

Формирование гелиевых пузырей в приповерхностных слоях кремния плазменно-иммерсионной ионной имплантацией

А. А. Ломов^{1,a}, Ю. М. Чесноков^{2,b}, А. П. Орешко^{3,c}

¹ Физико-технологический институт РАН. Россия, 117218, Москва, Нахимовский просп., д. 36/1.

² НИЦ «Курчатовский институт». Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики твердого тела. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^a lomov@ftian.ru, ^b chessyura@yandex.ru, ^c ap.oreshko@physics.msu.ru

Статья поступила 02.11.2016, подписана в печать 26.12.2016.

Методами высокоразрешающей рентгеновской рефлектометрии и просвечивающей электронной микроскопии проведены исследования приповерхностных слоев подложек монокристаллического кремния Si (001), подвергнутых плазменно-иммерсионной имплантации ионами гелия с энергией 2 и 5 кэВ и дозой $5 \cdot 10^{17}$ см⁻². Показано, что формируемый ионами гелия приповерхностный слой имеет многослойную структуру, состоящую из верхнего субслоя аморфизованного кремния, под которым расположены субслоем с гелиевыми пор-пузырями и нарушенный кристаллический субслой. Определены распределение электронной плотности по глубине, концентрация и распределение пор по размеру. Установлено, что средние размеры пор-пузырей при указанных выше энергиях имплантации составляют 4 и 8 нм соответственно.

Ключевые слова: рентгеновская рефлектометрия, малоугловое рассеяние, кремний, ионная имплантация, гелиевые пузыри.

УДК: 548.4: 548.732. PACS: 61.05.cf; 61.05.cm; 61.72.uf; 68.37.Lp; 85.40.Ry.

Введение

Модификация физических свойств приповерхностных слоев кремниевых подложек методом высокодозовой имплантации ионов гелия возможна путем формирования внутренних пористых слоев, с пустотами в виде пузырей [1, 2]. В последнее десятилетие этот результат нашел применение, в частности при получении тонких пленок кремния [3], гетерировании металлических примесей [4], в МОП-технологии (МОП — металл–оксид–полупроводник) [5]. Более эффективно скрытые пористые и напряженные слои с толщинами 5–10 нм могут быть получены при плазменно-иммерсионной ионной имплантации (ПИИИ) [6] подложек ионами гелия с энергией 0.5–5 кэВ [7–9]. В настоящее время термин «пористый кремний» обозначает хорошо известный материал. Чтобы не вводить в заблуждение читателя, мы будем использовать термин «пузырчатый кремний», или пор-гелиевый кремний.

Для характеристики пористых слоев и их границ успешно применяется [9, 10] высокоразрешающая рентгеновская рефлектометрия (ВРР), получившая в иностранной литературе название GISAXS. Методика позволяет отдельно регистрировать вклады от зеркальной и диффузной компонент рассеяния. Каждая компонента несет специфическую информацию об особенностях структуры пористых слоев. При исследовании наноразмерных структур для восстановления искомым параметров возможен отдельный анализ каждой компоненты. Зеркальная компонента дает возможность восстановить толщину слоев и их плотность, а диффузная — среднеквадратичную

величину шероховатости поверхности и латеральные особенности (поры, наночастицы и т. п.) плотности внутренних границ. В случае ангстремных шероховатостей поверхности их вклад в величину интенсивности диффузного рассеяния от внутренних особенностей плотности может оказаться малым. Это позволяет не учитывать вклад от шероховатости поверхности как при восстановлении распределения электронной плотности по глубине образца, так и при характеристике формы пор, их корреляции и распределении по размерам при анализе диффузной компоненты рассеяния.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению структурных параметров (толщины, размеров границ, величины пористости и размеров пор) внутренних пузырьчатых слоев, созданных в подложках кремния при высокодозовой плазменно-иммерсионной имплантации ионов гелия.

