

ISSN 1561-2430 (Print)
ISSN 2524-2415 (Online)
УДК 539.23; 539.216.1

Поступила в редакцию 20.10.2017
Received 20.10.2017

В. В. Углов

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ЦИРКОНИЯ И КРЕМНИЯ, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Аннотация. Работа посвящена исследованию процессов эрозии поверхности многослойных пленок ZrN/SiN_x , облученных ионами He (30 кэВ) и отожженных в вакууме при $T = 600$ °С. Выявлено, что многослойные пленки ZrN/SiN_x остаются устойчивыми к образованию блистеров и отшелушиванию при облучении ионами He (30 кэВ) до дозы $8 \cdot 10^{16}$ см⁻². Обнаружено влияние толщины кристаллического и аморфного слоя на характер и степень эрозии поверхности многослойных пленок в результате пострadiационного отжига при $T = 600$ °С. Обсуждаются возможные механизмы блистеринга и отшелушивания в многослойных системах ZrN/SiN_x .

Ключевые слова: блистер, отшелушивание, многослойные пленки, облучение ионами

Для цитирования. Углов, В. В. Эрозия поверхности многослойных пленок на основе нитридов циркония и кремния, облученных ионами гелия / В. В. Углов // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 110–118.

V. V. Uglov

Belarusian State University, Minsk, Belarus

SURFACE EROSION OF MULTILAYER FILMS BASED ON ZIRCONIUM AND SILICON NITRIDES IRRADIATED WITH HELIUM IONS

Abstract. The article is devoted to the investigation of surface erosion of ZrN/SiN_x multilayer films irradiated with He ions (30 keV) and annealed in vacuum at 600 °C. It was found that multilayer ZrN/SiN_x films remain resistant to blistering and flaking when irradiated with He ions (30 keV) up to a dose of $8 \cdot 10^{16}$ cm⁻². The influence of the thickness of the crystalline and amorphous layer on the surface erosion nature and degree of multilayer films as a result of post-radiation annealing at 600 °C are revealed. The possible mechanisms of blistering and flexing in multilayer systems ZrN/SiN_x are discussed in the work.

Keywords: blister formation, flexing, multilayer films, ion irradiation

For citation. Uglov V. V. Surface erosion of multilayer films based on zirconium and silicon nitrides irradiated with helium ions. *Vestsi Natsyional'nei akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 110–118 (in Russian).

Введение. Развитие ядерных реакторов нового поколения требует создания материалов и покрытий с высокой радиационной стойкостью [1–3]. Для достижения этой цели необходимо создавать материалы с большим числом стоков дефектов, таких как дислокации, границы зерен и межфазные границы [4, 5]. Эти стоки должны обладать способностью эффективно поглощать радиационно-индуцированные дефекты и их кластеры. Многослойные системы перспективны для исследования в качестве радиационно стойких материалов из-за того, что межслойные границы могут влиять на удаление радиационно-индуцированных дефектов. Они имеют значительные межфазные области, которые могут действовать как устойчивые стоки дефектов [5–7].

Полученные в последнее время результаты однозначно показали, что кристаллические/аморфные наноструктурированные многослойные пленки проявляют высокую радиационную устойчивость благодаря уникальным свойствам кристаллических/аморфных границ и аморфных нанослоев, связанных с превосходной способностью поглощать дефекты [8]. Максимальная радиационная стойкость для таких пленок наблюдалась при малой толщине слоев (2–5 нм) [5, 8–10], т. е. при высокой плотности межфазных границ. Образование блистеров (дефектов на поверхности материала в виде пузырей) при облучении ионами He является одним из наиболее важных

процессов, приводящих к изменению поверхностных физико-химических свойств и потере структурной целостности материала, что в конечном итоге ухудшает характеристики самого материала [11–14]. Под действием облучения ионами He в пленках, как и в массивных материалах, формируются блистеры, благодаря зарождению и росту газовой-вакансионных кластеров. Внедрение He в пленку часто приводит к росту сжимающих напряжений. Последующая релаксация напряжений может проявляться в форме расслоения (формирования трещины) в пленке, что приводит к образованию блистера или отшелушиванию пленки [15, 16]. Наличие дополнительных стоков в многослойных наноструктурированных пленках может существенным образом повлиять на зарождение и рост газовой-вакансионных кластеров, приводящих к образованию блистеров.

Целью настоящей работы является исследование влияния толщины слоев, дозы облучения ионами He⁺ с энергией $E = 30$ кэВ и пострadiaционного отжига на процессы эрозии поверхности многослойной пленки ZrN/SiN_x.

Методика эксперимента. Многослойные покрытия ZrN/SiN_x были сформированы методом реактивного магнетронного распыления в высоковакуумной камере. Покрытия осаждали на Si-подложку со слоем SiO₂ толщиной 10 нм. Многослойные покрытия с толщиной слоев от 2 до 10 нм формировались при температуре 300 °С. Общая толщина пленок составляла 250–290 нм, осаждение начиналось со слоя ZrN. (Более подробно процесс формирования многослойных пленок описан в [17].) Ионное облучение образцов проводилось с использованием He⁺ с энергией $E = 30$ кэВ на ионном имплантате EATON NV3206. Интегральная доза варьировалась от $1 \cdot 10^{15}$ до $8 \cdot 10^{16}$ см⁻². Энергетические параметры облучения были выбраны так, чтобы глубина залегания имплантированного гелия не превышала толщину покрытия (программа SRIM-2012 [18]). После облучения He пленки подвергались отжигу в вакууме ($2 \cdot 10^{-4}$ Па) при $T = 600$ °С в течение 2 ч в кварцевой трубчатой печи.

