

Имплантация высокоэнергетических ионов под действием фемтосекундного лазерного излучения

Р.В.Волков, Д.М.Голишников, В.М.Гордиенко, А.Б.Савельев, В.С.Черныш

Осуществлена имплантация ионов германия из разлетающейся плазмы в кремниевый коллектор. Плазма зажигалась на поверхности твердотельной мишени фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью $\sim 10^{15}$ Вт/см². Предложена методика определения энергетических характеристик ионной компоненты лазерной плазмы по профилю концентрации имплантированных в подложку атомов.

Ключевые слова: фемтосекундные импульсы, лазерная плазма, имплантация, высокоэнергетические ионы.

1. Введение

Плазма, создаваемая на поверхности твердотельной мишени сверхкоротким лазерным импульсом сверхсильного светового поля, является уникальным источником пучков высокоэнергетических ионов и электронов [1]. При взаимодействии высококонтрастного фемтосекундного лазерного излучения с интенсивностью $10^{15} - 10^{16}$ Вт/см² с твердотельной мишенью в лазерной плазме формируется высокоэнергетическая (более 10 кэВ) ионная компонента. Кинетическая энергия ионов, кратность их ионизации, диаграмма направленности и элементный состав разлетающейся плазмы зависят не только от параметров лазерного излучения (интенсивность, длительность импульса, длина волны, энергетический контраст), но и от состояния поверхности мишени. При этом модификация приповерхностного слоя мишени позволяет управлять параметрами плазмы [2, 3].

Формирующиеся в процессах взаимодействия сверхинтенсивного лазерного излучения с веществом пучки быстрых ионов, в свою очередь, могут быть использованы при создании новых технологий ионной имплантации. Традиционная технология имплантации пучком ускоренных ионов позволяет вводить в приповерхностный слой мишени контролируемое количество примесных атомов и, следовательно, приводит к изменению физических и химических свойств приповерхностного слоя различных материалов.

В работе [4] описана комбинированная методика ионной имплантации, когда ионизация вещества осуществляется наносекундным лазерным импульсом, а дальнейшее ускорение ионов до высоких энергий – электростатическим полем. Прямая имплантация ионов из лазерно-индуцированной плазмы без применения ускоряю-

щего потенциала была реализована с использованием излучения третьей гармоники иодного лазера ($\lambda = 1.315$ мкм) при длительности импульса 400 пс и интенсивности до 10^{16} Вт/см² [5]. Переход к фемтосекундным импульсно-периодическим лазерным системам сверхсильного светового поля позволит получать направленные пучки более высокоэнергетических ионов и проводить их имплантацию в материал на большие глубины. В экспериментах такого рода использование лазерно-индуцированной имплантации перспективно для модификации приповерхностного слоя мишени, и в то же время она может служить методом исследования энергетического спектра ионов и их углового распределения. Как диагностический метод ионная имплантация может применяться и в экспериментах по генерации термоядерных нейтронов из твердотельных мишеней с одновременным получением распределения ионов по энергиям, усредненного по большому числу выстрелов.

Целью настоящей работы является демонстрация возможностей лазерно-индуцированной имплантации с использованием высокоинтенсивных фемтосекундных импульсов и определение потенциальной применимости этой методики для характеристики энергетического спектра лазерной плазмы.

2. Эксперимент по прямой лазерной имплантации ионов германия в кремний

Схема наших экспериментов по лазерно-индуцированной имплантации ионов германия в кремниевую подложку показана на рис.1. В качестве мишени использовался монокристаллический Ge, коллектором ионов служила пластина Si с ориентацией $\langle 100 \rangle$. Мишень помещалась в вакуумную камеру, которая откачивалась до давления остаточных газов 10^{-5} Тор.

