

03;06

Полировка поверхности сверхтвердых материалов пучками газовых кластерных ионов

© А.Е. Иешкин¹, К.Д. Кушкина¹, Д.С. Киреев¹,
Ю.А. Ермаков², В.С. Черныш^{1,2}

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

² НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва
E-mail: ieshkin@physics.msu.ru

Поступило в Редакцию 16 августа 2016 г.

Проведено исследование влияния облучения газовыми кластерными ионами на топографию поверхности карбида кремния и алмаза. С помощью атомно-силовой микроскопии показано, что воздействие на эти материалы кластерных ионов с энергией 10 keV и дозами более 10^{16} cm^{-2} приводит к сглаживанию рельефа поверхности. Приведены оценки скорости травления и эффективности сглаживания рельефа в зависимости от толщины удаленного слоя вещества. С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света продемонстрировано отсутствие дефектов, вносимых облучением кластерными ионами в объем мишени.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.02.44182.16459

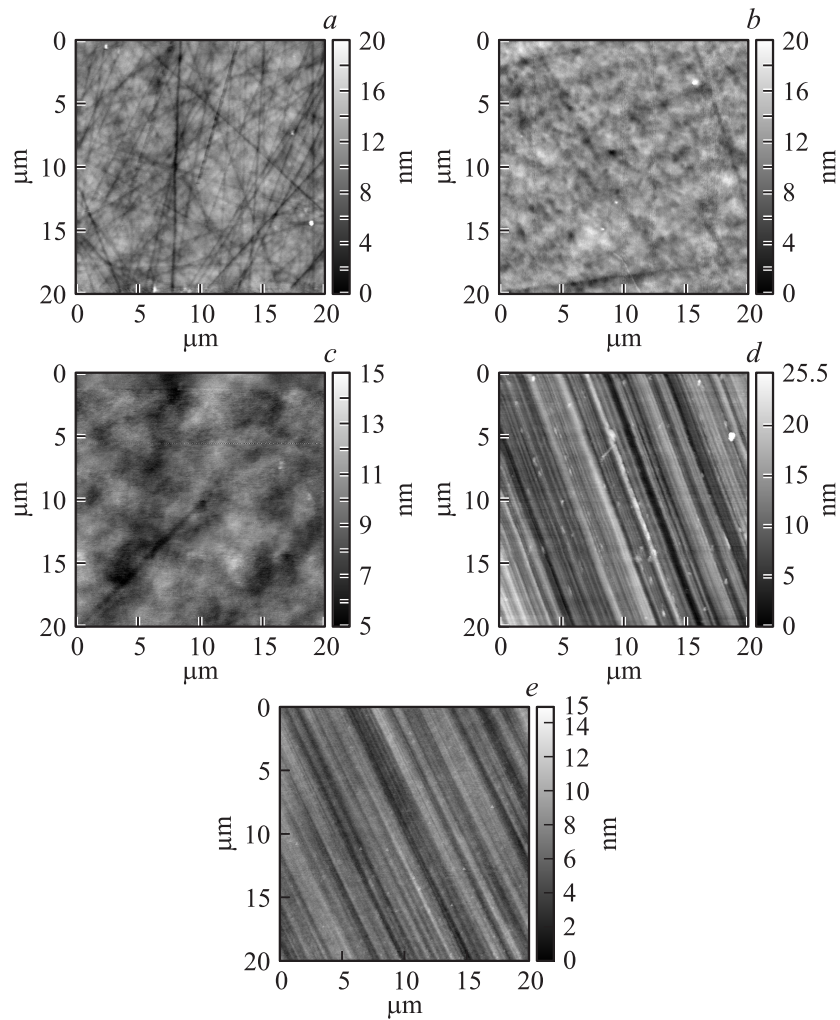
Перспективными материалами современной электроники являются карбид кремния (SiC) и алмаз. Они обладают высокой температурой Дебая, характеризующей устойчивость к внешним тепловым воздействиям, а также большими значениями теплопроводности и радиационной стойкости. В связи с этим активно исследуются возможности создания на их основе элементов силовой и высокочастотной электроники, в том числе с использованием технологий эпитаксиального осаждения многослойных структур [1–3]. Однако для формирования таких структур необходимо обеспечить высокое качество топографии и кристаллической структуры подложек и интерфейсных слоев. Это может представлять сложность, поскольку и карбид кремния, и алмаз являются сверхтвердыми материалами и с трудом поддаются

механической обработке. Таким образом, актуальной задачей является исследование процессов сглаживания поверхности этих материалов без использования технологий, подразумевающих применение абразивной полировки. В данной работе проведено исследование эффекта сглаживания нанорельефа поверхности подложек из алмаза и карбида кремния с помощью ускоренных газовых кластерных ионов.

