

05;07;10;11;12

Формирование развитой морфологии на поверхности фосфида индия при распылении ионными пучками аргона

© И.П. Сошников,¹ А.В. Лунев,¹ М.Э. Гаевский,¹ С.И. Нестеров,¹ М.М. Кулагина,¹ Л.Г. Роткина,¹
В.Т. Барченко,² И.П. Калмыкова,² А.А. Ефимов,² О.М. Горбенко³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
197376 Санкт-Петербург, Россия

³ Институт аналитического приборостроения РАН,
198103 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ipsosh@beam.ioffe.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 12 сентября 2000 г.)

Проведены исследования самоорганизующихся поверхностных структур InP, образующихся при распылении монохроматическими пучками ионов аргона с энергией от 0.1 до 15 keV. Показано, что обработка аргоновыми пучками поверхности InP может приводить к образованию морфологий "грасс" или "конус в лунке". Для объяснения формирования рельефа предложена качественная модель, включающая процессы распыления, каскадного перемешивания и поверхностного транспорта. Предложенная модель предсказывает правильный характер зависимости плотности и размеров морфологических элементов от флюенса. Кроме того, модель позволяет объяснить возникновение граничных условий образования морфологий "грасс" и "конус/группа конусов в лунке", а также влияние на них (граничные условия) температуры мишени. Показано, что наличие границ областей травления может приводить к возникновению частичной анизотропии в структуре морфологии. В частности, применение регулярных полосчатых масок при травлении позволяет сформировать морфологию со структурой текстурного типа.

Введение

Структуры с развитой поверхностной морфологией представляют особый интерес, что связано с возможностью их применения в микро- и оптоэлектронике [1,2]. Принципиальной проблемой в исследовании таких структур является создание регулярной морфологии [1]. В то же время известно, что при распылении некоторых полупроводниковых материалов, в частности InP, может формироваться развитая квазирегулярная поверхностная морфология типа "грасс" [3–5]. Такая морфология может быть использована как элемент приборной структуры. Однако исследования процессов рельефообразования при ионном распылении явно недостаточны для практического применения [3–5]. Кроме того, такие исследования представляют и фундаментальный интерес, так как позволяют более полно понять природу явления рельефообразования при ионном распылении.

В настоящей работе представлены результаты исследований структурных свойств поверхности фосфида индия, формирующихся при распылении ионными пучками аргона с энергией от 0.1 до 15 keV.

Методика эксперимента

В качестве образцов использовались стандартные пластины фосфида индия ФИЭТ-4 с ориентацией поверхности (001) и уровнем легирования $n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Площадь используемых образцов составляла порядка 1 см^2 .

Толщина образцов была в пределах 250–450 μm . Для удаления поверхностного дефектного слоя образцы предварительно обрабатывались методами химико-динамической полировки [6].

Облучение образцов проводилось на двух специальных установках, созданных на базе вакуумных постов ВУП-5 (НПО "Электрон", Сумы). Ионная пушка одной из них обеспечивает монохроматичный нейтрализованный пучок ионов аргона с энергией от 0.1 до 1.2 keV, диаметром около 50 mm и плотностью потока частиц $j \sim 10^{15} \text{ част.} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Определение флюенса Φ и плотности потока частиц на этой установке осуществлялось по распылению сателлитных образцов арсенида галлия, закономерности которого детально изучены в многочисленных работах [3,7–11], а именно в эксперименте сателлитные образцы частично закрывались маской и помещались одновременно с исследуемым образцом под ионный пучок. Затем определялась высота ступеньки h , образующейся на границе маскированной и немаскированной областей сателлитного образца. Связь флюенса Φ и плотности потока частиц j с глубиной травления h можно выразить так:

$$\Phi = \frac{2N_A\rho}{M}, \quad j = \frac{2N_A\rho}{M} \frac{h}{\tau}, \quad (1)$$

где $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ — число Авогадро, $\rho = 5.35 \text{ г/см}^3$ — плотность арсенида галлия [12], $M = 143.79 \text{ г}$ — молярный вес арсенида галлия [12]; τ — время экспозиции образца под пучком.

