

УДК 537.534

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛНООБРАЗНОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ФОКУСИРОВАННЫМ ПУЧКОМ ИОНОВ ГАЛЛИЯ

© 2022 г. М. А. Смирнова^а, В. И. Бачурин^{а, *}, Л. А. Мазалецкий^а,
Д. Э. Пухов^а, А. Б. Чурилов^а, А. С. Рудый^а

^аЯрославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН,
Ярославль, 150007 Россия

*e-mail: vibachurin@mail.ru

Поступила в редакцию 14.08.2021 г.

После доработки 15.10.2021 г.

Принята к публикации 20.10.2021 г.

Исследованы процессы формирования микрорельефа поверхности Si(100) при облучении пучком ионов Ga⁺ с энергией 30 кэВ дозами $D = 6 \times 10^{16} - 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при углах падения $\theta = 0^\circ - 50^\circ$. Установлено, что волнообразный рельеф образуется в угловом диапазоне $\theta = 25^\circ - 35^\circ$ при $D = 2 \times 10^{17} - 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Однако хорошо воспроизводимый рельеф наблюдается при углах падения $\theta = 30^\circ \pm 2^\circ$ начиная с доз облучения $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. С увеличением D от 2×10^{17} до $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ происходит рост длины волны и амплитуды от ~150 до ~400 нм и от ~30 до ~70 нм соответственно. При $D > 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ волнообразный рельеф разрушается. Особенности формирования такого рельефа поверхности Si с помощью ионного пучка Ga⁺ являются достаточно узкий угловой диапазон, в котором образуется рельеф, и величина дозы облучения, с которой начинается его зарождение. Причинами этих особенностей могут быть преципитаты имплантированного Ga в приповерхностном слое Si и угловые зависимости коэффициента распыления и состава приповерхностного слоя Si, облученного пучком ионов Ga⁺.

Ключевые слова: распыление, волнообразный рельеф, фокусированный ионный пучок.

DOI: 10.31857/S1028096022040161

ВВЕДЕНИЕ

Облучение поверхности твердого тела методом ионной бомбардировки приводит к образованию на поверхности различного рода микро- и наноструктур. В зависимости от типа подложки, энергии и сорта ионов существует возможность формирования определенной морфологии поверхности. В последние десятилетия достаточно большой интерес вызывает формирование на поверхности материалов (полупроводников, металлов, диэлектриков) периодических структур нанометрового масштаба, в том числе синусоидального волнообразного рельефа. Этой теме посвящено большое количество работ. В обзорах [1–3] представлены основные результаты, посвященные экспериментальному и теоретическому исследованию формирования волнообразного рельефа поверхности различных материалов, облучаемых ионами инертных и химически активных газов. Экспериментально установлены основные параметры формирующихся структур в зависимости от энергии и типа ионов, угла падения, температуры образцов. В частности, для

ионов средних энергий (10–40 кэВ) определен диапазон углов падения ионного пучка, в котором наблюдается образование волнообразного рельефа. Для ионов инертных газов этот диапазон составляет $45^\circ - 60^\circ$. При использовании химически активных пучков ионов кислорода и азота такой рельеф поверхности кремния формируется при углах падения $30^\circ - 60^\circ$. В указанном угловом диапазоне наблюдаются значительный рост угловой зависимости коэффициента распыления и резкое уменьшение концентрации имплантированных ионов кислорода и азота в приповерхностном слое [4, 5]. Следует отметить, что пороговые дозы облучения (или глубины кратеров распыления), при которых начинается процесс зарождения волнообразного рельефа, существенно отличаются в случае использования ионных пучков инертных и химически активных газов. Волнообразный рельеф поверхности Si появляется при бомбардировке ионами Ag⁺ с энергией 20 кэВ на глубине кратера распыления ~44 мкм ($D = 6 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$) [6], ионами O₂⁺ с энергией