Мишень облучалась импульсами лазера на красителе с $\lambda = 616$ нм, длительностью $\tau = 200$ фс и энергией 200–300 мкДж. Фокусировка излучения осуществлялась с помощью линзы с фокусным расстоянием 11 см, что обеспечивало интенсивность излучения на мишени $(0.5 - 3.5) \times 10^{15}$ Вт/см². Измеренный диаметр перетяжки лазерного пучка был равен 7 ± 1 мкм. Расстояние между кремниевым коллектором и германиевой мишенью в эксперимен-

Р.В.Волков, Д.М.Голишников, В.М.Гордиенко, А.Б.Савельев. Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: golishnikov@femtosrv.phys.msu.ru

В.С.Черныш. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы

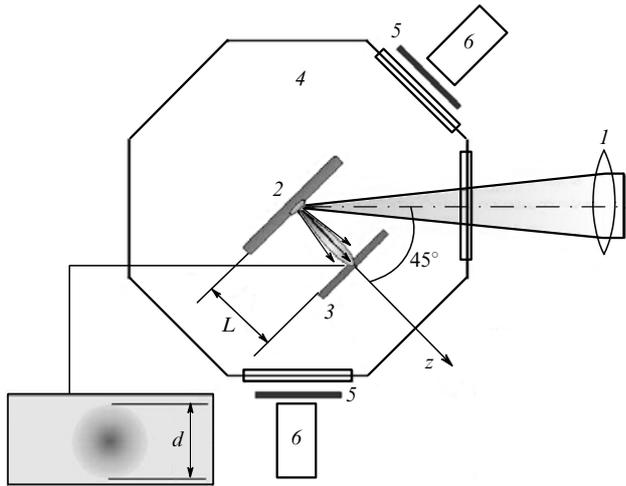


Рис.1. Схема эксперимента по лазерно-индуцированной имплантации ионов:

1 – фокусирующая линза; 2 – мишень; 3 – коллектор; 4 – вакуумная камера; 5 – Al- и Ве-фильтры; 6 – рентгеновские NaI(Tl)-детекторы; $L = 1.5 \pm 0.2$ см – расстояние между мишенью и коллектором; на вставке слева схематически изображена имплантированная область коллектора ($d \sim 5$ мм – диаметр имплантированной области).

те составляло 1.5 ± 0.2 см. Было произведено 1.5×10^3 выстрелов по германиевой мишени. Фокусировка лазерного излучения на мишень контролировалась по выходу рентгеновского излучения с помощью рентгеновских NaI(Tl)-детекторов. Лазерный импульс взаимодействовал в основном с лазерно-модифицированной мишенью (лазерно-индуцированными кратерами) [2]. Первый лазерный импульс формировал кратер на поверхности мишени, и последующие импульсы взаимодействовали с сильно развитой поверхностью кратеров. В одну и ту же точку мишени осуществлялось 10–15 лазерных выстрелов. После такой серии выстрелов выход рентгеновского излучения из лазерной плазмы начинал уменьшаться вследствие смещения перетяжки лазерного пучка из положения точного фокуса, затем мишень сдвигалась. Перед детекторами устанавливались фильтры из Ве и Al толщиной 100 мкм. Их коэффициент пропускания, равный 1%, соответствует энергии квантов 5 кэВ для Al-фильтра и 1.34 кэВ для Ве-фильтра [6]. При облучении плоской поверхности германия не были зарегистрированы кванты с энергией, превышающей 5 кэВ. Однако при той же интенсивности ($\sim 10^{15}$ Вт/см²) в плазме модифицированной германиевой мишени регистрировалось рентгеновское свечение с энергией, превышающей 5 кэВ. Это позволило измерить характерную энергию горячей электронной компоненты в плазме модифицированных мишеней (по ранее предложенной нами методике [7]), которая составила 1.5 ± 0.6 кэВ.

После имплантации ионами германия кремниевый коллектор исследовался с помощью масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) и резерфордовского обратного рассеяния (РОР). ВИМС-анализ проводился пучком ионов Cs с энергией 7 кэВ при плотности ионного тока 9.05×10^{13} част./см² и давлении остаточных газов в вакуумной камере $\sim 10^{-9}$ Тор. При анализе имплантированного коллектора методом РОР использовался пучок ионов He⁺ с энергией 2 МэВ. Размер сечения зондирующего пучка составлял 1×2 мм. Поверхность коллектора изучалась также в растровом электронном микроскопе.

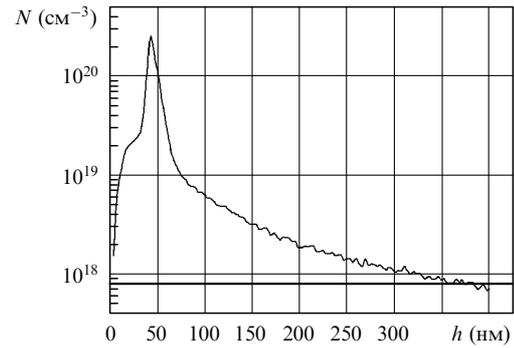


Рис.2. Профиль концентрации атомов германия $N(h)$ в кремниевой матрице, полученный в центре пятна имплантированных атомов. Горизонтальная линия – порог регистрации ионов методом ВИМС.