Микроструктура поверхности облученных пленок до и после термического отжига изучалась с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе LEO 1455 VP и атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47 Pro. Толщина пленок определялась на поперечных сколах методом сканирующей электронной микроскопии.

Исходные пленки. Результаты микроскопических исследований исходных пленок, более подробно описанные в работе [17], показали, что сформированные пленки представляют собой латерально непрерывные чередующиеся слои с плоскими и резкими границами. Слои ZrN и SiN_x четко разделяются, что указывает на их несмешиваемость. Слои ZrN имеют поликристаллическую микроструктуру, а SiN_x – аморфную. Кристаллический ZrN обладает столбчатой структурой и преимущественной ориентацией кристаллитов (002). Таким образом, исходные многослойные пленки ZrN/SiN_x представляют собой чередующиеся слои нанокристаллического нк-ZrN и аморфного а-SiN_x.

Облученные пленки. Исследования поверхности многослойных пленок ZrN/SiN_x, облученных ионами гелия с энергией (30 кэВ) и дозами от $1 \cdot 10^{15}$ до $8 \cdot 10^{16}$ см⁻², не выявили следов формирования блистеров и/или отшелушивания, в связи с чем изображения их поверхности в статье не представлены. Эрозия поверхности для пленок собственно нитрида циркония и кремния также не была обнаружена. Согласно литературным данным [14], формирование блистеров в покрытиях происходит при достижении критической дозы. Известно, что при низкотемпературном облучении ионами гелия (30 кэВ) она составляет $4 \cdot 10^{17}$ см⁻² и превышает дозу облучения, используемую в данной работе ($8 \cdot 10^{16}$ см⁻²).

Следует подчеркнуть, что интенсификация процессов блистерообразования обычно происходит при повышенных температурах облучения [15], что существенным образом ускоряет миграционные процессы, а также кластеризацию дефектно-примесной системы, приводящую к блистерингу. В радиационном материаловедении имитация данных процессов возможна при пострadiaционном отжиге. В связи с этим все сформированные пленки были подвергнуты пострadiaционному термическому отжигу в вакууме при $T = 600$ °С.

На рис. 1–3 и в таблице представлены систематизированные результаты многочисленных микроскопических исследований поверхности образцов, облученных ионами He и подвергнутых пострadiaционному отжигу. Исследования показали, что пострadiaционный отжиг всех изучаемых пленок, облученных до доз $1 \cdot 10^{15}$ и $5 \cdot 10^{15}$ см^{-2} , не приводит к формированию блистеров, а также к отшелушиванию.

Характеристики эрозии поверхности (блистеринга и отшелушивания) пленок ZrN/SiN_x , облученных ионами He (30 кэВ) и затем отожженных в вакууме в течение 2 ч при $T = 600^\circ\text{C}$
Characteristics of surface erosion (blistering and flexing) of ZrN/SiN_x films irradiated with He ions (30 keV) and subjected to post-radiation annealing in vacuum for 2 hours at $T = 600^\circ\text{C}$

| Отношение толщин слоев ZrN и SiN_x ZrN to SiN_x layer thickness ratio | Размер (диаметр) блистеров, мкм Size (diameter) of blisters, μm | Высота блистеров (толщина чешуек), нм Height of blisters (thickness of flakes), nm | Поверхностная плотность блистеров*, % Surface density of blisters*, % | Тип эрозии (блистеринг (б), отшелушивание (о)) Type of erosion (blistering (б), flaking (о)) | Доза облучения, 10^{16} см^{-2} The radiation dose, 10^{16} см^{-2} |
|---|---|---|--|---|--|
| ZrN | 1,1 | 120 | 65,0 | закрытые (б) | 5 |
| Si_3N_4 | 4,7–5,3 | 322 | 3,9 | б | 5 |
| 5 нм/5 нм | Блистеры не выявлены | | | | 0,5–8,0 |
| 10 нм/ 5 нм | – | 175 | 28,0 | о | 5 |
| | 2,5–2,7 | 4 | 4,6 | закрытые (б) | 1 |
| 2 нм/5 нм | 3,6 | 315 | 0,8 | открытые (б) | 5 |
| | 3,6–3,8 | – | 0,8 | открытые (б) | 8 |
| 5 нм/2 нм | Блистеры не выявлены | | | | $5 \cdot 10^{16}$ |
| | 0,14–0,2 эрозия 99 % | 25 175–225 | – | закрытые (б), о | 8 |
| 5 нм/10 нм | Блистеры не выявлены | | | | 0,5–5,0 |
| | 0,18 2,5 эрозия 3 % | 3,3 300 175–225 | – – – | закрытые (б) открытые (б) о | 8 |

*Отношение площади всех блистеров к общей площади поверхности.

*The ratio of the area of all blisters to the total surface area.