1. Образцы и методы исследования

Образцы для исследований размером 25×25 мм выкалывали из стандартных подложек кремния Si(100), легированных бором (КДБ-12). Удельное сопротивление составляло 12 Ом·см. Непосредственно перед имплантацией они подвергались очистке от естественного оксида в 5%-м растворе плавиковой кислоты при комнатной температуре в течение 1 мин. Затем без пребывания в атмосфере лаборатории образцы помещались в имплантер с атмосферой гелия. Имплантацию ионов He⁺ проводили в плазменно-иммерсионном низковольтном ионном имплантере (разработка ФТИАН РАН), имеющем ICP-источник плотной плазмы (ICP — inductively

coupled plasma) с охлаждаемым столом-держателем пластин [11].

Плазменно-иммерсионная ионная имплантация — это новая и бурно развивающаяся технология микроэлектроники, позволяющая формировать ультрамелкие области легирования. Этот метод основан на прямой имплантации ионов легирующих примесей и ко-имплантов из плазмы в иммерсионном режиме, без их селекции по массе. При этом ионные токи составляют 10–20 мА/см², что увеличивает производительность процесса при использовании низких ускоряющих напряжений в сотни раз по сравнению с традиционной имплантацией из ионных пучков. Скорость набора имплантированной дозы составляет > 10¹⁴ см⁻²/с.

ПИИ-имплантер ФТИАН позволяет работать с пластинами диаметром до 150 мм и обеспечивает высокую однородность плотности потока ионов на площади (отклонение менее 2% на максимальном диаметре 150 мм). Имплантация ионов происходит в импульсно-периодическом режиме, при подаче прямоугольного ускоряющего импульса смещения на пластину. Потенциал импульса ($-V_{acc}$) определяет энергию имплантируемых ионов, а отношение длительности постоянного потенциала к длительности фронта/спада импульса — их энергетическую дисперсию. Для процесса имплантации ионов из плазмы используется специализированный источник потенциала ускорения, обеспечивающий ток в импульсе до 10 А (при напряжении до -5 кВ), сохраняющий форму импульса потенциала при его подаче на обрабатываемую пластину, погруженную в плазму и представляющую для генератора нелинейную емкостную нагрузку. Еще одной важной конструктивной особенностью имплантера является защита рабочих поверхностей камеры высокочистым кварцем, препятствующим загрязнению имплантируемого слоя конструкционными материалами.

Давление гелия в рабочей камере при мощности разряда 500 Вт было постоянным и составляло 10⁻³ торр. Остаточное давление газов в реакторе составляло 5 · 10⁻⁶ торр. Имплантацию проводили путем подачи на подложку температурой 300 К (неоднородность температуры при осаждении менее 3% на 100 мм) прямоугольных импульсов длительностью 10 мкс и частотой 1 кГц отрицательного ускоряющего потенциала 2 и 5 кВ. Дозу имплантации (см. ниже) определяли по величине ионного тока через образец в течение следования импульсов.

В результате имплантации были получены две серии образцов: при ускоряющем потенциале 2 кВ (*N1EI*, *N2EI*, *N7EI* и *N4EI*) и при ускоряющем потенциале 5 кВ (*N5EI*, *N6EI*, *N8EI* и *N3EI*), с дозами имплантации 6.0 · 10¹⁵ см⁻², 1.2 · 10¹⁶ см⁻², 6.0 · 10¹⁶ см⁻² и 5.0 · 10¹⁷ см⁻² соответственно. Следует отметить, что настоящая работа является продолжением работы тех же авторов и сохраняются обозначения, введенные в [12].

Контроль за состоянием микроискажений поверхности исходных подложек кремния был осуществлен методом сканирующей зондовой микроскопии на установке Nanopics 2100 (KLA-Tencor). При скане размером 5 × 5 мкм для параметров величины микрошероховатости поверхности были получены следующие значения: $\sigma_{RMS} = 0.20(5)$ нм и $\sigma_a = 0.20(5)$ нм. А после удаления естественного окисла травлением — 0.70(5) нм и 0.40(5) нм соответственно. Контроль за состоянием макроискажений поверхности подложек и образцов осуществлялся на трехмерном оптическом интерференционном анализаторе морфологии поверхности с разрешением 0.3 нм по нормали к поверхности ZYGO New View (ZYGO). Каждое измерение проводилось на участке 1.2 × 1.2 мм. Измерения показали, что максимальный перепад высот не превышает 20 нм на длине скана, равной 1.2 мм. После ПИИИ-обработки имплантированные образцы визуально имели зеркальную поверхность со слегка выраженным металлическим блеском относительно исходной подложки, что характерно для аморфизованного кремния.