3. Результаты эксперимента

В результате анализа данных ВИМС был получен профиль концентрации атомов Ge в кремниевой матрице. На рис.2 представлен этот профиль после 1500 лазерных выстрелов, полученный с помощью методики ВИМС на участке коллектора размером 400×400 мкм. Калибровка ионного сигнала по глубине осуществлялась путем измерения глубины кратера, оставленного ионным пучком, а калибровка по концентрации – путем сопоставления ионного сигнала от имплантированного образца SiGe с известным профилем концентрации атомов Ge в кремниевой матрице.

Горизонтальная линия на рис.2 соответствует порогу регистрации ионов. Концентрации, находящиеся ниже определенного порога ($\sim 10^{-5}$ от твердотельной концентрации), оказываются недостоверными, а столь слабый ионный сигнал может быть вызван ионными кластерами с массой, равной массе иона Ge. Таким образом, максимальная глубина проникновения имплантированных атомов не превышает 400 нм, что и ограничивает максимальную зону диагностики. На рис.3 представлены зависимости от времени распыления t концентраций атомов Ge и Si (число распыленных ионов, регистрируемых в секунду), полученные методом ВИМС, которые позволяют сравнить поведение этих концентраций вблизи границы имплантированного коллектора.

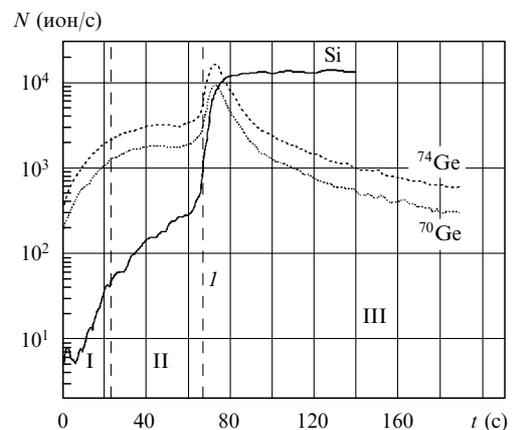


Рис.3. Профили концентрации атомов Ge и Si в кремниевой матрице. Область I – переходный слой поверхностных загрязнений, область II – поверхностная пленка Ge, область III – имплантированная зона, линия I – граница кремниевой пластины до имплантации.

Спектр обратно рассеянных ионов представлен на рис.4,а. Максимум вблизи 390-го канала соответствует наличию поверхностной пленки из германия, а затянутый «хвост» – атомам германия, внедренным в кремниевую матрицу. Результаты обработки спектра, полученные с помощью программы RUMP [8], приведены на рис.4,б. Видно, что даже на расстоянии до 0.6 мкм от поверхности коллектора обнаружен сигнал, соответствующий рассеянию на ионах германия. Необходимо отметить, что такой же спектр POP в каналах с номерами 260–380 может быть обусловлен наличием на поверхности коллектора германиевых кластеров с характерным размером ~ 1 мкм. Известно, что при лазерной абляции твердотельных мишеней с поверхности коллектора могут улетать макроскопические капли вещества.

Поверхность имплантированного коллектора была исследована с помощью электронного микроскопа. Из рис.5 видно, что на поверхности коллектора наблюдаются макроскопические выступы с поперечными размерами ~ 2 мкм. Среднее расстояние между ними составляло 100–500 мкм. В то же время такие кластеры не были обнаружены при профилометрии кратера (400×400 мкм), оставленного пучком ионов Cs в процессе измерения профиля концентрации методом ВИС.