12.5 кэВ — ~1 мкм [7, 8], ионами N_2^+ с энергией 9 кэВ — 0.2 мкм [8]. Такие различия объясняются существованием преципитатов оксидов и нитридов кремния [4, 9] в приповерхностном слое при наклонном падении ионных пучков. Гетерогенность приповерхностного слоя приводит к формированию произвольного начального рельефа поверхности вследствие различия скоростей распыления кремния и его соединений, который инициирует возникновение волнообразного рельефа. Низкая растворимость азота в кремнии ($\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$) по сравнению с кислородом приводит к формированию ячеек нитрида кремния практически с самого начала ионной бомбардировки [9]. Это объясняет меньшую на порядок глубину кратеров распыления, соответствующую зарождению волнообразного рельефа под действием ионов азота по сравнению с облучением ионами кислорода. При бомбардировке ионами инертных газов накопленные крупные дефекты могут инициировать появление волнообразного рельефа, что обуславливает необходимость больших доз облучения [6].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального изучения процессов формирования микрорельефа поверхности Si при облучении пучком ионов Ga^+ с энергией 30 кэВ. Ионы этого типа являются нейтральным по отношению к Si, поскольку они не образуют химических соединений с атомами кремния. Имплантированные ионы Ga присутствуют в приповерхностном слое в виде преципитатов на глубине, сравнимой с проективным пробегом [10, 11]. Такое поведение внедренных ионов отличается от классического нейтральных атомов инертных газов. К настоящему времени имеется незначительное количество работ, посвященных формированию рельефа под действием ионного пучка Ga^+ на поверхности Si [12, 13], стекла [14], монокристаллов алмаза [15, 16]. Следует отметить, что фокусированные пучки ионов Ga^+ широко применяют для формирования различных наноструктур на поверхности материалов. Используют различные условия облучения (угол падения, доза облучения и другие). А формирование волнообразного рельефа может приводить к изменению скорости распыления при различных отношениях амплитуда/длина волны из-за эффектов затенения [17] и воспроизводимости результатов, особенно при создании структур с высоким соотношением размеров [18].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты по облучению Si(100) пучком ионов Ga^+ с энергией 30 кэВ проводили на установке Quanta 3D 200i. Использовали пучки диа-

метром 4 мкм, 300 и 85 нм со следующими параметрами облучения: процент перекрытия ионного пучка 95% (диаметр пучка 4 мкм) и 50% (300 и 85 нм), время задержки в точке 0.1 мкс, частота сканирования 1000, 70 и 50 Гц, соответственно, тип сканирования для всех диаметров пучка — серпантин. Ток ионного пучка во всех экспериментах составлял $I = 5 \text{ нА}$, площадь растров $20 \times 20 \text{ мкм}^2$, плотность тока $j = 1.25 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$ ($7.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}$) по площади раstra и до $\sim 90 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ в точке при использовании пучка диаметром 85 нм. Влияние облучения фокусированным ионным пучком на температуру поверхности Si в области падения ионов было оценено по формулам, предложенным в [19]. Максимальное увеличение температуры в точке падения ионного пучка не превышает 8°C , что практически не влияет на процесс формирования рельефа поверхности [1, 3].

Для исследования топографии при облучении поверхности Si пучком ионов Ga^+ было выполнено несколько серий экспериментов. В первой серии углы падения ионного пучка составляли $\theta = 0^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ при дозах облучения $D = 2 \times 10^{17} - 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Во второй серии при дозе $D = 10^{18} \text{ см}^{-2}$ образцы бомбардировали при углах падения $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ и 50° . В результате проведенных экспериментов было установлено, что формирование волнообразного рельефа с высокой степенью воспроизводимости наблюдается при углах падения $\theta = 30^\circ \pm 2^\circ$. Поэтому в третьей серии были изготовлены растры при фиксированном угле падения ионного пучка $\theta = 30^\circ$ и дозах облучения $D = 6 \times 10^{16} - 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

Топографию поверхности исследовали на установке Quanta 3D 200i (in situ). Более детальное исследование всех образцов проводили ex situ в растровом электронном микроскопе (РЭМ) Supra 40. Энергия электронного пучка составляла 20 кэВ, углы падения 0° и 60° . Изображения формировали в результате детектирования обратно отраженных электронов. Для нескольких растров с волнообразным рельефом на установке Quanta 3D 200i были приготовлены поперечные срезы, которые исследовали затем в РЭМ Supra 40.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований было установлено, что формирование волнообразного рельефа поверхности Si, бомбардируемой пучком ионов Ga^+ с энергией 30 кэВ, можно наблюдать в достаточно узком диапазоне углов падения вблизи $\theta = 30^\circ$. Рельеф поверхности, сформированный в результате облучения, перпендикулярен плоскости падения первичного пучка. Этот результат совпадает с данными [12, 13]. В [12] исследования выполнены только при $\theta = 30^\circ$, а в [13] шаг изменения угла падения составлял 5° . Изуче-

ние топографии поверхности в диапазоне углов от 25° до 35° с шагом 1° выявило, что волнообразный рельеф действительно с высокой степенью воспроизводимости наблюдается при $\theta = 30^\circ \pm 2^\circ$. Хотя следует отметить, что при использовании пучка диаметром 4 мкм он образовывался в большем угловом диапазоне. На рис. 1 представлены кратеры распыления при углах падения 30° , 35° и 40° . Видно, что при $\theta = 30^\circ$ на дне кратера сформирован волнообразный рельеф перпендикулярно плоскости падения ионного пучка. При $\theta = 35^\circ$ выделяются две области, в одной из которых волновой вектор рельефа совпадает с направлением пучка, а в другой повернут на некоторый угол. В [13] сообщается о повороте волнового вектора при увеличении дозы облучения, причины которого требуют более детального изучения. При $\theta = 40^\circ$ волнообразный рельеф, перпендикулярный направлению ионного пучка, наблюдается только на краях кратера распыления. Расширение углового диапазона, в котором происходит формирование рельефа при использовании ионного пучка диаметром 4 мкм, может быть связано с достаточно широким гало ионного пучка, плотность тока которого подчиняется распределению Гаусса. Угол падения ионов на поверхность, соответствующих хвостовой части распределения, может отличаться от установленного угла падения θ . В [12] приведен волнообразный рельеф вне зоны падения пучка, сформированный под действием ионов, отвечающих хвосту распределения. Длина волны такого рельефа уменьшается от 800 до 50 нм по мере удаления от раstra распыления, что авторы [12] связывают с уменьшением плотности тока и, соответственно, дозы облучения области за пределами кратера распыления.