Образцы карбида кремния политипа $6H$ -SiC с кристаллографической ориентацией $\langle 0001 \rangle$ и синтетического монокристаллического алмаза с ориентацией $\langle 111 \rangle$, поверхность которых была предварительно отполирована механически, облучались ускоренными газовыми кластерными ионами на ускорителе МГУ им. М.В. Ломоносова [4]. Для формирования кластеров аргона с размерами в диапазоне от единиц атомов до 5000 атомов в указанном ускорителе используется охлаждение рабочего газа при его адиабатическом расширении через сверхзвуковое сопло. Затем полученные кластеры ионизируются электронным ударом, при этом они приобретают заряд в несколько элементарных единиц заряда и ускоряются разностью потенциалов 10 кВ. Атомарные ионы и легкие кластеры с размерами менее 70 атомов отклоняются из пучка в постоянном магнитном поле, после чего осуществляется взаимодействие ускоренных кластерных ионов с мишенью. Давление остаточных газов в вакуумной камере образца во время эксперимента не превышало $6 \cdot 10^{-4}$ Па. Нужно отметить, что кинетическая энергия каждого отдельного атома, составляющего кластер, не превышает десятков электронвольт. Такие низкие значения энергии взаимодействия обеспечивают бездефектную обработку поверхности.

Состояние поверхности образцов до облучения и после него исследовалось с помощью комплекса NT-MDT Интегра спектра, использующего методики атомно-силовой микроскопии и конфокальной спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света. АСМ-изображения снимались в полуконтактном режиме, размеры сканов составляли $20 \times 20 \mu\text{m}$ с разрешением 512×512 точек. Кроме того, были получены КР-спектры, позволяющие судить о структурных изменениях поверхности под действием облучения.

На рисунке, *a, d* представлены АСМ-изображения поверхности карбида кремния и алмаза после механической обработки. На поверхности SiC видны хаотические линейно структурированные дефекты — так называемый „алмазный фон“, т.е. царапины, оставленные абразивным материалом. Среднеквадратичная шероховатость поверхности,



Атомно-силовые изображения топографии поверхности карбида кремния (*a–c*) и алмаза (*d, e*): *a, d* — до облучения, *b* — после облучения с дозой $2.5 \cdot 10^{16}$ ion/cm², *c, e* — после облучения с дозой $5 \cdot 10^{16}$ ion/cm².

Среднеквадратичная шероховатость рельефа поверхности карбида кремния и алмаза при различных дозах облучения

Облучаемый материал	Доза облучения, 10^{16} ion/cm ²	Среднеквадратичная шероховатость, nm
SiC	0	2.41
	2.5	2.18
	5.0	1.09
Алмаз	0	3.23
	2.5	2.39
	5.0	1.62

полученная усреднением значений по трем сканам, составляла 2.41 nm. В случае алмаза рельеф поверхности образован царапинами, имеющими одинаковое направление, с глубиной 2–6 nm и характерным периодом около 2 μ m. Среднеквадратичная шероховатость исходного рельефа алмаза 3.23 nm.

Дозы облучения кластерными ионами и соответствующие значения среднеквадратичной шероховатости приведены в таблице. Динамика изменения рельефа карбида кремния под действием облучения кластерными ионами отражена на рисунке, *b* и *c*. Приведенные АСМ-изображения позволяют сделать вывод, что под действием облучения на поверхности SiC сначала становятся менее выраженными царапины и формируется хаотический рельеф, связанный с воздействием на поверхность ионов. Численное значение шероховатости при этом практически не уменьшается. Затем происходит сглаживание хаотических шероховатостей, в ходе которого снижается среднеквадратичная величина шероховатости.