Рентгеновские рефлектометрические измерения зеркального отражения выполнялись на дифрактометре SmartLab (Rigaku) (9 кВт) с угловым разрешением 15'' (CuK α_1 -излучение, параболическое градиентное зеркало, 2 шелевых Ge(220)-монокроматора с двукратным отражением, установленных по схеме Бартельса), а измерения диффузного рассеяния от внутренних слоев с гелиевыми пор-пузырями — с низким угловым разрешением (140'', параболическое градиентное зеркало).

Кривые высокоразрешающей рентгеновской рефлектометрии записывались в схеме $\omega/2\theta$ -сканирования при различных отстройках $\Delta\omega_i$. В обоих экспериментах регистрация отраженного рентгеновского излучения осуществлялась сцинтилляционным детектором с входной щелью 140''. По полученному массиву данных строилась двумерная карта интенсивности полного рассеяния (RSM — reciprocal space map).

Обработка экспериментальных данных интенсивности зеркального отражения проводилась пакетом программ, разработанных в ФТИАН РАН [15] с учетом реальной геометрии эксперимента, вклада диффузного рассеяния и усреднения по засвечиваемой пучком области поверхности образца. Модель имплантированного слоя состоит из подслоев толщиной l_i с рентгеновскими восприимчивостями χ_{0i} и переходных слоев толщиной Δl_i с линейным изменением восприимчивости. Качество обработки экспериментальных результатов соответствовало выбранному критерию χ^2 .

Исследование приповерхностных слоев образцов проводилось в просвечивающем растровом электронном микроскопе TITAN 80-300 (FEI, США) с корректором сферической абберации зонда в режимах

светлого и темного полей при ускоряющем напряжении 300 кэВ.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены изображения просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в режиме светлого поля поперечного сечения образцов $N3E1$ и $N4E1$ соответственно. Из рис. 1 видно, что при высокодозовой имплантации ионов гелия в кремний в приповерхностной области образцов формируется многослойная структура, состоящая из субслоев в разном фазовом состоянии. Как уже отмечалось в [9, 12], такая внутренняя структура наблюдается только при высокодозовой имплантации ($5.0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$).

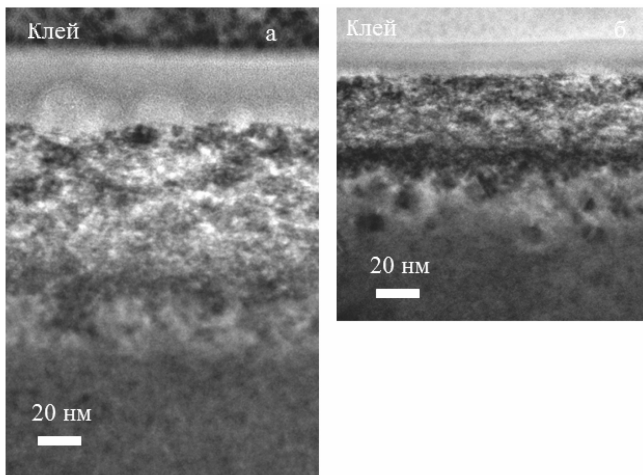


Рис. 1. Фрагменты светлопольных ПЭМ-изображений приповерхностных слоев образцов $N3E1$ (а) и $N4E1$ (б)

Этот результат находится в согласии с известными литературными данными [3]. При имплантации ионов гелия с большими дозами в результате коагуляции вакансий в приповерхностном слое аморфизованного кремния образуются поры, первоначально заполненные гелием. В результате получается инкапсулированный нанопористый слой, имеющий меньшую плотность. Рассматриваемые в настоящей работе пористые слои, в отличие от пористого кремния, полученного методом анодирования, созданы в объеме приповерхностной области кремниевых подложек. Они имеют свои особенности структуры слоев и их границ, что может заметно изменить их свойства [13, 14]. Структура пор должна зависеть от механизма радиационного повреждения подложки, свойств накопленного примесного гелия, кинетики радиационных дефектов как во время, так и после имплантации [14].