Дальнейшее исследование развития рельефа поверхности Si было выполнено с использованием пучка ионов Ga^+ с энергией 30 кэВ диаметром $d = 4$ мкм при $\theta = 30^\circ$. Выбор размера пучка обусловлен следующими причинами. На рис. 2 приведены изображения волнообразного рельефа, полученные при облучении Si дозой ионов 10^{18} см^{-2} , диаметр пучка $d = 4$ мкм, 300 и 85 нм. Видно, что во всех случаях возникают рельефы поверхности с близкими значениями длины волны. Однако повторяемость результатов наилучшая при использовании пучка $d = 4$ мкм с перекрытием 95%. Практически реализован случай распыления расфокусированным пучком, разворачиваемым в растр аналоговым способом. При облучении пучками с $d = 85$ и 300 нм степень перекрытия составляла 50%, и воспроизводимость результатов была не совсем удовлетворительная. Как отмечается в [20], использование фокусированных ионных пучков требует дополнительных исследований влияния параметров облучения (степени перекрытия, времени задержки пучка в точке, типа сканирования, частоты сканирования) на про-

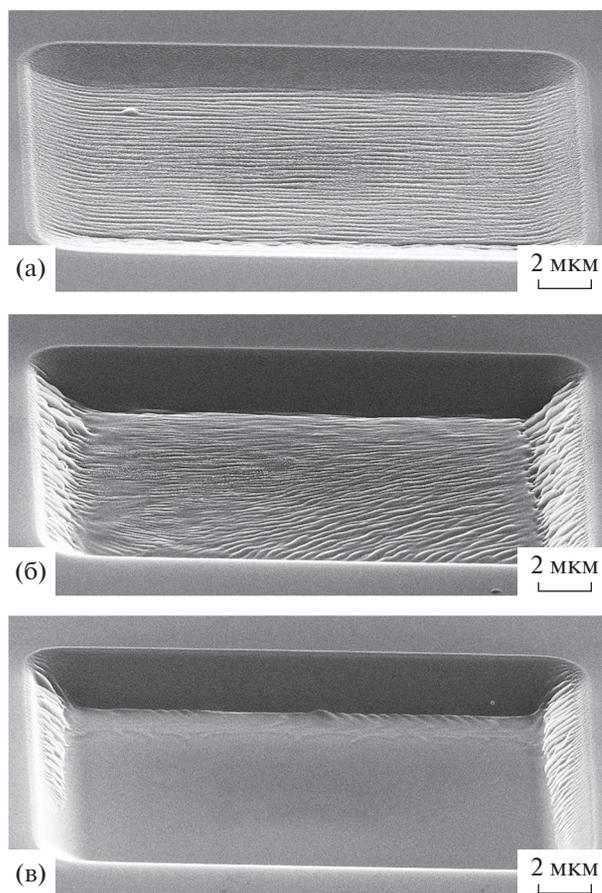


Рис. 1. РЭМ-изображения кратеров распыления Si при углах падения пучка ионов Ga^+ : а – 30° ; б – 35° ; в – 40° . Доза облучения 10^{18} см^{-2} .

цесс формирования структур на поверхности кремния.

На рис. 3 представлены РЭМ-изображения поверхности Si, полученные при различных дозах облучения. Как показано в [10], распыление Si пучком ионов Ga^+ с энергией 30 кэВ становится заметным начиная с доз $D \sim 3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, и при дозе $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ глубина кратера распыления составляет ~ 10 нм. При этой дозе облучения поверхность практически гладкая, на которой выделяются капли галлия размером несколько десятков нанометров. Ранее в [10, 11] было показано, что имплантированный Ga в приповерхностном слое существует в виде преципитатов размером ~ 10 нм, расположенные на глубине 10–20 нм. По-видимому, при $D \sim 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ преципитаты Ga появляются на поверхности и сливаются в более крупные капли (рис. 3а). Известно, что энергия сублимации, которую принимают в качестве энергии связи атомов на поверхности, составляет для Ga и Si 2.82 и 4.70 эВ соответственно. Это может приводить к тому, что из-за разницы коэффициентов распыления Ga и Si на по-