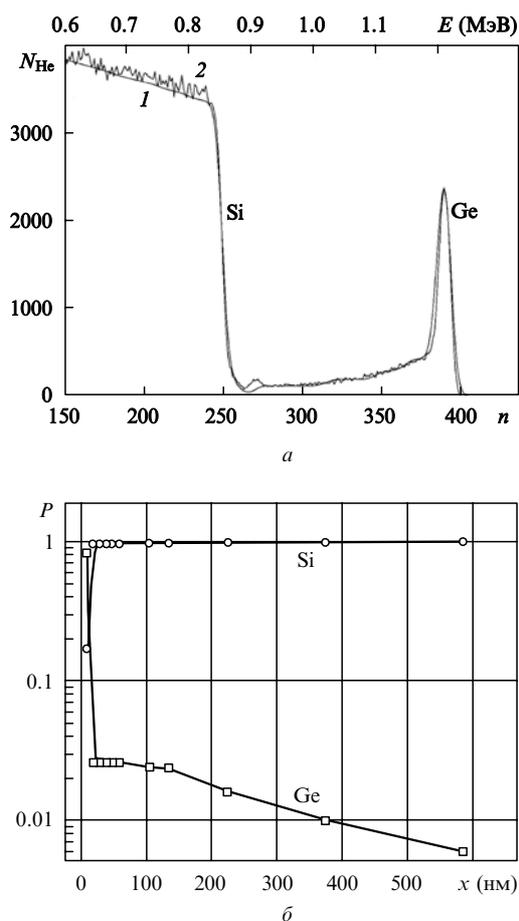


Рис.4. Энергетический спектр ионов гелия, рассеянных в обратном направлении (кривая 1 соответствует модели, описываемой рис.4,б, кривая 2 – экспериментальные данные) (а) и профили концентрации атомов Ge и Si в кремниевой матрице, адекватно описывающие экспериментально наблюдаемые спектры и соответствующие кривой 1 на рис.4,а (б) (E – энергия рассеянных частиц, N_{He} – число отсчетов за время наблюдения, n – номер канала, x – расстояние от поверхности мишени, P – относительная доля данного элемента).

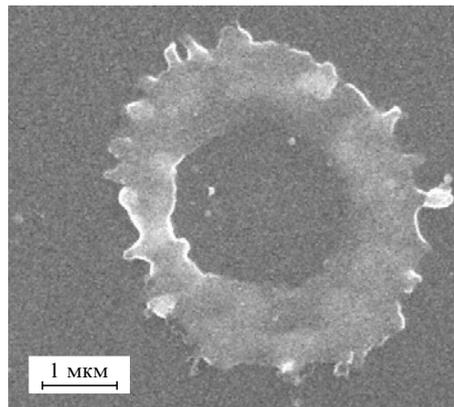


Рис.5. Фотография отдельного поверхностного кластера германия на кремниевом коллекторе, полученная с помощью растрового микроскопа.

4. Обсуждение результатов эксперимента

Как показали измерения ионных спектров [9], выполненные нами с помощью времяпролетного масс-спектрометра при интенсивности лазерного излучения $\sim 10^{16}$ Вт/см², ионы в лазерной плазме могут иметь кратность ионизации до $Z = 6$, и на расстоянии 62 см от мишени их кинетическая энергия может достигать 150 кэВ. При этом угловое распределение ионов при использовании плоских мишеней является достаточно узким и направлено вдоль нормали к плоскости мишени. Распределение ионов по энергии хорошо описывается экспоненциальным законом $N(E) \sim \exp(-E/T_h^i)$, где T_h^i – температура горячей ионной компоненты, которая определяется температурой горячей электронной компоненты лазерной плазмы и зарядовым составом плазмы: $T_h^i \approx ZT_h^e$ [1]. Температура T_h^e для германиевой мишени была измерена в ходе эксперимента и составила 1.5 ± 0.6 кэВ. Следовательно, при средней кратности ионизации плазмы $Z = 6$, достижимой при интенсивности $(1 - 3) \times 10^{15}$ Вт·см⁻², можно оценить температуру горячей ионной компоненты плазмы: $T_h^i \sim 10$ кэВ.

С помощью программы SRIM [10] можно оценить средний проективный пробег (глубина проникновения) и рассчитать профиль концентрации имплантированных атомов для ионного пучка с энергией 10 кэВ.