Для сравнения с многослойными пленками предварительно были исследованы особенности поверхностной эрозии в нанокристаллическом ZrN и аморфном нитриде кремния, облученных более высокой дозой ($5 \cdot 10^{16}$ см^{-2}). Обнаружено, что для кристаллической пленки ZrN характерно формирование преимущественно закрытых (с крышкой) блистеров малого размера (диаметр

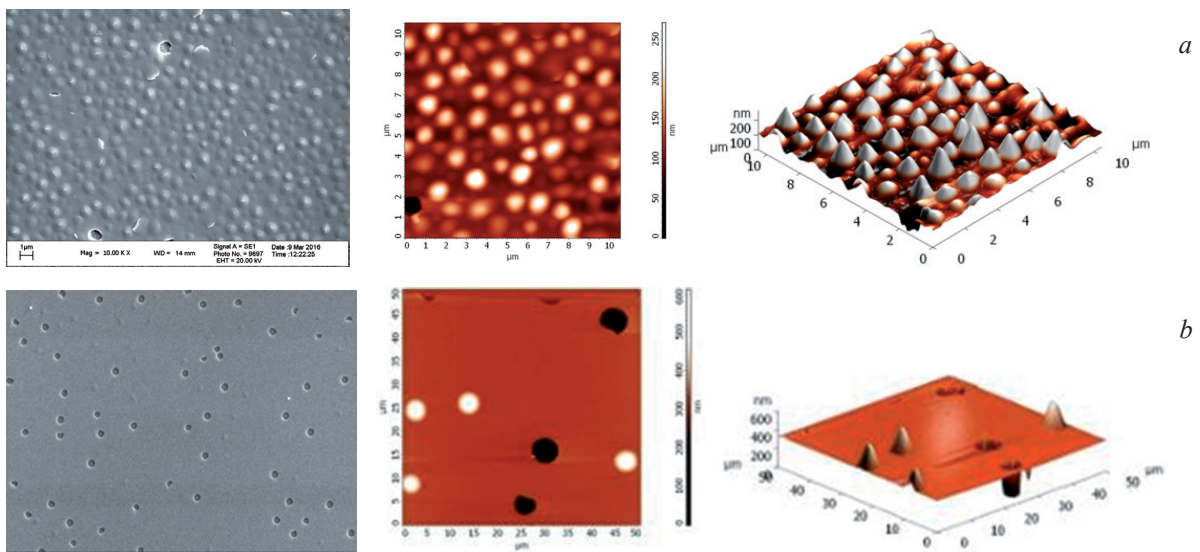


Рис. 1. СЭМ- и АСМ-изображения поверхности монослойных пленок ZrN (a) и Si_3N_4 (b), облученных ионами гелия (30 кэВ, $5 \cdot 10^{16}$ см^{-2}) и подвергнутых пострadiaционному отжигу при температуре 600°C

Fig. 1. SEM and AFM images of the surface of ZrN (a) and Si_3N_4 (b) monolayer films irradiated with helium ions (30 keV, $5 \cdot 10^{16}$ см^{-2}) and subjected to post-radiation annealing at a temperature of 600°C

составляет 1,1 мкм) и высокой поверхностной плотностью (до 65 %) (см. таблицу и рис. 1, *a*). В то время как в аморфном нитриде кремния наблюдаются крупные (диаметр 4,7–5,3 мкм) в основном открытые (с удаленной крышкой) блистеры с невысокой поверхностной плотностью (2,6 %) (см. таблицу и рис. 1, *b*), высота блистеров в пленке ZrN достигает 120 нм, а глубина кратеров в аморфной пленке – 320 нм (увеличение толщины облученной пленки происходит за счет ее радиационного распухания).

Микроскопические исследования многослойных пленок ZrN/SiN_x (5 нм/5 нм), имплантированных гелием (30 кэВ) и подвергнутых пострadiационному отжигу при температуре 600 °С, не выявили на их поверхности следов эрозии по механизму блистеринга и отшелушивания вплоть до дозы облучения 8·10¹⁶ см⁻². Таким образом, в отличие от однослойных нанокристаллических нк-ZrN и аморфных а-Si₃N₄ пленок, в их многослойных аналогах процессы эрозии поверхности заторможены. Это объясняется наличием большого числа кристаллических/аморфных границ и приводит к увеличению радиационной стойкости облученных пленок, что обуславливает практическую значимость многослойных кристаллическо-аморфных слоев для радиационного материаловедения.

С целью выявления влияния размерных эффектов (толщины индивидуальных нанокристаллических нитридных слоев) на радиационный блистеринг и отшелушивание пленок были проведены эксперименты на многослойных системах ZrN/SiN_x при изменении как толщины кристаллического ZrN, так и аморфного слоя SiN_x.

Обнаружено, что в многослойных пленках с большей толщиной кристаллического слоя ZrN (10 нм) пострadiационный отжиг приводит к образованию блистеров, начиная с дозы облучения 1·10¹⁶ см⁻² (см. таблицу и рис. 2, *a*). Данные блистеры имеют правильную цилиндрическую форму (рис. 3, *a*, вставка) с диаметром 2,5–2,7 мкм и высотой несколько нанометров. Встречается вспучивание отдельных достаточно крупных (микронных размеров) участков поверхности многослойной пленки, которые по высоте сопоставимы с толщиной аморфного слоя SiN_x. На внешней поверхности (см. рис. 2, *a*) некоторых блистеров наблюдаются углубления, которые, по-видимому, возникают по причине разрушения их внешней поверхности вследствие газовыделения при повышенной (600 °С) температуре. Следует отметить, что методами сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии формирование блистеров на поверхности пленок для других (см. таблицу) многослойных пленок при дозе облучения 1·10¹⁶ см⁻² не обнаружено.