Во время одного из этапов облучения часть образца была закрыта маской. Затем с помощью атомно-силового микроскопа измерялась высота полученной ступеньки травления. Определенная таким образом скорость удаления вещества составила 70 nm на 10^{16} cm⁻². Эта величина близка к значению, полученному в работе [5] при ускоряющем потенциале 20 kV, и несколько превосходит его за счет того, что в нашем эксперименте нижняя граница диапазона масс кластерных ионов была меньше. Следовательно, на образец попадали кластеры с большим значением энергии, приходящейся на один составляющий атом, эффек-

тивно увеличивающие интегральный коэффициент распыления. Общая толщина слоя, удаленного при кластерной обработке поверхности, составила 350 nm.

В случае алмаза (см. рисунок, *e*) характер рельефа под действием облучения не изменился. Тем не менее значение шероховатости уменьшилось до значения 1.62 nm. Определенная скорость травления составила 16 nm на 10^{16} ion/cm², а толщина удаленного слоя — 80 nm. Эти значения меньше аналогичных значений для карбида кремния, что объясняется большей энергией связи атомов на поверхности алмаза и недостаточно эффективным его распылением кластерами данных энергий.

В [6] на рамановском спектре алмазной пленки, облученной несепарированным по массам пучком кластерных ионов, обнаружен широкий пик в области 1600 cm^{-1} . Его появление связано с наличием в пучке атомарных ионов, приводящих к графитизации и, следовательно, к ухудшению оптических и электрических характеристик алмаза. Для удаления графитизированного слоя авторы предлагают использовать следующее низкодозовое облучение химически активными кластерами.

В наших экспериментах из пучка частиц удалялись атомарные ионы и легкие кластеры. В результате на спектрах комбинационного рассеяния, снятых после облучения, никаких изменений отмечено не было, пик 1600 cm^{-1} не наблюдался, т.е. осуществлялась бездефектная обработка поверхности. Такие результаты подтверждают выводы статьи [7], в которой бездефектность травления монокристаллического кремния была продемонстрирована с помощью резерфордовского обратного рассеяния в режиме каналирования.

Таким образом, был продемонстрирован эффект сглаживания поверхности сверхтвердых монокристаллических веществ при облучении газовыми кластерными ионами. Такая технология является универсальной по отношению к обрабатываемому материалу, однако для наиболее эффективного воздействия на поверхность необходим выбор энергии и дозы облучения в зависимости от эффективности распыления и величины рельефа данного материала. Показано, что ускоренные кластерные ионы не вносят дефектов в кристаллическую структуру обрабатываемого вещества. Все это делает пучки ускоренных газовых кластерных ионов перспективным инструментом финишной обработки широкого спектра полупроводниковых и оптических материалов, в том числе сверхтвердых кристаллов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект RFMEFI57814X0064.

Список литературы

- [1] *Лебедев А.А., Давыдов С.Ю., Сорокин Л.М., Шахов Л.В.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 23. С. 89–94. [*Lebedev A.A. et al.* // *Tech. Phys. Lett.* 2015. V. 41. N 12. P. 1156–1158].
- [2] *Вавилов В.С.* // УФН. 1997. Т. 167. № 1. С. 17–22. [*Vavilov V.S.* // *Phys. Usp.* 1997. V. 40. P. 15–20].
- [3] *Kubota A., Fukuyama S., Ichimori Y., Touge M.* // *Diamond Relat. Mater.* 2012. V. 24. P. 59–62. [*Kubota A. et al.* // *Diamond Relat. Mater.* 2012. V. 24. P. 59–62].
- [4] *Andreev A.A., Chernysh V.S., Ermakov Yu.A., Ieshkin A.E.* // *Vacuum.* 2013. V. 91. P. 47–53. [*Andreev A.A. et al.* // *Vacuum.* 2013. V. 91. P. 47–53].
- [5] *Fathy D., Holland O.W., Liu R. et al.* // *Mater. Lett.* 2000. V. 44. P. 248–252. [*Fathy D. et al.* // *Mater. Lett.* 2000. V. 44. P. 248–252].
- [6] *Toyoda N., Hagiwara N., Matsuo J., Yamada I.* // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1999. V. 148. P. 639–644. [*Toyoda N. et al.* // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1999. V. 148. P. 639–644].
- [7] *Иешкин А.Е., Шемухин А.А., Ермаков Ю.А., Черныш В.С.* // ВМУ. Сер. 3. 2016. № 1. С. 72–76. [*Ieshkin A.E. et al.* // *Moscow University Physics Bulletin.* 2016. V. 71. N 1. P. 87–90].