Без учета градиентных переходных субслоев основными слоями являются: аморфный слой L_A (естественный окисел и аморфизированный кремний); пористый слой L_P (пористый кремний с порами-пузырями); нарушенный слой L_D (содержащий струк-

турные дефекты, плотность которых уменьшается вглубь образца).

На рис. 2 представлены кривые ВРР от исследуемых образцов. По сравнению с низкими дозами высокодозовая имплантация гелия приводит к качественным изменениям вида кривых отражения (см. [12]). Видно, что на кривых ВРР наблюдается два вида осцилляций: ярко выраженные осцилляции вблизи критического угла полного внешнего отражения $\vartheta_C = 0.223^\circ$ и типичные толщинные осцилляции от слоев с нерезкими границами. Осцилляции 1-й группы вблизи критического угла полного внешнего отражения имеют резонансную природу и свидетельствуют о наличии внутри образца слоя с уменьшенной восприимчивостью. Подобный эффект проявляется в резонаторе Фабри–Перо.

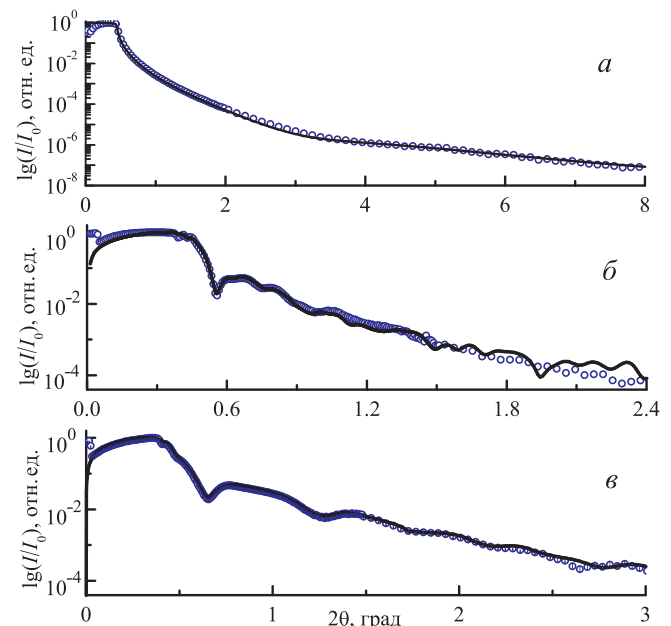


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и теоретические (сплошные линии) угловые зависимости высококоротковолновой рентгеновской рефлектометрии от исходной подложки (а), образцов $N3E1$ (б) и $N4E1$ (в)

Для восстановления профиля относительной электронной плотности (рис. 3) приповерхностных слоев образцов была осуществлена подгонка теоретических кривых ВРР под экспериментальные по модели [15] с учетом вклада диффузного рассеяния на нерегулярностях плотности.

Из рис. 3 видно, что характерной особенностью профилей плотности является наличие на глубине 15–35 нм и 30–120 нм субслоя с уменьшенной примерно на 40 % плотностью. Распределение плотности в этом внутреннем субслое неравномерно и зависит от энергии ионов. Уменьшение плотности связано с образованием пор-пузырей, представляющих собой вакансионные комплексы HeV, содержащие атомы гелия.