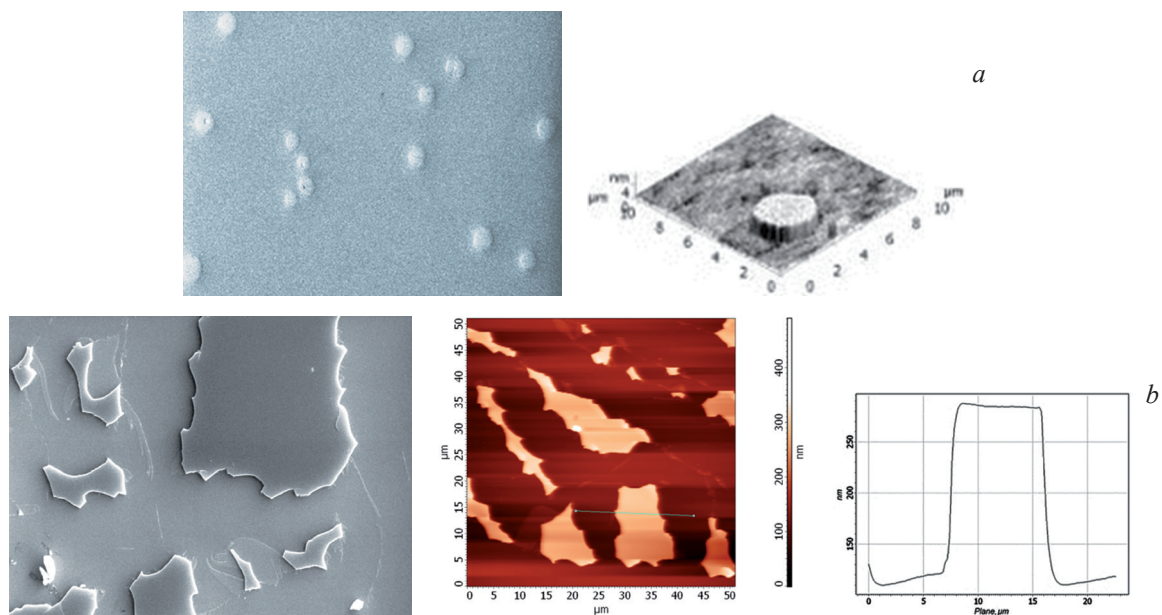


Рис. 2. СЭМ- и АСМ-изображения поверхности многослойных пленок ZrN/SiN_x (10 нм/5 нм), облученных ионами гелия (30 кэВ, 1·10¹⁶ см⁻² (*a*), 5·10¹⁶ см⁻² (*b*)) и подвергнутых пострadiационному отжигу при температуре 600 °С

Fig. 2. SEM and AFM images of the surface of ZrN/SiN_x (10 nm/5 nm) multilayer films irradiated with helium ions (30 keV, 1·10¹⁶ cm⁻² (*a*), 5·10¹⁶ cm⁻² (*b*)) and subjected to post-radiation annealing at a temperature of 600 °С

Дальнейшее увеличение дозы облучения до $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и последующий отжиг приводят к изменению характера и степени разрушения поверхности пленок ZrN/SiN_x (10 нм/5 нм) (см. рис. 2, *b*), на которой не наблюдается образования блистеров, имеющих правильную куполообразную форму (см. рис. 2, *b*). В рассматриваемом случае имеет место отшелушивание больших участков поверхности пленки, которое происходит в результате развития продольных трещин, приводящих к объединению ближайших скоплений пузырей. Глубина эрозии (толщина чешуек) этой пленки составляет 175 нм, а степень эрозии (процент удаленной площади) поверхности пленки – 28 % (см. таблицу).

При уменьшении толщины кристаллического слоя ZrN до 2 нм формирование блистеров в многослойных пленках ZrN/SiN_x (2 нм/5 нм) (см. рис. 3, *a*) происходит при большей дозе облучения ($5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) по сравнению с пленками ZrN/SiN_x (10 нм/5 нм) (см. рис. 2, *a*). Обнаружено, что в этом случае блистеры являются открытыми, их средний диаметр достигает 3,6–3,8 мкм, а глубина кратеров сопоставима с облученной толщиной пленки (315 нм) (см. таблицу). Доля (процент занимаемой ими площади) сформировавшихся блистеров мала и составляет 0,8 % от площади пленки. Выявлено, что дальнейшее увеличение дозы облучения данной многослойной пленки до $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ с последующим ее отжигом не приводит к изменению размеров и количества блистеров (см. таблицу и рис. 3, *b*).

Изменение толщины аморфного слоя (при толщине кристаллического слоя ZrN , равной 5 нм) в облученных ионами гелия (30 кэВ) многослойных ZrN/SiN_x пленках, подвергнутых пострadiационному отжигу при температуре 600 °С, также приводит к поверхностной эрозии (см. таблицу и рис. 4). Однако следует отметить, что данные пленки обладают повышенной радиационной стойкостью поверхности к эрозии по сравнению с системами с толщиной кристаллического слоя ZrN 10 или 2 нм. Для многослойных ZrN/SiN_x (5 нм/2 или 10 нм) пленок на поверхности эрозия по механизму блистеринга и отшелушивания выявлена только при дозе облучения ($8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) (рис. 4 *a, b*).