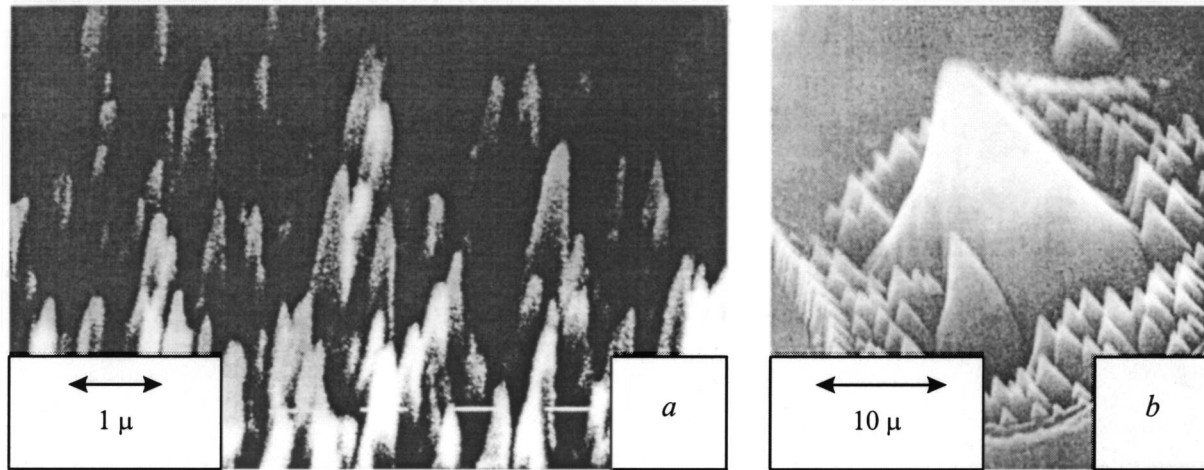


Рис. 1. РЭМ изображение поверхностной морфологии на InP, образующейся при травлении нейтрализованным ионным пучком аргона с энергией $E = 0.6$ keV при плотности потока $j \sim 10^{15}$ част. \cdot $s^{-1} \cdot$ cm^{-2} (a) и ионным пучком аргона с энергией $E = 5$ keV при плотности потока $j \sim 10^{15}$ част. \cdot $s^{-1} \cdot$ cm^{-2} (b).

Источник второй установки обеспечивает монохроматичный пучок ионов аргона с энергией от 0.1 до 15 keV, диаметром 3–15 mm (в зависимости от фокусировки) и плотностью тока частиц до $j \sim 250 \mu A \cdot cm^{-2}$ ($\sim 10^{15}$ част. \cdot $cm^{-2} \cdot s^{-1}$). Плотность тока в этом случае определялась с помощью цилиндра Фарадея с калиброванной апертурой. Детальное описание источников ускоренных частиц приведено в работах [13]. Отметим, что температура образцов в экспериментах не превышала $T = 80^\circ C$.

Исследование поверхностного рельефа проводилось методами сканирующей электронной микроскопии. Анализ поверхностной морфологии проводился с применением специальной программы, позволяющей осуществлять вычитание огибающей, фильтрацию шумов, фурье-преобразование изображения и др. [14].

Результаты и обсуждение

Распыление ионами аргона с энергией $E \sim 1$ keV при плотности потока частиц ($j \sim 10^{15}$ част. \cdot $cm^{-2} \cdot s^{-1}$ ($\sim 100 \mu A \cdot cm^{-2}$)) приводит к образованию развитой поверхностной морфологии "грас", состоящей из плотно стоящих конических элементов. Причем угол раствора элементов оказывается равен $\Theta \sim 12 \pm 5^\circ$. Пример такой морфологии представлен на рис. 1, a. Отметим, что поверхность с такой морфологией плохо отражает видимый свет.

В то же время увеличение энергии и/или плотности потока ионов приводит к образованию отдельных и/или группы конусов на гладкой поверхности. Угол раствора таких конусов зависит от энергии ионов и приблизительно равен удвоенному углу максимума выхода распыления. Величина угла раствора таких конусов находится в области $\Theta \sim 60-80^\circ$. Типичная картина такой

морфологии приведена на рис. 1, b. Поверхности с такой морфологией сохраняют свои отражающие свойства в видимом диапазоне света.

Результаты определения граничных условий образования двух типов морфологии представлены на рис. 2. Экспериментальные данные по граничным условиям удовлетворительно описываются зависимостью $Ej = \text{const} \approx 0.10 \pm 0.05 \text{ W/cm}^2$. Отметим, что величина постоянной может зависеть от разогрева образца [4].

Отметим, что величина постоянной может зависеть от разогрева образца [4].

