

УДК 538.971

## РАСПЫЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПУЧКОВ ИОНОВ ГЕЛИЯ И АРГОНА СО СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИЕЙ 10 кэВ

© 2019 г. Н. В. Волков<sup>1</sup>, \*, Д. А. Сафонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,  
115409 Москва, Россия

\*E-mail: Nvvolkov@mail.ru

Поступила в редакцию 21.06.2018 г.

После доработки 15.09.2018 г.

Принята к публикации 15.09.2018 г.

Рассмотрены особенности топографии поверхности, возникающие в результате распыления монокристаллических подложек Si различной ориентации с напыленными тонкими пленками под воздействием пучков ионов  $Ag^+$  и  $He^+$  с энергией в широком диапазоне. Показано, что толщина модифицированного слоя существенно зависит от дозы облучения. Наилучшей однородности поверхности монокристаллов кремния различной ориентации удастся достичь при одновременном облучении ионами  $Ag^+$  и  $He^+$  в отношении, близком к 1 : 1.

**Ключевые слова:** распыление, кремний, широкий энергетический спектр, тонкие пленки, топография поверхности, распределение внедренных атомов.

**DOI:** 10.1134/S020735281903020X

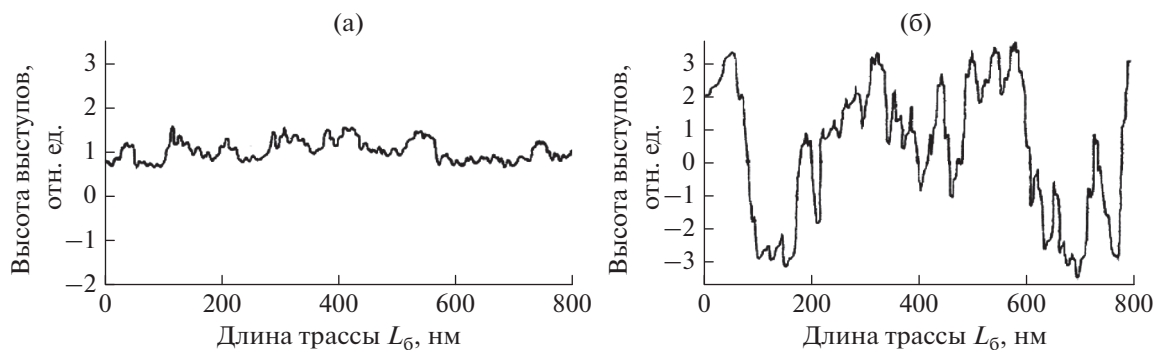
### ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своим свойствам кремний находит применение в различных областях науки и техники. В настоящее время разработаны различные физические и химические методы получения тонких слоев кремния, например, молекулярно-лучевая и газовая эпитаксия, магнетронное распыление, вакуумное дуговое испарение, ионно-лучевое распыление, импульсное лазерное и плазмохимическое осаждение покрытий [1–3]. Актуальной задачей современного полупроводникового материаловедения является получение атомно-чистых поверхностей кристаллов – подложек с высоким качеством границы раздела и заданной наноморфологией. Такая проблема возникает в связи с высокой чувствительностью электронных свойств материалов к дефектам и неоднородностям структуры, а также с перспективой их использования с целью получения спонтанно упорядоченных наноструктур – равновесных массивов трехмерных островков нанометровых размеров путем предварительного создания областей, предпочтительных для зарождения кластеров. Большое значение имеет выбор кристаллографической ориентации, который предопределен особенностями строения решетки полупроводникового материала.