СЭМ- и АСМ-исследования многослойной пленки ZrN/SiN_x (5 нм/2 нм) выявили отшелушивание поверхностного слоя при дозе $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (рис. 4, *a*). На поверхности видны узкие (3,3 мкм) участки остаточного слоя пленки высотой от 175 до 225 нм (см. рис. 4, *a*, вставка), при этом степень ее эрозии достигает 99 %. На ней же наблюдаются закрытые блистеры диаметром 0,14–0,2 мкм и высотой 25 нм.

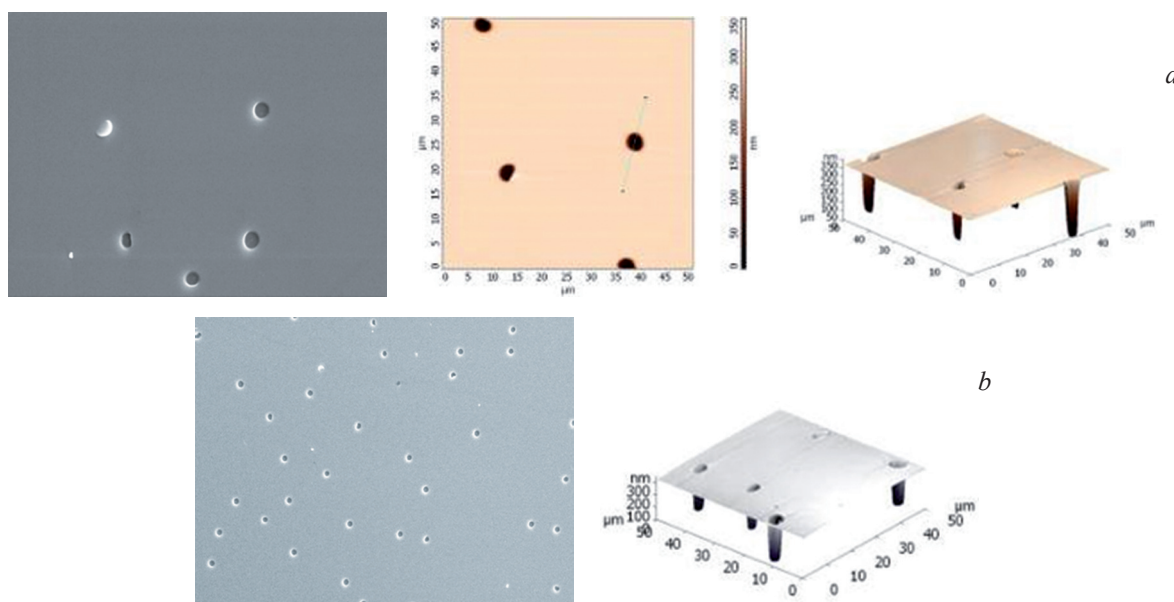


Рис. 3. СЭМ- и АСМ-изображения поверхности многослойной пленки ZrN/SiN_x (2 нм/5 нм), облученной ионами гелия (30 кэВ, $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (*a*), $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (*b*)) и подвергнутой пострadiационному отжигу при температуре 600 °С

Fig. 3. SEM and AFM images of the surface of ZrN/SiN_x (2 nm/5 nm) multilayer film irradiated with helium ions (30 keV, $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (*a*), $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (*b*)) and subjected to post-radiation annealing at a temperature of 600 °С