В процессе ионной имплантации низкоэнергетичные ионы и нейтральные атомы разлетающейся плазмы формируют на поверхности коллектора тонкую пленку. На рис.3 в точке, соответствующей времени распыления $t = 60$ с, видна граница между германиевой пленкой и подложкой из кремния. Мишень можно разделить на несколько слоев (см. рис.3). Первый слой, характеризующийся уменьшением концентрации германия, представляет собой верхний переходный слой поверхностных загрязнений (пленка окислов, органических загрязнений и воды). За ним следует слой с постоянной концентрацией германия – германиевая пленка на поверхности кремния, сформированная низкоэнергетичными ионами. Третий слой начинается после скачкообразного возрастания концентрации кремния – изначальной границы коллектора до имплантации. Это имплантированный слой, он характеризуется резким спадом концентрации имплантированных атомов, профиль концентрации атомов имеет максимум, соответствующий границе раздела крем-

ний – германиевая пленка. Граница раздела на рис.3 соответствует глубине 30–40 нм (рис.2). Для определения энергетических характеристик ионов по профилю распределения имплантированных атомов при обработке данных не следует учитывать первые 30–40 нм поверхностной пленки. Максимум концентрации атомов Ge находится на глубине ~ 120 Å от границы раздела кремниевой подложки и германиевой пленки. Ниже мы объясним причины выбора такой толщины поверхностной пленки.

Исходное интегральное уравнение, которое необходимо численно решить для восстановления спектра ионов по профилю концентрации (однородное уравнение Фредгольма первого рода [11]), не имеет единственного решения. При этом сама задача является некорректной, но может быть численно решена при определенных ограничениях [12]. Тем не менее полученный в эксперименте профиль концентрации имплантированных атомов позволяет определить некоторые энергетические характеристики ионного спектра плазмы, не привлекая мощные численные расчеты.

Поскольку Ge и Si являются материалами, которые при определенных условиях могут взаимно диффундировать друг в друга, то при обработке данных эксперимента по лазерной имплантации Ge в Si необходимо рассмотреть возможное влияние диффузии на распределение ионов Ge в кремниевой подложке. Анализ литературных данных [13–16] показывает, что процессы диффузии кремния в германий (и в обратном направлении) оказываются существенными при температурах, близких к 1000 °C, и идут достаточно медленно даже при таких температурах [13]. Итак, при обработке данных ВИМС мы будем пренебрегать процессами взаимной диффузии атомов Ge и Si, т.к. при комнатных температурах диффузия протекает медленно и неэффективно.

Чтобы получить распределение имплантированных ионов по глубине, была использована программа SRIM, основанная на квантово-механическом подходе к описанию процессов столкновения монохроматического пучка имплантируемых ионов с атомами подложки. С ее помощью был рассчитан средний проективный пробег ионов германия в кремнии в зависимости от энергии пучка.

Для сопоставления экспериментального профиля концентрации ионов германия в кремниевой подложке (рис.2) и расчетных концентраций для монохроматического ионного пучка (рис.6) нужно вычислить толщину поверхностной пленки. В наших экспериментах разрешение метода РОР по глубине составляло 120 Å. Обработка сигнала ядер отдачи указывает на то, что толщина поверхностной германиевой пленки не превышает разрешения данного метода, т.е. 120 Å. В то же время данные ВИМС дают толщину пленки 305 Å. Необходимо отметить, что скорость распыления поверхностной пленки сильно (в ряде случаев на порядок [17]) отличается от скорости распыления объемного образца. Калибровка сигнала на рис.2 по глубине была осуществлена путем деления глубины кратера на время распыления, поэтому влияние поверхностной пленки не учитывалось. Следовательно, толщина поверхностной пленки вычисляется методом ВИМС некорректно [18].

Особенностью метода прямой лазерной имплантации является широкий и слабо зависящий от условий эксперимента спектр ионов разлетающейся плазмы. Поэтому в наших экспериментах прямая лазерная имплан-

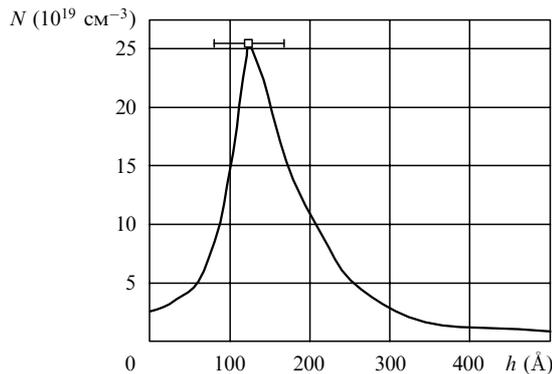


Рис.6. Экспериментальная зависимость концентрации ионов Ge в кремниевом коллекторе N от глубины h (сплошная кривая) и расчетный проективный пробег монохроматического пучка ионов германия с энергией 10 кэВ (\square). Толщина поверхностной пленки выбрана равной 305 Å, что по порядку величины совпадает с данными РОР.

