: 10.1134/S1063782616040242
- Gordeev N.Yu., Rumyantsev O.I., Savenko I.G., Payusov A.S., Zubov F.I., Maximov M.V., Zhukov A.E. 2013. Refractive index of laser active region based on InAs/InGaAs quantum dots. *Journal of Nanophotonics*. 7(1): 073087. doi: 10.1117/1. JNP.7.073087
- Luque A., Linares P.G., Mellor A., Andreev V., Marti A. 2013. Some advantages of intermediate band solar cells based on type II quantum dots. *Applied Physics Letters*. 103(12): 123901. doi: 10.1063/1.4821580
- Timofeev V.A., Nikiforov A.I., Zinovyev V.A., Teys S.A., Pchelyakov O.P. 2015. Formation of Ge/Si nanoscale structures at different growth conditions by molecular beam epitaxy. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 10(1): 99– 103. doi: 10.1166/jno.2015.1714
- 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(1): 1–5. doi: 10.1186/1556-276X-8-367
- Moiseev K.D., Parkhomenko Ya.A., Ankudinov A.V., Gushchina E.V., Mikhailova M.P., Titkov A.N., Yakovlev Yu.P. 2007. InSb/InAs Quantum dots grown by liquid phase epitaxy. *Technical Physics Letters*. 33(4): 295–298. doi: 10.1134/ S1063785007040074
- Lozovsky V.N., Lozovsky S.V., Chebotarev S.N. 2006. [Modeling of impurity mass transfer under zone of sublimation recrystallization in cylindrical growth zone]. *Izvestiya vysshikh* uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 3: 60–63. (In Russian).
- Lozovskyi V.N., Lozovskyi S.V., Chebotarev S.N. 2007. [Study of edge temperature effect in zone sublimation recrystallization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy* region. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 5: 52–56. (In Russian).

НАУКА ЮГА РОССИИ 2018 Том 14 № 1

- Lozovskii V.N., Lozovskii S.V., Chebotarev S.N., Irkha V.A. 2007. [Deposition of refractory metals on relief sudstrates by zone sublimation regrowth]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh* zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 4: 68–70. (In Russian).
- Elarde V.C., Rangarajan R., Borchardt J.J., Coleman J.J. 2005. Room-temperature operation of patterned quantum-dot lasers fabricated by electron beam lithography and selective area metal-organic chemical vapor deposition. *Photonics Technology Letters.* 17(5): 935–937. doi: 10.1109/LPT.2005.844555
- Eisenhawer B., Zhang D., Clavel R., Berger A., Michler J., Christiansen S. 2011. Growth of doped silicon nanowires by pulsed laser deposition and their analysis by electron beam induced current imaging. *Nanotechnology*. 22(7): 075706. doi: 10.1088/0957-4484/22/7/075706
- Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Zhivotova E.N., Erimeev G.A., Lunina M.L. 2017. Obtaining and doping of InAs-QD/GaAs(001) nanostructures by ion beam sputtering. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 8(1): 12–20. doi: 10.3762/bjnano.8.2
- Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunina M.L. 2012. [Ge-nanoclusters' ion-beam crystallization on Si (001)]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 8(2): 9–12. (In Russian).
- Lozovskii V.N., Irkha V.A., Chebotarev S.N. 2012. [A method of obtaining nanomarks and their use for positioning in the scanning probe microscopy]. *Zavodskaya laboratoriya*. *Diagnostika materialov*. 78(9): 33–36. (In Russian).
- 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
- Chebotarev S.N., Lunina M.L., Alfimova D.L., Erimeev G.A., Goncharova L.M., Mohamed A.A.A. 2017. [Induced mechanical strain and electric fields in nanoheterostructures with quantum wires]. *Nauka Yuga Rossii.* 13(3): 18–26. (In Russian). doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-3-18-26
- Chebotarev S.N., Lunina M.L., Lunin L.S., Pashchenko A.S., Arustamyan D.A., Erimeev G.A, Yatsenko A.N. 2016. [Simulation of elastic deformation and piezoelectric potential on the surface of semiconductor AlN (0001) with burried InN hexagonal quantum dots]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 4(177): 32–39. (In Russian).
- Lozovskii V.N., Chebotarev S.N., Irkha V.A., Valov G.V. 2010. Formation and use of positioning marks in scanning probe microscopy. *Technical Physics Letters*. 36(8): 737–738. doi: 10.1134/S1063785010080171
- Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Irkha V.A. Regularities of ion-beam-induced crystallization and properties of InAs-QD/GaAs(001) semiconductor nanoheterostructures. *Nanotechnologies in Russia*. 11(7–8): 435–443. doi: 10.1134/ S1995078016040030
- Ichimura S.R., Shimizu T., Ikuta B. 1982. Backscattering correction for quantitative Auger analysis: II. Verifications of the backscattering factors through quantification by AES. *Surface Science*. 115: 259–269. doi: 10.1016/0039-6028(82)90406-X
- Comas J., Cooper C.B. 1966. Sputtering yields of several semiconducting compounds under argon ion bombardment. *Journal of Applied Physics*. 37(7): 2820–2822. doi: 10.1063/1.1782130

- Okutani T.M., Shikata M., Shimizu R. 1980. Investigation on surface compositions of Cu – Ni alloy under Ar⁺ ion bombardment by ISS and in situ AES measurements. *Surface Science*. 99(3): L410–L418. doi: 10.1016/0039-6028(80)90545-2
- 25. Kang H.J., Shimizu R., Okutani T. 1982. ISS measurement of surface composition of Au-Cu

alloys by simultaneous ion bombardments with Ar^+ and He^+ ions. *Surface Science*. 116: L173–L178. doi: 10.1016/0039-6028(82)90672-0

 McGuire G.E. 1978. Effects of ion sputtering on semiconductor surfaces. *Surface Science*. 76: 130–147. doi: 10.1016/0039-6028(78)90072-9

Поступила 22.09.2017