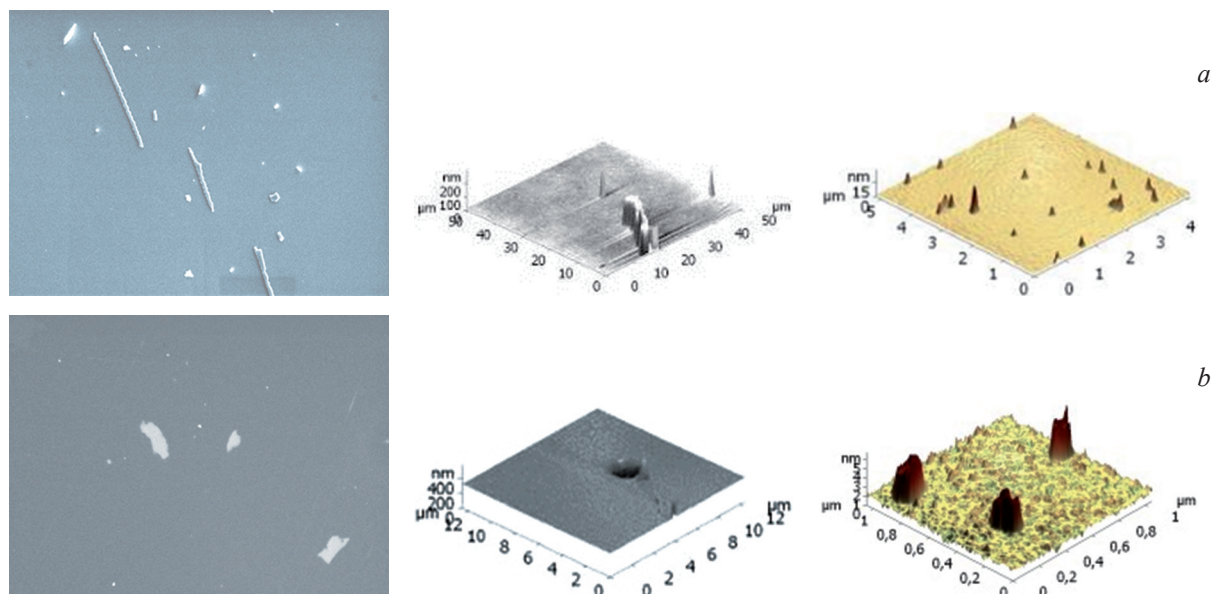


Рис. 4. СЭМ- и АСМ-изображения поверхности многослойных пленок ZrN/SiN_x (5 нм/2 нм; *a*) и ZrN/SiN_x (5 нм/10 нм; *b*), облученных ионами гелия (30 кэВ , $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и подвергнутых пострadiационному отжигу при температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 4. SEM and AFM images of the surface of ZrN/SiN_x (5 nm/2 nm; *a*) and ZrN/SiN_x (5 nm/10 nm; *b*) multilayer films irradiated with helium ions (30 keV , $8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) and subjected to post-radiation annealing at a temperature of $600 \text{ }^\circ\text{C}$

Для пленки ZrN/SiN_x (5/10 нм) наблюдается аналогичная ситуация. На поверхности видны небольшие участки без отслоившейся пленки (рис. 4, *b*, вставка). Ее эрозия составляет около 3 %. На поверхности пленки наблюдаются закрытые блистеры диаметром 0,18 мкм и высотой 3,3 нм, а также присутствуют открытые блистеры диаметром 2,5 мкм и глубиной кратера 300 нм.

При облучении материала ионами гелия в нем формируются радиационные вакансии, вакансии, стабилизированные гелием, а также вакансионные комплексы. Последние являются зародышами формирования вакансионных и газовых пор (пузырей). Достигнув критического размера, газовый пузырь может привести к образованию на поверхности пленки куполообразного вздутия или к ее отшелушиванию. Это происходит в результате образования трещин в пленке, приводящих к слиянию пузырей. Существуют два механизма, объясняющие эрозию поверхностного слоя, после того как под ним образовалась трещина. Первый механизм предполагает, что выпучивание возникает под действием давления газа в полости трещины. В соответствии со вторым механизмом давление газа играет роль лишь небольшой затравочной силы и может быть мало, а вспучивание происходит в основном за счет внутреннего бокового напряжения в поверхностном слое, т. е. в крышке блистера. Это напряжение возникает в результате внедрения нерастворимых газов. При превышении значения напряжения в слое предела прочности материала в данной области возникает трещина.

Однако процессы блистеринга в пострadiационных отожженных многослойных пленках ZrN/SiN_x имеют свои особенности. Во-первых, это генерация, накопление и последующая кластеризация радиационных дефектов (в основном вакансионных) и имплантированной нерастворимой примеси (гелий) в индивидуальных нанокристаллических и аморфных слоях SiN_x [10]. Во-вторых, это влияние плотности межфазных границ на специфику радиационно-стимулированной диффузии, взаимодействия и преимущественную локализацию радиационных вакансий, имплантированного гелия, а также их вакансионно-гелиевых комплексов (нанопор). В третьих, это влияние тепловой энергии (отжиг при $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$), обеспечивающей, с одной стороны, дополнительную генерацию термовакансий и их кластеризацию с атомарным гелием, что приводит к повышению плотности вакансионно-гелиевых комплексов, а с другой – приводящей к повышению внутреннего давления в них. Высокое внутреннее давление гелия в нанопорах является движущей силой для роста газовых пузырьков и формирования трещин в пленке. Образование последних способствует объединению пузырьков и росту их объема, что приводит к отслаиванию

(см. рис. 2, *b*) тонкой пленки на глубине максимальной концентрации имплантированного гелия (средний проективный пробег ионов гелия) на большой площади (см. рис. 4, *a*).

Согласно полученным ранее результатам наиболее стабильными к эрозии являются поверхности пленок с толщиной кристаллического слоя ZrN 5 нм. В таких пленках процессы блистеринга и отшелушивания заторможены при дозе $5 \cdot 10^{16}$ см⁻². При увеличении дозы (до $8 \cdot 10^{16}$ см⁻²) для пленки с толщиной аморфного слоя 2 нм (соизмеримой с размером нанопор) происходит интенсивная эрозия по механизму отшелушивания (см. рис. 4, *a* и таблицу). Это связано с повышением уровня механических напряжений в области максимальной концентрации нанопор вследствие высокого давления в газовых пузырьках. В случае более толстых аморфных слоев (10 нм) существует дополнительная возможность коагуляции нанопор, которая приводит к уменьшению давления в газовых пузырьках большего размера. Это в свою очередь понижает уровень механических напряжений и вызывает отшелушивание незначительной площади (степень эрозии 3 %) пленки (см. рис. 4, *b* и таблицу). В данном случае основной механизм эрозии связан с образованием блистеров.