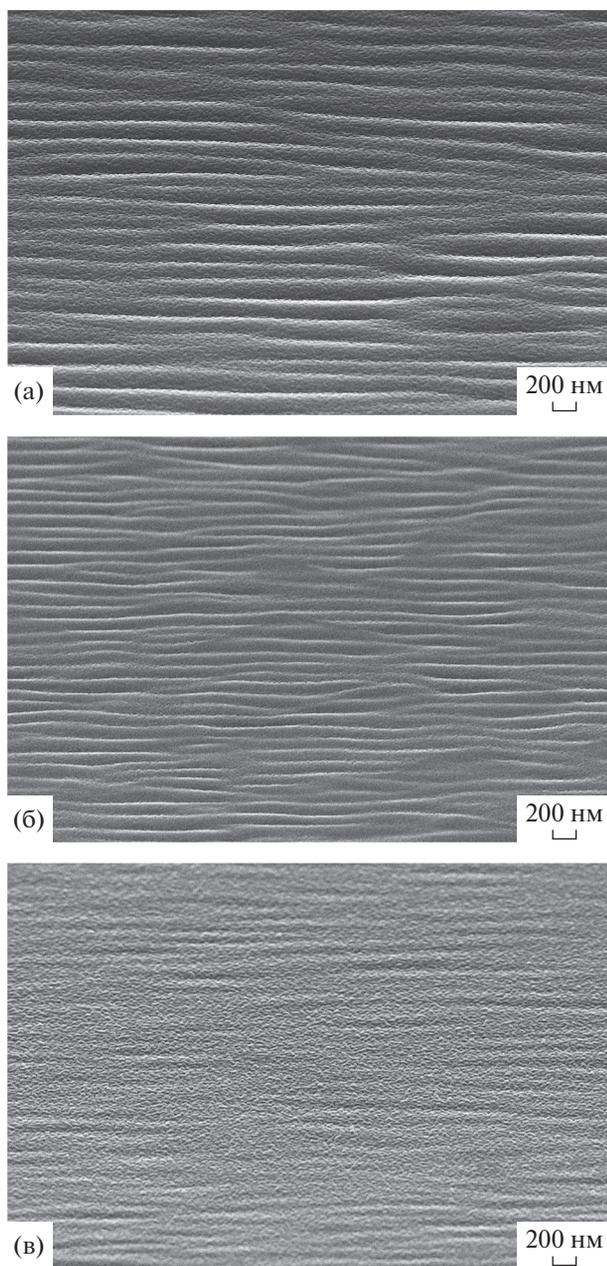


Рис. 2. РЭМ-изображения кратеров распыления Si пучком ионов Ga^+ диаметром: а – 4 мкм; б – 300; в – 85 нм. Угол падения ионов 30° , доза облучения 10^{18} см^{-2} .

верхности могут появляться топографические неоднородности. Действительно, при дозах $D = (0.9-1.5) \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ наблюдается неконтрастный неперриодический рельеф поверхности в виде холмов и впадин (рис. 3б). Периодический волнообразный рельеф начинает формироваться с дозы $D = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (рис. 3в). С ростом дозы длина волны рельефа увеличивается. На рис. 4 представлена зависимость длины волны от дозы

облучения. При дозах $D > 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ происходит разрушение волнообразного рельефа, хотя структура остается периодической со значительно большей длиной волны (рис. 3е, 4).

На рис. 5 представлены изображения поперечных срезов растров распыления при дозах облучения $D = 4 \times 10^{17}$ и $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Видно, что с ростом дозы облучения наблюдается также увеличение амплитуды волнообразного рельефа от ~ 30 до ~ 70 нм.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что формирование волнообразного рельефа поверхности Si при облучении пучком ионов Ga^+ с энергией 30 кэВ происходит в узком диапазоне углов падения $\theta = 30^\circ \pm \pm 2^\circ$ начиная с дозы облучения $D = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Появлению такого рельефа с увеличением дозы предшествует возникновение на поверхности капель Ga и неперриодического рельефа в виде холмов и впадин. Особенности формирования волнообразного рельефа являются как низкий порог дозы облучения, так и узкий диапазон углов падения ионного пучка.

Как отмечалось выше, волнообразный рельеф поверхности Si при бомбардировке ионами инертных газов с энергией десятки кэВ наблюдается при дозах облучения, близких к 10^{19} см^{-2} . Имплантированные ионы Ga не образуют химических соединений с атомами Si, т.е. являются “нейтральными”. В отличие от внедренных атомов инертных газов, растворенных в Si, имплантированные ионы Ga в приповерхностном слое Si существуют в виде преципитатов нанометрового масштаба [10, 11]. Это обстоятельство ускоряет процесс формирования волнообразного рельефа. Гетерогенный состав приповерхностного слоя из кремния и его химических соединений при бомбардировке ионами химически активных газов O_2^+ и N_2^+ позволяет на порядки снизить пороговую дозу облучения по сравнению с ионами инертных газов [4, 5] из-за различия коэффициентов распыления Si и оксидов или нитридов Si. Следует отметить, что в последнее время появилось достаточно большое количество работ, в которых рассматриваются процессы формирования рельефа поверхности различных материалов, в том числе Si, при одновременном распылении ионами инертных газов и осаждении атомов металлов [21–24] и бомбардировке ионами металлов [25]. Интересными представляются результаты и выводы [23], где рассмотрены процессы формирования рельефа на поверхности Si при облучении ионами K^+ с энергией 2 кэВ с одновременным осаждением распыленных атомов ряда металлов, как образующих, так и не образующих силициды. Было установлено, что волнообразный рельеф поверхности Si появляется лишь в случае осажде-