Для характеристики поверхностной морфологии РЭМ изображение обрабатывалось с помощью шумового фильтра Вина, вычитания огибающей и фурье-преобразования [14]. В качестве примера на рис. 3, b и c приведены результирующие фурье-образы изображения морфологии "грас" в геометрии plan view (рис. 3, a),

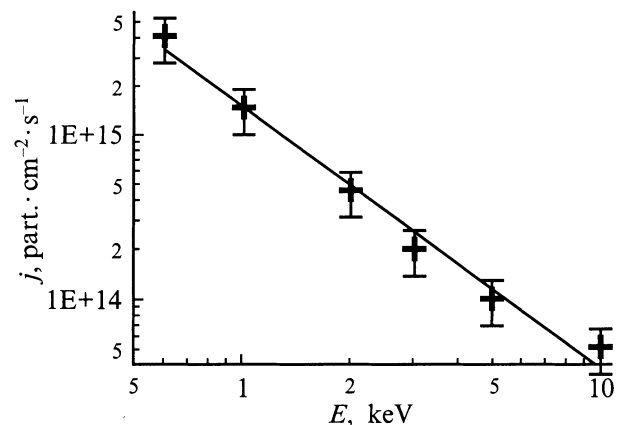


Рис. 2. Граничные условия образования морфологий "грас" и "конус в лунке" при температуре мишени не более $T \sim 80^\circ C$.

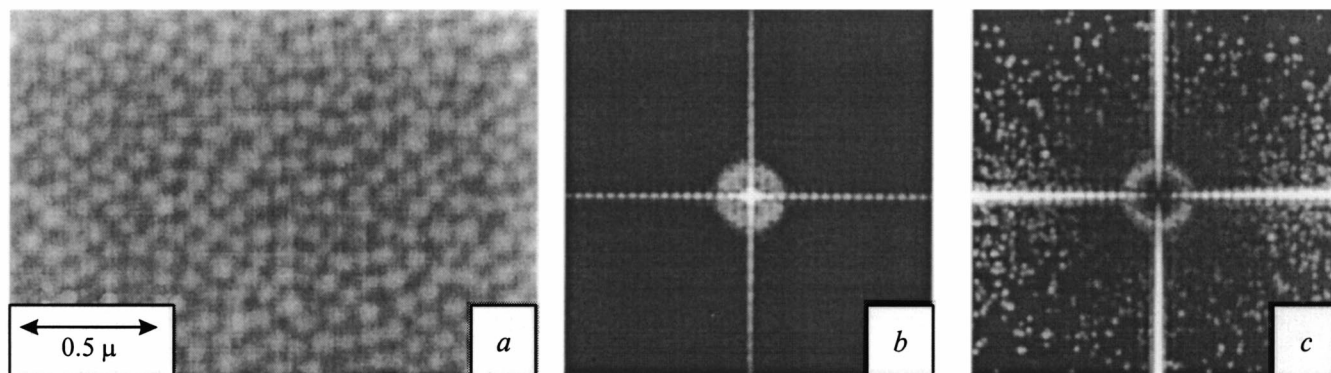


Рис. 3. РЭМ изображение поверхности InP, сформированной при травлении свободной поверхности нейтрализованным ионным пучком аргона с энергией $E = 0.6 \text{ keV}$ при плотности потока $j \sim 10^{15} \text{ част.} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ и экспозицией $\Phi \sim 10^{18} \text{ част.} \cdot \text{cm}^{-2}$ (a), и фурье-образы изображения, приведенного на рис. 3, a с вычитанием огибающей и без (b, c).

полученные с применением и без применения операции вычитания огибающей соответственно.

Исследование параметров морфологии, образующейся при $E \cdot j > 0.10 \text{ W/cm}^2$ показывает, что плотность конусов слабо зависит от экспозиции облучения, а их размеры (высота h) распределены случайным образом по убывающему закону в пределах $0 < h < h_0$, где h_0 величина, близкая к глубине травления (рис. 4).