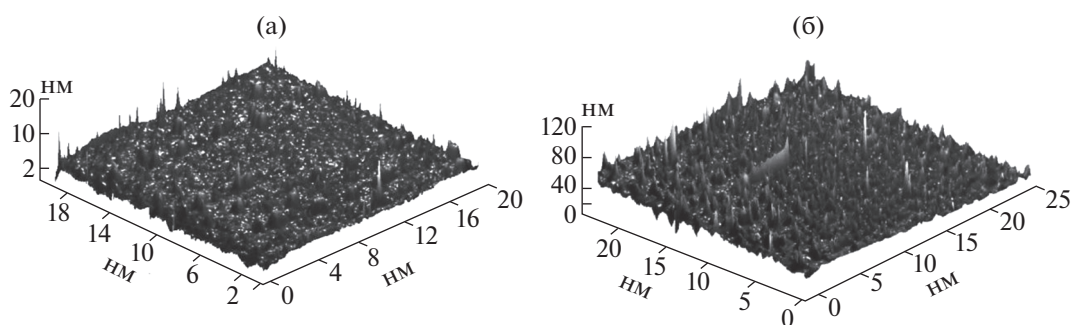
### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве материала подложки использовали пластины монокристалла кремния марки КЭФ 4.5 (ориентация (100) и (110)), КЭФ 2 (ориентация (111)), КДБ 20 (ориентация (100)). На поверхность части образцов методом термического испарения в вакууме ( $p < 1 \times 10^{-4}$  Па) напыляли пленки Al, Cu и Mo толщиной 30–40 нм. Изучение закономерностей распыления систем Al–Si, Cu–Si, Mo–Si связано с особенностями морфологии приповерхностного слоя, возникающими за счет более эффективного протекания процесса внедрения атомов пленок в материал подложки на значительные глубины [4–10].

Образцы облучали пучком ионов  $Ag^+$  и  $He^+$  на установке ВОКАЛ [11] в следующих режимах: средняя энергия ионов в пучке  $\langle E \rangle = 10$  кэВ, диапазон значений энергии ионов в пучке 1–15 кэВ, ток пучка ионов 7–10 мкА, доза облучения  $\Phi = (0.5–20) \times 10^{18}$  см<sup>-2</sup>, давление остаточных газов в области образцов при облучении не превышало величины  $p < 10^{-6}$  Па. Коэффициенты распыления определяли методами фотометрирования слоя распыленных атомов на стеклянном коллекторе, прошедшем специальную обработку. Точность измерения коэффициентов распыления составляла  $\pm 15\%$ . Массовый состав напыленного



**Рис. 1.** Нормированные профилограммы поверхности кремниевого образца марки КЭФ 4, 5 (110) в исходном состоянии (а) и после облучения пучком ионов  $\text{Ag}^+$  при дозе  $1.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  (б).



**Рис. 2.** Топография поверхности Si-подложки КЭФ 4, 5 (100) после ионного распыления пучком  $\text{Ag}^+$  при дозе облучения  $1.2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  (а) и системы Mo-Si (б).

слоя определяли методами вторично-ионной масс-спектрометрии и оже-спектрометрии.

Состояние поверхности оценено методами профилометрирования с помощью профилометра-профилографа TR-200 и атомно-силовой микроскопии (АСМ) (микроскоп Solver-P-47). Шероховатость поверхности образцов определяли согласно ГОСТ 2789-73 по формуле:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (1)$$

где  $n$  — общее число выступов (впадин) на базовой длине  $L_6$ ;  $y_i$  — величина  $i$ -го отклонения от средней линии профиля поверхности.

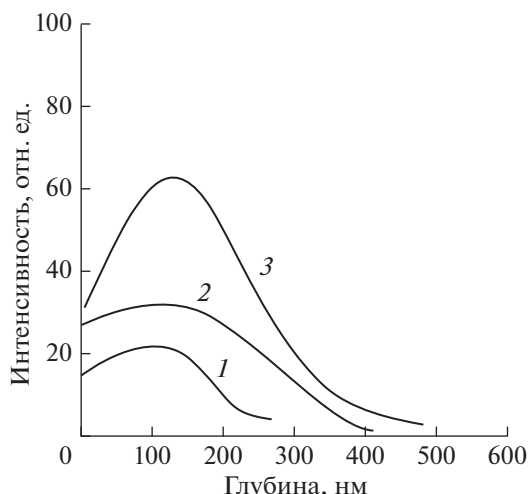
В ряде случаев для получения дополнительной информации о состоянии поверхности образцов материалов после ионного облучения использовали статистические методы, которые позволяют на основе корреляционных оценок провести сравнительную оценку образцов на протяженных участках поверхностей.