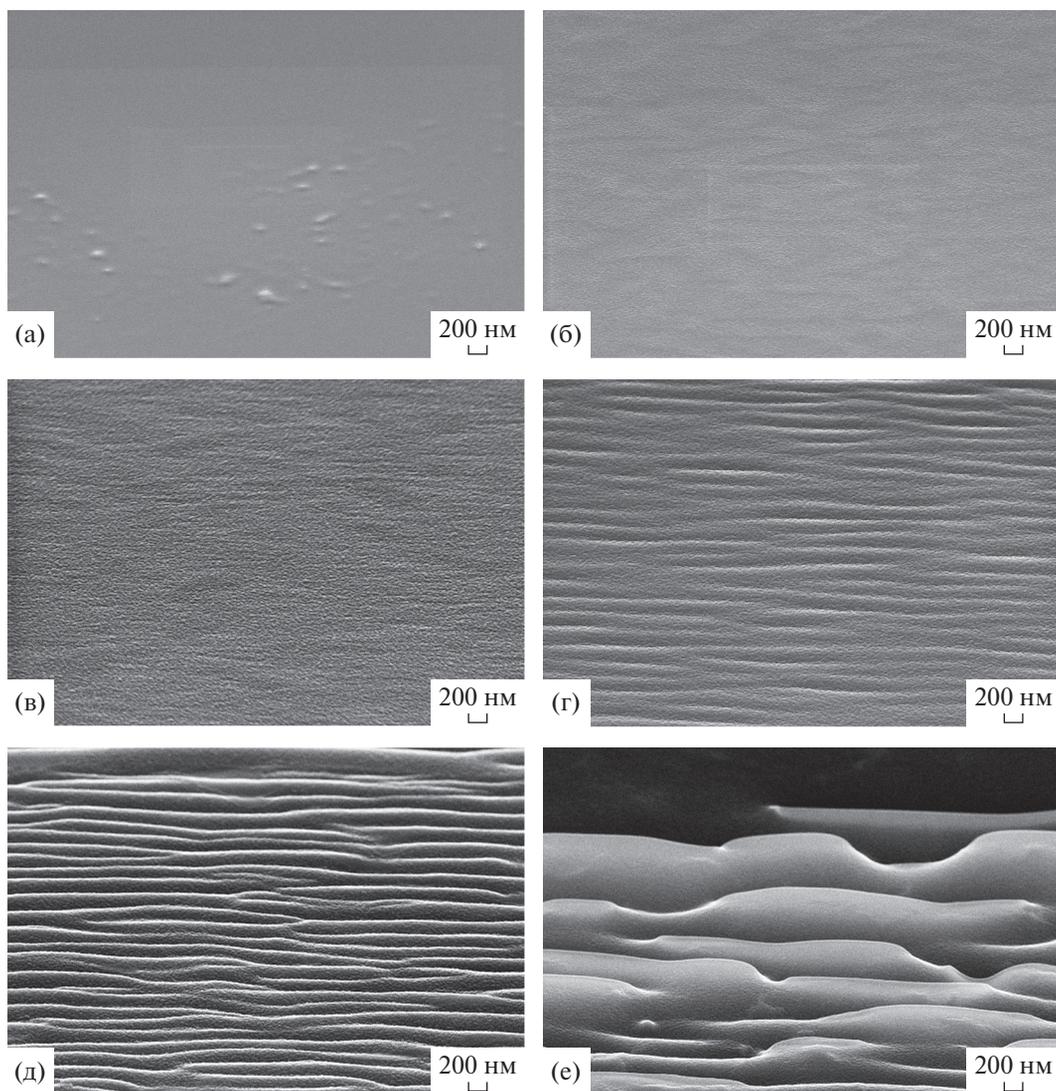


Рис. 3. РЭМ-изображения поверхности Si, облученной ионами Ga^+ под углом 30° дозами: а – 6×10^{16} ; б – 10^{17} ; в – 2×10^{17} ; г – 8×10^{17} ; д – 2×10^{18} ; е – $4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

ния металлов, образующих силициды. По мнению авторов, [22, 23], существование силицидов металлов в приповерхностном слое является одним из необходимых условий формирования волнообразного рельефа. Большая скорость распыления Si по сравнению с силицидами металлов приводит к появлению топографических неоднородностей на поверхности, инициирующих появление такого рельефа. К такому же выводу приходят авторы [25].