В то же время распределения по размерам морфологических элементов, формирующихся при $E \cdot j > 0.10 \text{ W/cm}^2$, имеют ярко выраженный максимум, зависящий от флюенса и энергии ионов (рис. 4). Отметим, что дисперсия размеров конусов оценивается как $\delta D/D \leq 10\%$. Однако в случае недостаточной предварительной подготовки поверхности эта величина

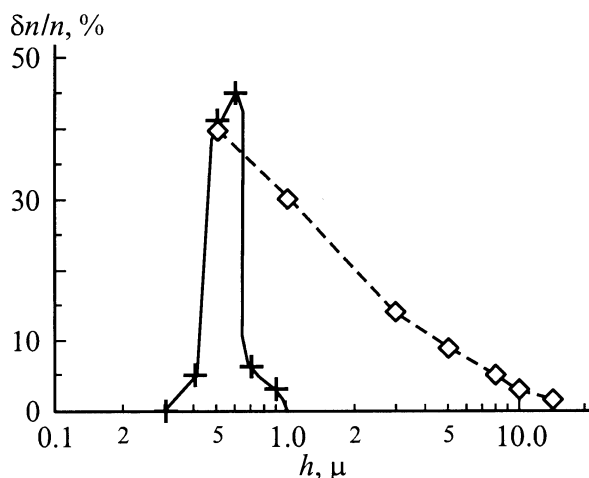


Рис. 4. Распределение по размерам элементов морфологии "конус/группа конусов в лунке" (\diamond) и "трава" (+) на поверхности InP после облучения ионами Ar^+ с энергией $E = 5 \text{ keV}$ при плотности потока $j \sim 10^{15} \text{ част.} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ до флюенса $\Phi \sim 5 \cdot 10^{18} \text{ част.} \cdot \text{cm}^{-2}$ и $E = 0.6 \text{ keV}$ при плотности потока $j \sim 10^{15} \text{ част.} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ до флюенса $\Phi \sim 10^{18} \text{ част.} \cdot \text{cm}^{-2}$ соответственно.

может возрасти до $\delta D/D \sim 35\%$. Плотность элементов для такого типа морфологии зависит от плотности потока и/или энергии ионов. Полученные зависимости плотности и характерной (средней) высоты приведены на рис. 5. Анализ этих данных показывает, что размеры элементов зависят как $h \sim \Phi^{1/4}$, а плотность как $\sigma \sim \Phi^{-1/2}$.

Полученные фурье-образы изображений поверхностей с морфологией типа "трава" имеют вид, характерный для изотропных объектов, т. е. при близких размерах конусы расположены изотропно.

Для проверки влияния границ на характер морфологии была подготовлена серия образцов с предварительно нанесенной методами интерференционной фотолитографии полосчатой маской. Ширина масок составляла 0.4 и $0.1 \mu\text{m}$ при периодах следования 1.6 и $0.45 \mu\text{m}$ соответственно. Пример поверхностной морфологии, образующейся на образцах с такой маской, и ее фурье-образы приведены на рис. 5. Можно видеть, что приведенные фурье-образы имеют вид, характерный для текстурированных объектов. Анализ размеров конусов показывает, что в этом случае можно выделить два характерных размера, свойственных объектам, сформировавшимся при травлении открытой части поверхности и маскированной соответственно. Дисперсия размеров конусов на таких поверхностях выше, чем в случае травления свободной поверхности, и составляет $\delta D/D_{\text{nonmask}} \sim 10\%$ и $\delta D/D_{\text{mask}} \sim 15\%$.

Характер поверхностной морфологии можно объяснить в рамках модели спонтанно-коалесцентного формирования рельефа [3,5], а именно формирование элементов поверхностной структуры "трава" происходит в результате комбинации процессов, включающей распыление, каскады столкновений и поверхностный транспорт. При указанной комбинации процессов на аморфизованной поверхности могут возникать центры нуклеации, которые являются центрами для дальнейшего роста конических элементов рельефа вискероподобного