На рис. 1 представлены типичные профилограммы поверхности в исходном состоянии и после ионного облучения, измеренные на базе 0.8 мкм. Как видно из рисунка, высота выступов

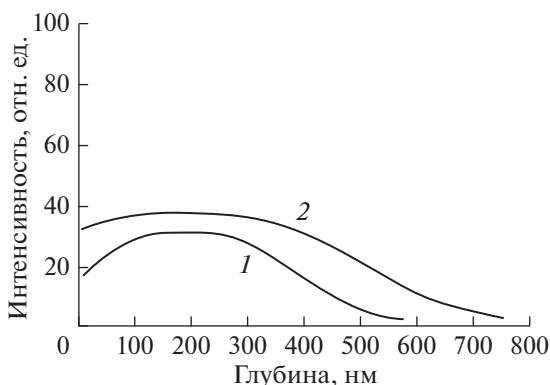
образцов в исходном состоянии находится на уровне  $\pm 5$ – $10$  нм, а после распыления их величина увеличивается до 20–30 нм.

Типовые изображения поверхности, полученные методом АСМ, приведены на рис. 2, из которого видно, что на поверхности возникают локальные образования с характерными размерами 3–10 нм. При совместном облучении ионами  $\text{He}^+$  и  $\text{Ag}^+$  шероховатость поверхности уменьшается до 5–10 нм, размеры кластеров снижаются, а их плотность возрастает почти в два раза.

На рис. 3 представлены профили распределения внедренных атомов аргона в монокристаллическую кремниевую мишень со средней энергией ионов аргона  $\langle E \rangle = 10$  кэВ, дозы облучения  $\Phi = 10^{17}$ ,  $5 \times 10^{17}$  и  $10^{18} \text{ см}^{-2}$ . Облучение  $\text{Ag}^+$  ( $\langle E \rangle = 10$  кэВ при дозе  $\Phi = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) приводит к накоплению атомов аргона у поверхности на уровне  $S(x \approx 0) = 1$  отн. ед., сохраняющемся до глубин 14–16 нм, глубина проникновения достигает величин  $X_m = 24$ – $26$  нм. Увеличение дозы облучения до  $\Phi = 5 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  формирует распределение  $S(x)$  с выраженным максимумом концентрации на глубине  $X_c = 14$ – $16$  нм, при этом величина  $X_m$  смещается вглубь до 38–40 нм. При дозе облуче-



**Рис. 3.** Распределение внедренных атомов по глубине Si-мишени, облученной пучком ионов  $Ag^+$  со средней энергией  $\langle E \rangle = 10$  кэВ при различных дозах  $\Phi$ : 1 –  $10^{17}$ ; 2 –  $5 \times 10^{17}$ ; 3 –  $10^{18}$   $cm^{-2}$ .



**Рис. 4.** Распределение внедренных атомов Al по глубине кремниевой мишени, облученной ионами  $Ag : He$  (соотношение компонент 1 : 1) со средней энергией  $\langle E \rangle = 10$  кэВ при различных дозах  $\Phi$  : 1 –  $10^{18}$ ; 2 –  $5 \times 10^{18}$   $cm^{-2}$ .

ния  $\Phi = 10^{18}$   $cm^{-2}$  максимум концентрации смещается на большие глубины:  $X_c = 14-18$  нм ( $R_p = 26-28$  нм). Величина  $X_m$  увеличивается от 24 до 38, 48 нм. Общее содержание внедренных атомов аргона растет в соотношении  $C_{Ar} = 1 : 1.5 : 2.3$  для доз  $\Phi = 10^{17}, 5 \times 10^{17}$  и  $10^{18}$   $cm^{-2}$  соответственно.

На рис. 4 в качестве примера представлены профили распределения внедренных атомов Al из пленки в монокристаллическую кремниевую мишень при облучении ионами  $Ag : He$  (соотношение компонент 1 : 1) со средней энергией ионов аргона  $\langle E \rangle = 10$  кэВ, дозы облучения  $\Phi = 10^{18}, 5 \times 10^{18}$   $cm^{-2}$ .