Влияние топографических неоднородностей на процесс формирования волнообразного рельефа изучали в нескольких работах, как экспериментальных, так и теоретических. В [26] показано, что наличие островков Au на поверхности Si приводит практически к мгновенному формированию волнообразного рельефа на поверхности Si

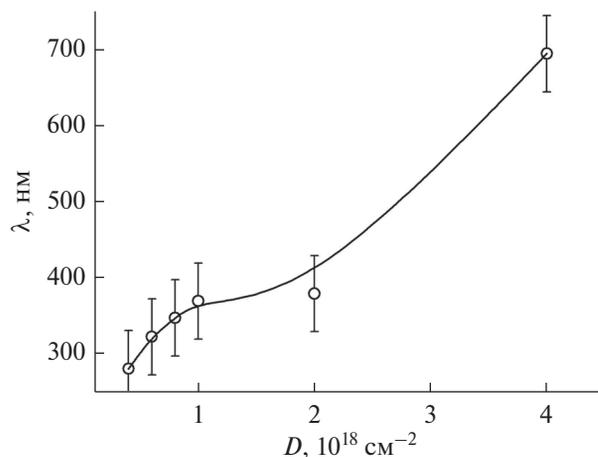


Рис. 4. Зависимость длины волны волнообразного рельефа от дозы облучения.

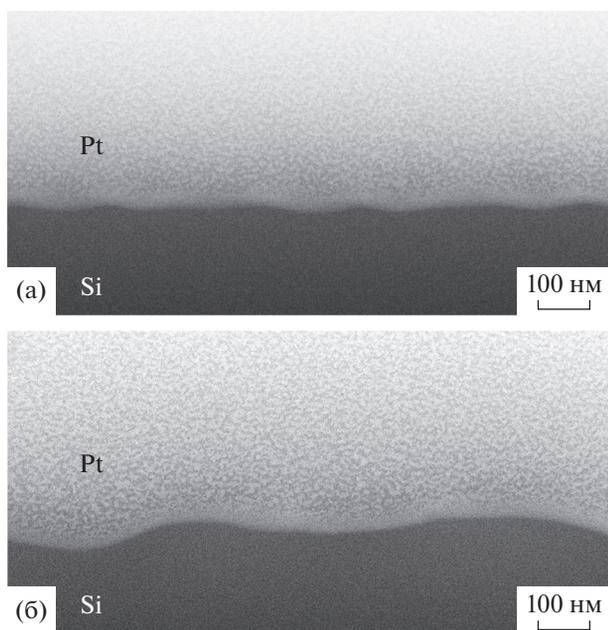


Рис. 5. РЭМ-изображения поперечного сечения волнообразного рельефа на поверхности Si, облученного пучком ионов Ga⁺ под углом 30° дозами облучения: а – 4×10^{17} ; б – 2×10^{18} см⁻².

при бомбардировке ионами N₂⁺ с такой же длиной волны, как и при облучении гладкой поверхности Si после достижения критической дозы. В [27] продемонстрировано, что создание на поверхности Si топографических неоднородностей путем химической обработки приводит к уменьшению на два порядка критической дозы облучения ионами O₂⁺ с энергией 16.7 кэВ. Как известно, одна из первых моделей, объясняющих формирование волнообразного рельефа [28], предполагает зависимость коэффициентов уравнения от локального угла падения. Однако причины появления исходной топографии поверхности, приводящей к изменению локального угла падения, не рассматриваются. Позднее в [29] была предложена нелинейная модель формирования волнообразного рельефа, в уравнение которой был введен член $\eta(x, y, t)$, учитывающий стохастический характер плотности тока падающих ионов. С практической точки зрения учет этого слагаемого представляется довольно затруднительным. Поэтому в [30] было предложено заменить его при моделировании формирования волнообразного рельефа произвольным начальным рельефом. Этот подход привел авторов к результатам моделирования структур при нормальном падении пучка, достаточно хорошо совпадающих с экспериментальными результатами. В [31] в рамках пространственно-нелокальной модели эрозии поверхности при ионной бомбардировке, осно-

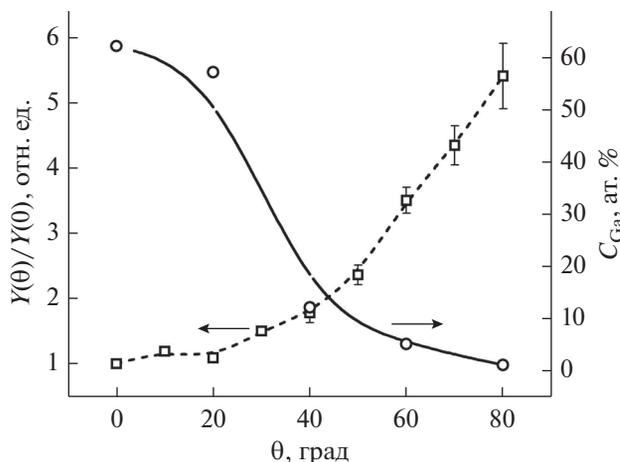


Рис. 6. Угловые зависимости нормированного коэффициента рассеяния и концентрации Ga на поверхности Si по данным [32]. Концентрация Ga на поверхности Si определена методом растровой электронной оже-спектроскопии.