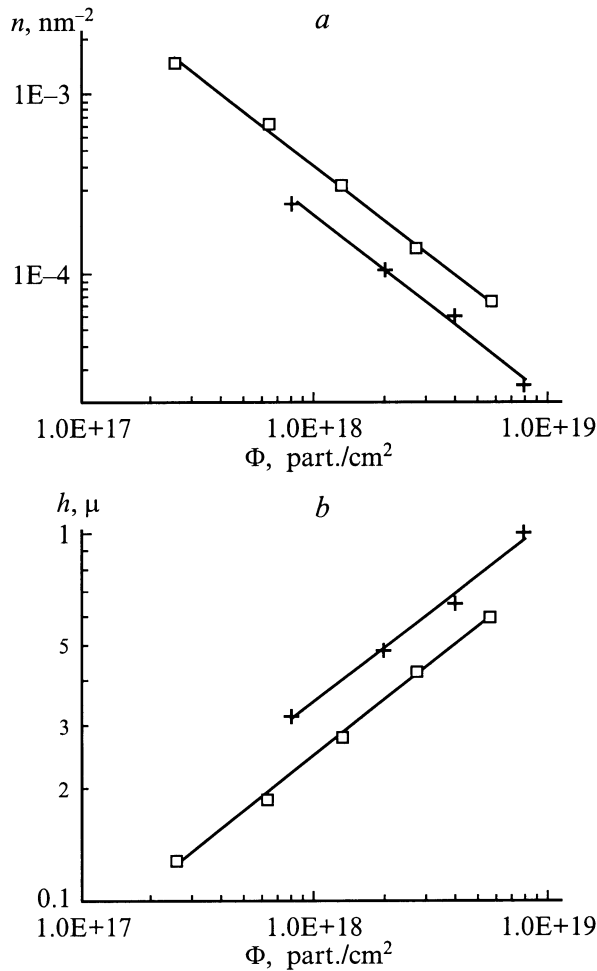


Рис. 5. Плотность (а) и характерные размеры (высота h) (b) элементов морфологии "грасс" в зависимости от флюенса при энергиях ионов Ag^+ $E = 0.6$ (+) и 5 (□) keV соответственно.

типа. Формирование элементов структуры происходит вследствие перераспределения материала мишени и рост вискерос или вискероподобных конических образований.

Изменение плотности конусов при увеличении флюенса при таком характере процессов рельефообразования происходит по коалесцентноподобному механизму: за счет гибели (вырождения) части конусов. Основное уравнение модели для эволюции поверхности S может быть представлено в виде [15,16]

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - v \frac{\partial}{\partial r}\right) S = n^{-1}(J_{\text{sputter}} + J_{\text{transport}} + J_{\text{mix}}), \quad (2)$$

где t — время экспозиции процесса; J_{sputter} , $J_{\text{transport}}$, J_{mix} — атомные потоки на поверхности мишени, связанные с распылением, диффузией и каскадным перемешиванием соответственно.

Отметим, что при $J_{\text{transport}} > J_{\text{sputter}} + J_{\text{mix}}$ возможно локально синергетическое решение уравнения, отвечающее варианту морфологии "грасс". Подобные уравнения решаются в теории коалесценции [17]. Детальный анализ уравнения (2) и его результатов будет представлен в последующих работах.

Коалесцентноподобный механизм эволюции морфологии позволяет объяснить характер зависимости плотности конусов от флюенса как $\sigma \sim \Phi^{-1/2}$ и $h \sim \Phi^{-1/4}$ соответственно. Увеличение плотности потока и/или энергии ионов в рамках рассматриваемой модели может приводить к гибели центров нуклеации и/или нарушению транспортных потоков, определяющих рост морфологических элементов, т.е. предлагаемая модель предсказывает наличие граничных условий, наблюдаемых в эксперименте. В то же время моделирование формирования морфологии с варьированием скорости транспортных процессов показывает, что порог образования рельефа "грасс" может смещаться в область больших энергий и плотностей потока. Так как транспортные процессы могут зависеть от температуры мишени, то повышение температуры может приводить к изменению характера поверхностной морфологии. Подобный эффект наблюдался в работе [4] при распылении InP ионами Ag^+ при повышенных температурах мишени.