Как видно из рис. 3 и таблицы, толщины слоев, полученные на основе ПЭМ, хорошо согласуются с данными о толщинах слоев и их границ, вос-

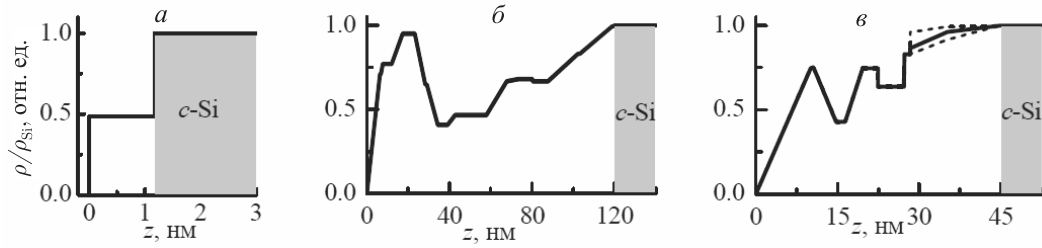


Рис. 3. Восстановленные на основе данных рентгеновской рефлектометрии профили электронной плотности по глубине приповерхностного слоя для исходной подложки (а), образцов *N3EI* (б) и *N4EI* (в). Пунктирной линией указан коридор ошибок восстановления профиля

Энергия *E* и толщины приповерхностных субслоев с различным типом нарушений:
L_A — аморфный, *L_P* — пористый, *L_D* — дефектный
 в порядке следования относительно поверхности образца

№ обр.	<i>E</i> , кэВ	ПЭМ			BPP		
		<i>L_A</i> , нм	<i>L_P</i> , нм	<i>L_D</i> , нм	<i>L_A</i> , нм	<i>L_P</i> , нм	<i>L_D</i> , нм
<i>N3EI</i>	5	38(2)	67(3)	53(2)	30–35	75–85	—
<i>N4EI</i>	2	15(1)	33(3)	42(3)	12–15	25–32	—

становленными из анализа кривых BPP. Действительно, вблизи поверхности образцов *N3EI* и *N4EI* находится переходный аморфный слой толщиной ~ 40 нм и ~ 15 нм соответственно. Максимальное значение плотности в этом субслое достигается на глубинах 20 и 10 нм, а затем уменьшается к его нижней границе. Отметим, что на рис. 1а для образца *N3EI* в переходной области аморфный слой — пористый слой явно видны крупномасштабные поры, что соответствует уменьшению электронной плотности на рис. 3б на глубине 25–30 нм. В образце *N4EI* такие поры на рис. 1б не наблюдаются, возможно, из-за влияния поверхности и меньшей, чем размер поры, толщины переходных слоев. В то же время в обоих образцах присутствует скрытый нарушенный кристаллический слой с мелкими 4–8-нанометровыми порами-пузырями и неоднородным распределением их по толщине, что соответствует «провалам» электронной плотности на рис. 3. Толщины пористых слоев, имеющих мелкие поры, равны ~ 75 и ~ 30 нм для образцов *N3EI* и *N4EI* соответственно. На ПЭМ-изображениях (рис. 1) ниже пористого слоя виден нарушенный кристаллический слой без пузырей. Наличие такого слоя не определяется методом BPP, что позволяет сделать предположение о том, что электронная плотность в этом слое с точностью до 2% не отличается от величины для объемного кремния. Суммарная толщина этих слоев совпадает с полным пробегом ионов гелия в кремний, рассчитанным при помощи SRIM-2013 [16].

Ранее как при больших [9], так и при малых [10] энергиях внедренных ионов гелия было зафиксировано появление дополнительного диффузного рассеяния при больших дозах имплантации ионов гелия в подложку кремния. Его величина превышала рассеяние на шероховатостях как от исходной под-

ложки, так и от образцов с малыми дозами имплантации. На рис. 4 представлены сечения $(\omega + \Delta\omega)/2\vartheta$ (ω, ϑ — углы поворота образца и детектора) карты RSM при $\Delta\omega = 0.1^\circ$ в области углов, исключаящих вклад зеркальной компоненты в измеряемую интенсивность. Хорошо видно, что сечения карт полного рассеяния для имплантированных образцов (рис. 4, кривые 2 и 3) существенно отличаются от сечения для исходной подложки (рис. 4, кривая 1). Наблюдаемое заметное различие в величинах интенсивности сечений однозначно говорит о наличии в приповерхностном слое имплантированных образцов большого числа рассеивающих объектов со значительным изменением плотности на их границах.