ванной на зависимости локального коэффициента рассеяния и поверхностной диффузии, показано, что присутствие на поверхности неоднородности в виде ступеньки нанометрового масштаба приводит к формированию волнообразного рельефа.

Рассмотренные выше детали формирования волнообразного рельефа позволяют объяснить причину низкого значения критической дозы облучения. При дозе облучения $D = 6 \times 10^{16}$ см⁻² преципитаты Ga оказываются на поверхности в виде капель. Различие скоростей рассеяния Si и Ga приводит к формированию топографических неоднородностей в виде холмов и впадин, которая впоследствии инициирует формирование волнообразного рельефа.

Достаточно узкий диапазон углов падения пучка ионов Ga⁺, бомбардировка в котором приводит к появлению волнообразного рельефа, связана с угловыми зависимостями коэффициента рассеяния пучком ионов Ga⁺ и состава приповерхностного слоя Si (рис. 6) [32]. Видно, что при $\theta > 20^\circ$ наблюдается резкое снижение концентрации Ga как на поверхности Si, так и ее интегральное значение в приповерхностном слое. Поэтому при $\theta > 40^\circ$ содержания Ga на поверхности недостаточно для создания исходных для инициирования волнообразного рельефа топографических неоднородностей. Возможно, что формирование рельефа может наблюдаться и при больших углах падения ионного пучка, но при значительно больших дозах. При $\theta < 30^\circ$ наблюдается слабое изменение угловой зависимости коэффициента рассеяния, которое не позволяет в значительной степени обеспечить изменение локального угла падения на склоны формируемого рельефа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы процессы формирования микрорельефа поверхности Si (100) при облучении пучком ионов Ga⁺ с энергией 30 кэВ дозами $D = 6 \times 10^{16} - 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при углах падения $\theta = 0^\circ - 50^\circ$.

Установлено, что хорошо воспроизводимый волнообразный рельеф поверхности Si формируется в узком диапазоне углов падения $\theta = 30^\circ \pm 2^\circ$ начиная с дозы облучения $D = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. С увеличением D до $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ происходит рост длины волны и амплитуды от ~150 до ~400 нм и от ~30 до ~70 нм соответственно. При $D > 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ волнообразный рельеф разрушается. Возникновению такого рельефа предшествует появление капель Ga на поверхности при $D = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и неперриодического рельефа в виде холмов и впадин вплоть до формирования волнообразного рельефа при $D = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Особенностями формирования волнообразного рельефа поверхности Si под действием пучка ионов Ga⁺ являются достаточно узкий угловой диапазон и пороговая доза облучения. Причинами этих особенностей могут быть преципитаты имплантированного Ga в приповерхностном слое Si и угловые зависимости коэффициента распыления и состава приповерхностного слоя Si, облученного ионным пучком.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Ярославского филиала Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0018 на оборудовании Центра коллективного пользования “Диагностика микро- и наноструктур”.