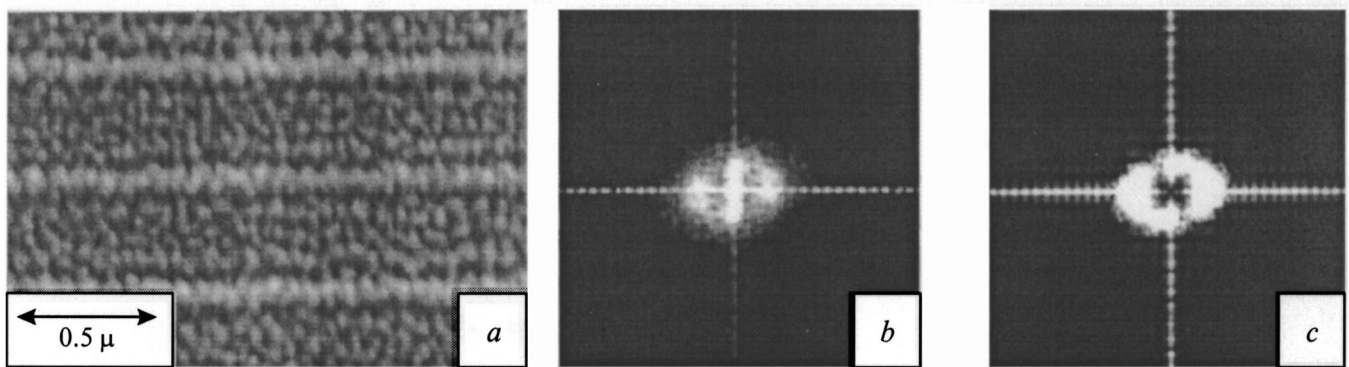


Рис. 6. РЭМ изображение поверхности InP, сформированной при травлении через полосчатую маску нейтрализованным ионным пучком аргона с энергией $E = 0.6$ keV при плотности потока $j \sim 10^{14}$ част. · cm⁻² · s⁻¹ и экспозицией $\Phi \sim 10^{18}$ част. · cm⁻² (a), и фурье-образы изображения (a) с вычитанием огибающей и без (b, c).

Выводы

Таким образом, проведены исследования самоорганизующихся поверхностных структур InP, образующихся при распылении монохроматическими пучками ионов аргона с энергией от 0.1 до 15 keV. Показано, что обработка аргоновыми пучками поверхности InP может приводить к образованию морфологии "грасс" или конус в лунке. Для объяснения формирования рельефа предложена качественная модель, включающая процессы распыления, каскадного перемешивания и поверхностного транспорта. Предложенная модель предсказывает правильный характер зависимости плотности и размеров морфологических элементов от флюенса. Кроме того, модель позволяет объяснить возникновение условий образования морфологий "грасс" и "конус/группа конусов в лунке", а также влияние на них (граничные условия) температуры мишени.

Показано, что наличие границ областей травления может приводить к возникновению частичной анизотропии в структуре морфологии. В частности, применение регулярных полосчатых масок при травлении позволяет сформировать морфологию со структурой текстурного типа.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 00-02-17006) и Федеральной научно-технической программой (№ 141).

Список литературы

- [1] *Joannopoulos J., Meade R., Winn J.* // Photonic Crystals. Princeton University Press, 1995.
- [2] *Yablonovitch E.* // J. Mod. Opt. 1994. Vol. 41. P. 173–178.
- [3] *Malherbe J.B.* // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 1994. Vol. 19. N. 2/3. P. 55–196.
- [4] *Wada O.* // J. Phys. D. 1984. Vol. 17. P. 2429–2434.
- [5] *Soshnikov I.P., Lunev A.V., Gaevski M.E.* et al. // Proc. SPIE Symp. on Microlithography. 1997. Vol. 3048. P. 404–407.
- [6] *Сангвал К.* // Травление кристаллов: теория, эксперимент, практика. М.: Мир, 1990.
- [7] *Soshnikov I.P., Lunev A.V., Kudryavtsev Yu.A., Bert N.A.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 1996. Vol. 59/60. P. 115–118.
- [8] *Сошников И.П., Берт Н.А.* // ФТТ. 1993. Т. 35. Вып. 9. С. 2250–2508.
- [9] *Сошников И.П., Берт Н.А.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 6. С. 84–89.
- [10] *Cotras J., Cooper C.B.* // J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 2956–2963.
- [11] *Bhattacharya S.R., Ghose D., Basu D.* / Nucl. Instrum Meth in Phys. Res. B. 1990. Vol. 47. P. 253–9
- [12] *Барченко В.Т., Соколовский А.* // Изв. ЛЭТИ. Л. ЛЭТИ. 1982. Вып. 303. С. 42–56.
- [13] *Landolt-Börnstein.* Num. Data and Functional Relationships in Science and Technology. Springer Verlag, 1982. Vol. 17c.

- [14] *Gorbenko O.M., Kurochkin D.V., Golubok A.O.* // Proc. 1st Intern. Conf. on Digital Signal Processing and its Application. Moscow, 1998. Vol. 3. P. 197–198.
- [15] *Carter G.* // Erosion and Growth of Solids Simulated by Atom and Ion Beams. / Ed. G. Kirikidis, G. Garter, J.L. Whitton. Martinus Nijhof. Publ., 1986.
- [16] *Stepanova M.G.* / Proc. 3rd Intern. Conf. on Computer Semulation of Radiation Effects in Solids (COSIRES'96). Guildford (UK): Univ. of Surrey, 1996. Vol. 1. P. 85–91.
- [17] *Кукушкин С.А., Слезов В.В.* // Дисперсные системы на поверхности твердых тел. СПб.: Наука, 1996.