При уменьшении толщины кристаллического слоя до 2 нм многослойная пленка ведет себя как однослойная пленка аморфного Si₃N₄. При увеличении кристаллического слоя до 10 нм в многослойных пленках процессы эрозии происходят при меньших дозах облучения ($1 \cdot 10^{16}$ см⁻²). В этом случае важен микроструктурный фактор. Кристаллическая структура слоев ZrN толщиной 10 нм преимущественно столбчатая. Имплантированный гелий преимущественно располагается по границам кристаллитов. При повышенных температурах увеличивается его миграционная способность проникать из кристаллического слоя ZrN к газовой-вакансионным комплексам, расположенным в аморфных слоях SiN_x. Повышение концентрации гелия в нанопорах приводит к росту давления в них и, как следствие, напряжений. В связи с этим процессы блистеринга и отшелушивания начинаются при пониженных дозах $1 \cdot 10^{16}$ см⁻² и $5 \cdot 10^{16}$ см⁻² соответственно.

Заключение. Многослойные пленки ZrN/SiN_x с толщиной индивидуальных слоев кристаллического нитрида циркония и аморфного нитрида кремния от 2 до 10 нм подвергнуты облучению ионами He⁺ с энергией $E = 30$ кэВ, дозами $1 \cdot 10^{15}$ – $8 \cdot 10^{16}$ см⁻², а затем пострадиационному вакуумному отжигу при температуре 600 °С в течение 2 ч.

Определено влияние толщины слоев и дозы облучения на процессы эрозии поверхности по механизму блистеринга и отшелушивания.

В отличие от однослойных (кристаллического ZrN и аморфного Si₃N₄) и многослойных систем ZrN/SiN_x (2 нм/5 нм, 5 нм/2 нм, 5 нм/10 нм, 10 нм/5 нм) максимальную стойкость к эрозии поверхности проявляет многослойная пленка ZrN/SiN_x (5 нм/5 нм). Эрозия поверхности в этой системе не выявлена вплоть до дозы облучения $8 \cdot 10^{16}$ см⁻². Наиболее интенсивно процессы отшелушивания (степень эрозии 99 %) поверхностных слоев имеют место для многослойной пленки ZrN/SiN_x (5 нм/2 нм).

Для достижения максимальной толерантности низкоразмерных многослойных систем к эрозии поверхности в дальнейшем необходим комплексный подход, связанный с оптимизацией их состава, толщины и преимущественной ориентации индивидуальных нанокристаллических слоев, а также прочностных и упругих свойств радиационно нарушенных имплантированных слоев.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ № 16-19-10246).

Acknowledgments. The work was supported by the Russian Science Foundation (RNF No. 16-19-10246).

Список использованных источников

1. Zinkle, S. J. Materials challenges for advanced nuclear energy / S. J. Zinkle, G. S. Was // *Acta Mater.* – 2013. – Vol. 61. – P. 735–758.
2. Ion-induced changes in the structure and phase composition of nanocrystalline TiZrSiN coatings formed via magnetron sputtering / V. V. Uglov [et al.] // *J. Surf. Inv. X-ray, Synch. Neutr. Tech.* – 2015. – Vol. 9, № 5. – P. 995–004.
3. The effect of He and swift heavy ions on nanocrystalline zirconium nitride / A. Janse van Vuuren [et al.] / *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* – 2014. – Vol. 326. – P. 19–22.
4. Grimes, R. W. Greater tolerance for nuclear materials / R. W. Grimes, R. J. M. Konings, L. Edwards // *Nat. Mater.* – 2008. – Vol. 7, № 9. – P. 683–685.

5. Роль границ раздела в многослойном TiN/SiN_x-нанокompозите при облучении / В. В. Углов [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Физика. – 2017. – Т. 60, вып. 9. – С. 127–137.
6. The radiation damage tolerance of ultra-high strength nanolayered composites / A. Misra [et al.] // JOM. – 2007. – Vol. 59. – P. 62–65.
7. The influence of Σ3 twin boundaries on the formation of radiation-induced defect clusters in nanotwinned Cu / M. J. Demkowicz [et al.] // J. Mater. Res. – 2011. – Vol. 26, № 14. – P. 1666–1675.
8. Size-dependent He-irradiated tolerance and plastic deformation of crystalline/amorphous Cu/Cu–Zr nanolaminates / J. Y. Zhang [et al.] // Acta Mater. – 2015. – Vol. 92. – P. 140–151.
9. Comparisons of radiation damage in He ion and proton irradiated immiscible Ag/Ni nanolayers / K. Y. Yu [et al.] // J. Nucl. Mater. – 2013. – Vol. 440, № 1/3. – P. 310–318.
10. Features of microstructure of ZrN, Si₃N₄ and ZrN/SiN_x nanoscale films irradiated by Xe ions / V. V. Uglov [et al.] // Vacuum. – 2017. – Vol. 143. – P. 491–494.
11. Helium mobility in advanced nuclear ceramics / S. Agarwal [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 2014. – Vol. 327. – P. 117–120.
12. Zinkle, S. J. Effect of H and He irradiation on cavity formation and blistering in ceramics / S. J. Zinkle // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 2012. – Vol. 286. – P. 4–19.
13. Углов, В. В. Радиационные эффекты в твердых телах / В. В. Углов. – Минск: БГУ, 2011. – 207 с.
14. Углов, В. В. Радиационные процессы и явления в твердых телах / В. В. Углов. – Минск: Выш. шк., 2016. – 188 с.
15. Stress-induced surface damages in Ti-Si-N films grown by magnetron sputtering / Z. J. Liu [et al.] // Thin Solid Films. – 2008. – Vol. 516, № 15. – P. 7609–7614.
16. He, M. Y. Effects of morphology on the decohesion of compressed thin films / M. Y. He, A. G. Evans, J. W. Hutchinson // Mater. Sci. Eng. A. – 1998. – Vol. 245, № 16. – P. 168–181.
17. Growth, structural and mechanical properties of magnetron-sputtered ZrN/SiN_x nanolaminated coatings / G. Abadias [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2016. – Vol. 308. – P. 158–167.
18. Interactions of ions with matter [Electronic resource]. – Mode of access: www.srim.org.