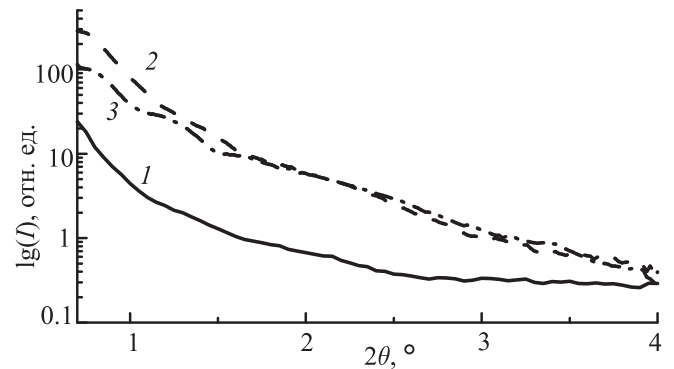


Рис. 4. Экспериментальные сечения при $\Delta\omega = 0.1'$ карты интенсивности полного рассеяния рентгеновских лучей вблизи узла 000 обратной решетки для исходной подложки (кривая 1), образцов *N3EI* (2) и *N4EI* (3)

Как видно из рис. 4, интенсивность диффузного рассеяния для образца *N3EI*, полученного при большей энергии имплантации ионов гелия, спадает сильнее, чем интенсивность рассеяния для образца *N4EI*. Эта особенность прямо свидетельствует

о наличии более крупных рассеивающих объектов в образце *N3EI*. Анализ экспериментальных данных, проведенных в рамках модели неидентичных частиц Гинье [17], показал, что в угловом диапазоне $2\theta < 2^\circ$ зависимость $\ln(I) = (1/3)(2\pi/\lambda)^2 R_0^2 (2\theta)^2$ остается линейной и возможно оценить средний электронный радиус инерции рассеивающих частиц $R_0 \approx 2$ нм и $R_0 \approx 1$ нм для образцов *N3EI* и *N4EI* соответственно.

На рис. 5 представлены ПЭМ-изображения в режиме светлого поля среза, параллельного поверхности, образцов *N3EI* и *N4EI*. Анализ полученных ПЭМ-изображений позволил оценить распределения пор n_{s0} по размерам (рис. 6). В образце *N3EI* концентрация пор составляет $7.5 \cdot 10^3$ мкм⁻², их размеры лежат в пределах 3–55 нм, а средний радиус $r_m = 3.5$ нм. В образце *N4EI* концентрация пор составляет $2 \cdot 10^4$ мкм⁻², их размеры лежат в пределах 2.5–33 нм, а средний радиус $r_m = 2$ нм.

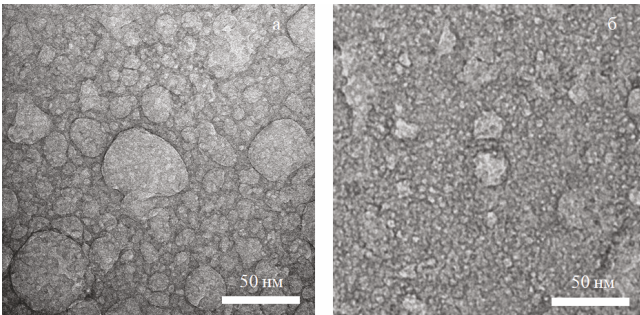


Рис. 5. Фрагменты светлополюсных ПЭМ-изображений пор-пузырей в образцах *N3EI* (а) и *N4EI* (б)