тация может рассматриваться и как метод диагностики ионного компонента плазмы. Как было показано в работе [5], этот метод дает качественное согласие с методом времяпролетной масс-спектропии ионов. Преимущества данного метода очевидны: он прост и дает информацию об энергетическом спектре ионов, в отличие от десяти тысячам лазерных выстрелов. Последнее обстоятельство особенно важно в лазерно-плазменных экспериментах, проводимых с большой частотой следования импульсов. Например, в описываемых в работе [19] экспериментах по регистрации термоядерных нейтронов, вылетающих из лазерной плазмы дейтерированных мишеней, для достоверной регистрации выхода нейтронов требуется 2000 – 5000 лазерных выстрелов, при этом выход нейтронов зависит от энергии и спектра ионов дейтерия. Помещенный в экспериментальную камеру коллектор ионов позволит осуществлять пассивный мониторинг энергетического спектра разлетающихся ионов. Полученные таким способом усредненные данные по энергии ионов можно сопоставить с оценками, проведенными на основе измеренного нейтронного выхода.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована возможность имплантации ионов германия в кремниевую подложку с помощью фемтосекундного лазерного импульса интенсивностью 10^{15} – 10^{16} Вт/см². В материале подложки на глубинах до 400 нм обнаружены имплантированные атомы германия. По профилю имплантированных атомов можно определить среднюю энергию ионной компоненты разлетающейся лазерной плазмы.

Авторы благодарят М.А.Тимофеева и В.С.Куликауска за помощь в проведении работ по электронной микроскопии и РОР.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-02-16659).

1. Лютер-Девис В., Гамалий Е.Г., Ванг Янжи, Роде А.В., Тихончук В.Т. *Квантовая электроника*, **19** (4), 317 (1992).
2. Golishnikov D.M., Gordienko V.M., Mikheev P.M., et al. *Laser Phys.*, **11**, 1205 (2001).
3. Волков Р.В., Гаврилов С.А., Голищников Д.М., Гордиенко В.М., Михеев П.М., Савельев А.Б., Серов А.А. *Квантовая электроника*, **31** (3), 241 (2001).
4. Быковский Ю.А., Неволин В.Н. и др. *Ионная и лазерная имплан-*

- тация металлических материалов (М.: Энергоатомиздат, 1991).
5. Torrisi L., Gammino S., Mezzasalma A.M., et al. *Appl. Surf. Sci.*, **217**, 319 (2003).
 6. http://www-cxro.lbl.gov/optical_constants/filter2.html.
 7. Волков Р.В., Гордиенко В.М., Михеев П.М., Савельев А.Б. *Квантовая электроника*, **30** (10), 896 (2000).
 8. <http://www.mse.cornell.edu/cgs>, <http://www.genplot.com/RUMP/index.htm>.
 9. Волков Р.В., Голишников Д.М., Гордиенко В.М. и др. *Квантовая электроника*, **33** (11), 981 (2003).
 10. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. *The Stopping and Ranges of Ions in Solids* (New York: Pergamon Press, 1985)
 11. Васильева А.Б., Тихонов А.Н. *Интегральные уравнения* (М.: Изд-во МГУ, 1989).
 12. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. *Методы решения некорректных задач* (М.: Наука, 1974).
 13. Ronning C., Carlson E.P., Davis R.F. *Phys. Rep.*, **351**, 349 (2001).
 14. Strohm A., Voss T., Frank W., et al. *Physica B*, **308-310**, 542 (2001).
 15. Kim K., Kim H.S., Kim J.Y., et al. *J. Solid State Electrochem.*, **1**, 221 (1997).
 16. Jiang Z., Xu A., Hu D., et al. *Thin Solid Films*, **321**, 116 (1998).
 17. *Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. I.* Под ред. Р.Бериш, К.Виттмак (М.: Мир, 1984, гл. 4).
 18. *Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. III.* Под ред. Р.Бериш, К.Виттмак (М.: Мир, 1998).
 19. Волков Р.В., Голишников Д.М., Гордиенко В.М. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **72**, 577 (2000).