References

1. Zinkle S. J., Was G. S. Materials challenges for advanced nuclear energy. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, pp. 735–758. Doi:10.1016/j.actamat.2012.11.004
2. Uglov V. V., Abadias G., Zlotski S. V., Michel A., Saladukhin I. A., Leshkevich S. S., Gaiduk P. I., Jasulaitene V. Ion-induced changes in the structure and phase composition of nanocrystalline TiZrSiN coatings formed via magnetron sputtering. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2015, vol. 9, no. 5, pp. 995–1004. Doi: doi.org/10.1134/S1027451015050420
3. Janse Van Vuuren A., Neethling J. H., Skuratov V. A., Uglov V. V., Petrovich S. The effect of He and swift heavy ions on nanocrystalline zirconium nitride. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2014, vol. 326, pp. 19–22. Doi: 10.1016/j.nimb.2013.10.063
4. Grimes R. W., Konings R. J. M., Edwards L. Greater tolerance for nuclear materials. *Nature Materials*, 2008, vol. 7, no. 9, pp. 683–685. Doi: 10.1038/nmat2266
5. Uglov V. V., Safronov I. V., Kvasov N. T., Remnev G. E., Shimanski V. I. The Interface Influence in TiN/SiN_x Multilayer Nanocomposite Under Irradiation. *Russian Physics Journal*, 2018, vol. 60, no. 9, pp. 600–1610. Doi: 10.1007/s1182-018-1257-1
6. Misra A., Demkowicz M., Zhang X., Hoagland R. The radiation damage tolerance of ultra-high strength nanolayered composites. *JOM*, 2007, vol. 59, pp. 62–65. Doi: 10.1007/s11837-007-0120-6
7. Demkowicz M. J., Anderoglu O., Zhang X., Misra A. The influence of Σ3 twin boundaries on the formation of radiation-induced defect clusters in nanotwinned Cu. *Journal of Materials Research*, 2011, vol. 26, no. 14, pp. 1666–1675. Doi: 10.1557/jmr.2011.56
8. Zhang J. Y., Wang Y. Q., Liang X. Q., Zeng F. L., Liu G., Sun J. Size-dependent He-irradiated tolerance and plastic deformation of crystalline/amorphous Cu/Cu–Zr nanolaminates. *Acta Materialia*, 2015, vol. 92, pp. 140–151. Doi: 10.1016/j.actamat.2015.03.055
9. Yu K. Y., Liu Y., Fu E. G., Wang Y. Q., Myers M. T., Wang H., Shao L., Zhang X. Comparisons of radiation damage in He ion and proton irradiated immiscible Ag/Ni nanolayers. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, vol. 440, no. 1–3, pp. 310–318. Doi: 10.1016/j.jnucmat.2013.04.069
10. Uglov V. V., Abadias G., Zlotski S. V., Saladukhin I. A., Safronov I. V., Shymanski V. I., Janse van Vuuren A., O’Connell J., Skuratov V., Neethling J. H. Features of microstructure of ZrN, Si₃N₄ and ZrN/SiN_x nanoscale films irradiated by Xe ions. *Vacuum*, 2017, vol. 143, pp. 491–494. Doi: 10.1016/j.vacuum.2017.03.015
11. Agarwal S., Trocellier P., Serruys Y., Vaubailon S., Miroa S. Helium mobility in advanced nuclear ceramics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2014, vol. 327, pp. 117–120. Doi: 10.1016/j.nimb.2013.09.039
12. Zinkle S.J. Effect of H and He irradiation on cavity formation and blistering in ceramics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2012, vol. 286, pp. 4–19. Doi: 10.1016/j.nimb.2012.03.030
13. Uglov V. V. *Radiation effects in solids*. Minsk, Belarusian State University Publ., 2011. 207 p. (in Russian).
14. Uglov V. V. *Radiation processes and phenomena in solids*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2016. 188 p. (in Russian).

15. Liu Z. J., Jiang N., Shen Y. G., Li X. N. Stress-induced surface damages in Ti-Si-N films grown by magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, no. 21, pp. 7609–7614. Doi: 10.1016/j.tsf.2008.04.090
16. He M. Y., Evans A. G., Hutchinson J. W. Effects of morphology on the decohesion of compressed thin films. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, vol. 245, no. 2, pp. 168–181. Doi: 10.1016/S0921-5093(97)00848-4
17. Abadias G., Uglov V. V., Saladukhin I. A., Zlotski S. V., Tolmachova G., Dub S. N., Janse van Vuuren A. Growth, structural and mechanical properties of magnetron-sputtered ZrN/SiN_x nanolaminated coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 308, pp. 158–167. Doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.099
18. Interactions of ions with matter. Available at: www.srim.org.

Информация об авторе

Углов Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела, физический факультет Белорусского государственного университета (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: Uglov@bsu.by

Information about the author

Vladimir V. Uglov – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Solid State Physics Department of the Physics Faculty, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Uglov@bsu.by