Из теории малоуглового рассеяния известно, что при высокой концентрации рассеивающих объектов интерференционный вклад от рассеяния между частицами приводит к заниженным значениям их средних размеров. Это и наблюдается в представленных результатах. Кроме этого, в картину полного рассеяния рентгеновского излучения дает вклад диффузное рассеяние на нанокристаллитах кремния, образующих стенки пор. Поэтому совпадение величин средних радиусов, определенных из данных ВРР и ПЭМ, с учетом высокой плотности пузырей можно считать удовлетворительным. Необходимо отметить,

что зависимость размера r_m гелиевых пузырей при низкоэнергетичной высокодозовой имплантации от энергии E ионов, полученная по данным ВРР и ПЭМ, совпадает: размер пузырей пропорционален энергии ионов.

Таким образом, метод ВРР может быть применен для неразрушающей диагностики границ и распределения плотности во внутренних пор-гелиевых слоях. В то же время отсутствие теоретической модели диффузного рассеяния при высоких концентрациях пор-пузырей не позволяет применить рентгеновский метод для их структурной диагностики. Однако он может быть применен в качестве неразрушающего метода для их косвенной характеристики. Для полной структурной диагностики приповерхностных пузырчатых слоев, создаваемых плазменно-иммерсионной ионной имплантацией, необходимо привлечение дополнительных методов.

Авторы выражают благодарность А. В. Мяконьких за предоставление образцов для исследований и М. А. Чуеву за интерес к работе и предоставление программы обработки данных высокоразрешающей рентгеновской рефлектометрии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке фонда РФФИ (гранты № 15-07-01228, 16-02-00887) с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ.

Список литературы

1. Farrell K. // *Rad. Eff. Defect. Sol.* 1980. **53**. P. 175.
2. Van Veen A., Griffioen C.C., Evans J.H. // *MRS Proceedings*. 1987. **107**. P. 449.
3. Ибрагимов Ш.Ш., Реутов В.Ф. Способ изготовления тонких пластин кремния. Авт. свид-во СССР № 1282757 А1. 1983.
4. Raineri V., Fallica P.G., Percolla G. et al. // *J. Appl. Phys.* 1995. **78**. P. 3727.
5. Doyle B.S., Roberds B. // US Pat. N 6740913 B2. 25 may 2004.
6. Anders A. *Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition*. New York: John Wiley & Sons, 2000.
7. Мяконьких А.В., Рогожин А.Е., Руденко Р.В., Лукичев В.Ф. // *Микроэлектроника*. 2013. **42**. С. 306. (*Myakon'kikh A.V., Rogozhin A.E., Rudenko K.V.*,