Облучение дозой  $\Phi = 10^{17}$   $cm^{-2}$  приводит к накоплению атомов Al у поверхности на уровне  $C(x) = 18-24$  отн. ед., сохраняющемся до глубин 300–350 нм. С увеличением дозы облучения до  $\Phi = 5 \times 10^{18}$   $cm^{-2}$  формируется распределение  $C(x)$  с постоянным уровнем концентрации на глубинах до 400 нм. Общее содержание внедренных атомов алюминия составляет 36–40 отн. ед.

Как показывают эксперименты [12–15], в основе внедрения в подложку атомов из предварительно нанесенной на поверхность образца тонкой пленки лежит совместное действие механизмов, обусловленных кинематическим [9], радиационно-стимулированным [7, 10] и физико-химическим взаимодействиями [6, 10, 13].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ состояния поверхности монокристаллов кремния после воздействия пучками ионов  $Ag^+$  и  $He^+$  с широким энергетическим спектром показал, что толщина модифицированного слоя существенно зависит от дозы облучения. Для оценки глубины внедрения атомов пленок целесообразно использовать приближения, учитывающие процесс распыления и радиационно-стимулированной миграции как внедряемых ионов газов, так и атомов пленок. Наилучшей однородности поверхности монокристаллов кремния различной ориентации удастся достичь при одновременном облучении ионами  $Ag^+$  и  $He^+$  в отношении, близком к 1 : 1.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасименко Н.Н. Кремний – материал нанoeлектроники. М.: Техносфера, 2007. 352 с.
2. Шаныгии В.Я. // ЖТФ. 2009. № 79. С. 73.
3. Ключева В.А. // Молодой ученый. 2016. № 10. С. 236.
4. Комник Ю.Ф. Физика металлических пленок, размерные и структурные эффекты. М.: Атомиздат, 1979. 264 с.
5. Yashin A.S., Safonov D.A., Kalin B.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 857. P. 1.
6. Яшин А.С., Сафонов Д.А., Волков Н.В., Калинин Б.А. // Тр. 13-й Междунар. конф. “Пленки и покрытия-2017”. С-Пб.: ПУ, 2017. С. 368.
7. Диденко А.Н., Шаркаев Ю.П. // Поверхность. 1983. № 3. С. 120.
8. Мартыненко Ю.В., Московкин П.Г. // Поверхность. 1991. № 4. С. 44.
9. Sigmund P., Gras-Marti A. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1980. V. 168. P. 389.
10. Волков Н.В., Калинин Б.А., Аталикова И.Х. и др. // Изв. АН. Сер. физ. 1998. Т. 62. № 7. С. 1477.
11. Волков Н.В., Калинин Б.А. Материаловедческие вопросы атомной техники. М.: Энергоатомиздат, 1991. 237 с.

12. *Volkov N.V.* // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron, Neutron Tech. 2012. V. 6. № 5. P. 764.
13. *Калин Б.А., Волков Н.В., Олейников И.В., Наквасин С.Ю.* // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50. № 9. Приложение. С. 162.
14. *Волков Н.В., Калин Б.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2003. № 5. С. 38.
15. *Волков Н.В., Якуткина Т.В.* // Тр. XXII междунар. конф. "Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2015" М.: НИЯУ МИФИ, 2015. Т. 3. С. 72.

## **Sputtering of Silicon Single Crystals Irradiated with Beams of Helium and Argon Ions of Mean Energy 10 keV**

**N. V. Volkov, D. A. Safonov**

The peculiarities of surface topography caused by the sputtering of single crystal Si substrates of different orientations with sputtered thin films under the influence of beams of  $\text{Ar}^+$  and  $\text{He}^+$  ions with energies in a wide range are considered. The thickness of the modified layer is shown to essentially depend on the irradiation dose. The best homogeneity of the surface of silicon single crystals of various orientations can be achieved by simultaneous irradiation with  $\text{Ar}^+$  and  $\text{He}^+$  ions in a ratio close to 1 : 1.

**Keywords:** sputtering, silicon, wide energy spectrum, thin films, surface topography, distribution of implanted atoms.