Конфликт интересов: авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Makeev M.A., Cuerno R., Barbasi A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2002. V. 197. P. 185. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)01436-2](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01436-2)
2. *Valbusa U., Borgano C., Mongeot F.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2002. V. 14. P. 8153. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/35/301>
3. *Munoz-Garcia J., Vazquez L., Castro M. et al.* // Mater. Sci. Eng. R. 2014. V. 86. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.09.001>
4. *Wittmaack K.* // Surf. Interf. Anal. 2000. V. 29. P. 721. [https://doi.org/10.1002/1096-9918\(200010\)29:10%3C721::AID-SIA916%3E3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1096-9918(200010)29:10%3C721::AID-SIA916%3E3.0.CO;2-Q)
5. *Bachurin V.I., Lepshin P.A., Smirnov V.K.* // Vacuum. 2000. V. 56. P. 241. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(99\)00194-3](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(99)00194-3)
6. *Carter G., Vishnyakov V.* // Surf. Interf. Anal. 1995. V. 23. P. 514. <https://doi.org/10.1002/sia.740230711>
7. *Elst K., Vandervorst W.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1994. V. 12. P. 3205. <https://doi.org/10.1116/1.579239>
8. *Smirnov V.K., Kibalov D.S., Krivelevich S.A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1999. V. 147. P. 310. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00610-7](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00610-7)
9. *Бачурин В.И., Лепшин П.А., Смирнов В.К., Чурилов А.Б.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1998. Т. 62. С. 703.
10. *Frey L., Lehrer C., Ryssel H.* // Appl. Phys. A. 2003. V. 76. P. 1017. <https://doi.org/10.1007/s00339-002-1943-1>
11. *Rommel M., Spoldi G., Yanev V. et al.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2010. V. 28. P. 595. <https://doi.org/10.1116/1.3431085>
12. *Habenicht S., Lieb K.P., Koch J., Wieck A.D.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. P. 115327. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.115327>
13. *Qian H.X., Zhou W.* // Mater. Lett. 2012. V. 77. P. 113. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.03.003>
14. *Gnaser H., Reuscher B., Zeuner A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2012. V. 285. P. 142. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.05.028>
15. *Datta F., Yuh-Renn Wu., Wang Y.L.* // Phys. Rev. D. 2001. V. 63. P. 125407. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.63.125407>
16. *Adams D.P., Vasile M.J., Mayer T.M., Hodges V.C.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2003. V. 21. P. 2334. <https://doi.org/10.1116/1.1619421>
17. *Carter G.* // J. Appl. Phys. 1999. V. 83. P. 455. <https://doi.org/10.1063/1.369408>
18. *Moberly Chan W.* // MRS Proceed. 2006. V. 960. P. 0960-N10-02-LL06-02. <https://doi.org/10.1557/PROC-0960-N10-02-LL06-02>
19. *Meingails J.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 1987. V. 5. P. 469. <https://doi.org/10.1116/1.583937>
20. *Kots I.N., Kolomitsev A.S., Lisitsyn S.A. et al.* // Russ. Microelectron. 2019. V. 48. № 2. P. 72. <https://doi.org/10.1134/S1063739719020057>
21. *Masko S., Frost F., Ziberi B. et al.* // Nanotechnol. 2010. V. 21. P. 085301. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/8/085301>
22. *Zhang K., Bobes O., Hofsass H.* // Nanotechnol. 2014. V. 25. P. 085301. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/8/085301>
23. *Engler M., Frost F., Muller S. et al.* // Nanotechnol. 2014. V. 25. P. 115303. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/11/115303>
24. *Liu Y., Hirsch D., Fechner R. et al.* // Appl. Phys. A. 2018. V. 124. P. 73. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1393-4>
25. *Redondo-Cubero A., Lorenz K., Palomares F.J. et al.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2018. V. 30. P. 274001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aac79a>
26. *Смирнов В.К., Кибалов Д.С., Лепшин П.А., Бачурин В.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2000. Т. 64. С. 626.

27. *Karmakar P., Mollick S.A., Ghose D., Chakrabarti A.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 103102. <https://doi.org/10.1063/1.2974086>
28. *Bradley R.M., Harper M.E.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. V. 6. P. 2390. <https://doi.org/10.1116/1.575561>
29. *Cuerno R., Barbasi A.I.* // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 4746. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.4746>
30. *Kahng B., Jeong H., Barbasi A.I.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. P. 805. <https://doi.org/10.1063/1.1343468>
31. *Рудый А.С., Бачурин В.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72. № 5. С. 622.
32. *Bachurin V.I., Zhuravlev I.V., Pukhov D.E. et al.* // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2020. V. 14. № 4. P. 784. <https://doi.org/10.1134/S1027451020040229>

Features of the Formation of Ripple Structures on the Silicon Surface under Irradiation with a Focused Gallium Ion Beam

M. A. Smirnova¹, V. I. Bachurin¹*, L. A. Mazaletsky¹, D. E. Pukhov¹, A. B. Churilov¹, A. S. Rudy¹

¹Valiev Institute of Physics and Technology RAS, Yaroslavl branch, Yaroslavl, 150007 Russia

*e-mail: vibachurin@mail.ru

The processes of microrelief formation on the Si(100) surface under irradiation with a 30 keV Ga⁺ ion beam with doses $D = 6 \times 10^{16} - 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ at angles of incidence $\theta = 0^\circ - 50^\circ$ were investigated. It was found that a ripple structure was formed in the angular range $\theta = 25^\circ - 35^\circ$ at $D = 2 \times 10^{17} - 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. However, a well reproducible ripple structure was observed at angles of incidence $\theta = 30^\circ \pm 2^\circ$ starting from irradiation doses of $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. With an increase in D from 2×10^{17} to $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, the wavelength and amplitude increased from ~ 150 to ~ 400 nm and from ~ 30 to ~ 70 nm, respectively. At $D > 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, the ripple structure was destroyed. The features of the formation of such a relief of the Si surface using a Ga⁺ ion beam are a rather narrow angular range in which the relief is formed and the value of the irradiation dose at which its nucleation begins. The reasons for these features may be the precipitates of implanted Ga in the near-surface Si layer and the angular dependences of the sputtering yield and composition of the near-surface Si layer irradiated with a Ga⁺ ion beam.

Keywords: sputtering, ripples, focused ion beam.