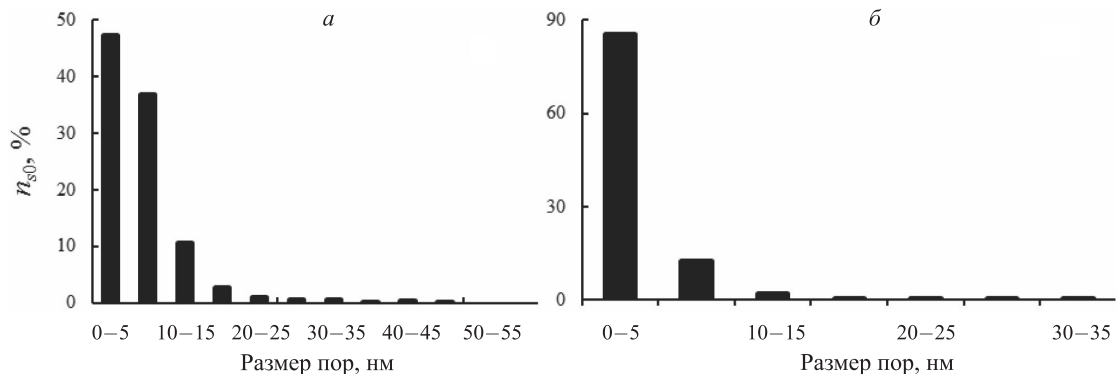


Рис. 6. Распределение пор-пузырей в образцах *N3EI* (а) и *N4EI* (б) по размерам

- Lukichev V.F. // *Russ. Microelectronics*. 2013. **42**. P. 246.)
8. Chesnokov J.M., Vasiliev A.L., Lukichev V.F., Rudenko K.V. // *J. Phys: Conf. Ser.* 2013, **471**. P. 012049.
 9. Ломов А.А., Мяконьких А.В., Руденко К.В., Чесноков Ю.М. // *Кристаллография*. 2014. **59**. С. 374. (Lomov A.A., Myakon'kikh A.V., Rudenko K.V., Chesnokov Yu.M. // *Crystallogr. Rep.* 2014, **59**. P. 331.)
 10. Dubcek P., Milat O., Pivac B. et al. // *Mater. Sci. Eng.* 2000. **B71**. P. 82.
 11. Орликовский А.А., Руденко К.В., Аверкин С.Н. // *Химия высоких энергий*. 2006. **40**. С. 220. (Orlikovskiy A.A., Rudenko K.V., Averkin S.N. // *High Energ. Chem.* 2006. **40**. P. 182)
 12. Ломов А.А., Мяконьких А.В., Орешко А.П., Шемухин А.А. // *Кристаллография*. 2016. **61**. С. 195. (Lomov A.A., Myakon'kikh A.V., Oreshko A.P., Shemukhin A.A. // *Crystallogr. Rep.* 2016. **61**. P. 173.)
 13. Desautels P.R., Bradley M.P., Steenkamp J.T., Mantyka J. // *Phys. Status Solidi (a)*. 2009. **206**. P. 985.
 14. Raineri V., Coffa S., Szilagy E. et al. // *Phys. Rev. B*. 2000. **61**. P. 937.
 15. Чуев М.А., Субботин И.А., Пашаев Э.М. и др. // *Письма в ЖЭТФ*. 2007. **85**. С. 21. (Chuev M.A., Subbotin I.A., Pashaev E.M. et al. // *JETP Lett.* 2007. **85**. P. 17.)
 16. www.srim.org
 17. Guinier A., Fournet G. *Small-angle Scattering of X-rays*. New York; London: John Wiley, 1955.

The formation of helium bubbles in silicon surface layers via plasma immersion ion implantation

A. A. Lomov^{1,a}, Yu. M. Chesnokov^{2,b}, A. P. Oreshko^{3,c}

¹ *Institute of Physics and Technology, Russian Academy of Sciences. Moscow 117218, Russia.*

² *NRC «Kurchatov Institute». Moscow 123182, Russia.*

³ *Department of Solid State Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^alomov@ftian.ru, ^bchessyura@yandex.ru, ^cap.oreshko@physics.msu.ru.

The surface layers of single-crystal silicon Si(001) substrates subjected to plasma-immersion implantation with 2- and 5-keV helium ions to a dose of $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ were probed via grazing incidence small-angle X-ray scattering and transmission electron microscopy. A surface layer formed by helium ions was found to possess a multilayer structure, wherein the upper layer is amorphous silicon, being on top of a sublayer with helium bubbles and a sublayer with a disturbed crystal structure. The in-depth electron density distribution, as well as the concentration and pore-size distribution, were established. The average pore sizes of bubbles at the above implantation energies are 4 nm and 8 nm, respectively.

Keywords: grazing incidence small-angle X-ray scattering, small-angle scattering, silicon, ion implantation, helium bubbles.

PACS: 61.05.cf; 61.05.cm; 61.72.uf; 68.37.Lp; 85.40.Ry.

Received 2 November 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2017. **72**, No. 6. Pp. 563–568.

Сведения об авторах

1. Ломов Андрей Александрович — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (499) 129-00-46, e-mail: lomov@ftian.ru.

2. Чесноков Юрий Михайлович — мл. науч. сотрудник; тел.: (499) 196-95-39, e-mail: chessyura@yandex.ru.

3. Орешко Алексей Павлович — доктор физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-12-26, e-mail: ap.oreshko@physics.msu.ru.