

Исследование структуры и свойств

Structure and properties investigation

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of investigation and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-8-29-36>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТАНОВКИ ТИПА ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС «ВИХРЬ»

© Владимир Алексеевич Грибков¹, Ирина Валерьевна Боровицкая¹,
Александр Сергеевич Демин¹, Сергей Алексеевич Масляев¹,
Евгений Вадимович Морозов¹, Валерий Николаевич Пименов^{1*},
Геннадий Германович Бондаренко², Анна Ивановна Гайдар³

¹ Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН, Россия, 119334, Москва, Ленинский пр, 49;
*e-mail: pimval@mail.ru

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия, 101000, Москва, ул. Мясницкая 20; e-mail: bondarenko_gg@rambler.ru

³ НИИ перспективных материалов и технологий; Россия, 115054, Москва, ул. Малая Пионерская 12;
e-mail: niipmt@mail.ru

*Статья поступила 21 ноября 2018 г. Поступила после доработки 22 мая 2019 г.
Принята к публикации 27 мая 2019 г.*

Представлены результаты облучения металлического (никелевый сплав Инконель 718) и полупроводникового (монокристалл кремния) материалов импульсными потоками ионов гелия и гелиевой плазмы с помощью установки типа плазменный фокус (ПФ) «Вихрь». Исследована повреждаемость материалов и оценена их радиационно-термическая стойкость при воздействии импульсных потоков ионов рабочего газа и высокотемпературной плазмы в широком интервале значений плотности мощности излучения (длительность импульса — 10^{-8} – 10^{-6} с). Показано, что для обоих исследуемых материалов при «мягком» режиме облучения ($q = 10^6$ – 10^7 Вт/см²), не приводящем к полному оплавлению поверхности, процесс распыления наблюдается преимущественно на тех участках, которые содержат механические дефекты. Вместе с тем зафиксированы локальные участки оплавления поверхностных слоев, что связано с неоднородным распределением плотности частиц по сечению радиационного потока, падающего на образец-мишень. На поверхности материалов обнаружена тонкая пленка: в монокристалле кремния — оксид SiO₂, в сплаве Инконель 718 — результат взаимодействия компонентов сплава с остаточными газами в камере ПФ и химическими элементами, ранее осажденными на его поверхность. Установлено, что облучение монокристалла кремния в более «жестком» режиме ($q = 10^8$ – 10^9 Вт/см²) и с большим числом импульсных воздействий приводит к плавлению и частичному испарению поверхностного слоя с образованием на нем после кристаллизации расплава волнообразного рельефа и микроструктурных дефектов типа наплывов, кратеров, пузырей и микротрещин. При этом затвердевший поверхностный слой становится очень хрупким, легко отделяется от несплавившейся кремниевой основы и распадается на мелкие (порошкообразные) частицы. После пучково-плазменной обработки в поверхностном слое присутствуют элементы, входящие в состав конструкционных и функциональных материалов, размещенных в камере ПФ. При каждом импульсном разряде они осаждаются на облучаемую поверхность монокристалла. Таким образом, применение установки ПФ «Вихрь» перспективно для моделирования экстремальных условий воздействия ионизирующих излучений на материал, реализуемых в термоядерных установках с магнитным и инерциальным удержанием плазмы, а также для создания более «мягких» режимов облучения, характерных для радиационных потоков космической среды.

Ключевые слова: плазменный фокус; повреждаемость материалов; импульсные потоки; ионы гелия; гелиевая плазма.

STUDY OF THE DAMAGEABILITY OF MATERIALS USING A PLASMA FOCUS DEVICE “VIKHR”

© Vladimir A. Gribkov¹, Irina V. Borovitskaya¹, Aleksandr S. Demin¹,
Sergey A. Maslyayev¹, Evgeny V. Morozov¹, Valery N. Pimenov^{1*},
Gennady G. Bondarenko², Anna I. Gaydar³

¹ Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS; Leninsky pr. 49, Moscow, 119334, Russia;

*e-mail: pimval@mail.ru

² National Research University High School of Economics (HSE); ul. Myasnitskaya 20, Moscow, 101000, Russia;

e-mail: gbondarenko@hse.ru

³ Scientific Research Institute of Advanced Materials and Technologies; ul. Malaya Pionerskaya 12, Moscow, 115054, Russia;

e-mail: niipmt@mail.ru

Received November 21, 2018. Revised May 22, 2019. Accepted May 27, 2019.

The results of irradiation of metal (nickel alloy Inconel 718) and semiconductor (silicon single crystal) materials by helium ions and helium plasma pulsed beams using a plasma focus (PF) device “Vikhr” are presented. The damageability and radiation-thermal stability of the materials exposed to high-power pulsed helium ion beams of the working gas and high-temperature plasma have been studied and assessed in a wide range of the radiation power density (pulse duration 10^{-8} – 10^{-6} sec). Experiments showed that both materials exposed to “soft” irradiation ($q = 10^6$ – 10^7 W/cm²), which did not lead to complete surface melting, underwent the process of sputtering mainly in the areas containing mechanical defects. However, for each of the materials, local areas of melting of the surface layer are observed, which is associated with an irregular distribution of the particle density over the cross section of the radiation flux incident on the target sample. A thin film was found on the surface of both materials: SiO₂ oxide on a Si single crystal; and a film resulted from the interaction of the alloy components with residual gases in the PF chamber and chemical elements deposited earlier on the surface of Inconel 718 alloy. Irradiation in a “hard” mode ($q = 10^8$ – 10^9 W/cm²) with a large number of puls shots leads to melting and partial evaporation of the surface layer with the formation of a wave-like relief and microstructural defects such as ridges, craters, bubbles and microcracks after crystallization of the melt. A solidified surface layer becomes very brittle, easily separates from the non-melting Si base and breaks up into small particles like a powder. We have shown that after the beam-plasma treatment, the surface layer of silicon contains the elements occurred in other structural and functional materials located in the PF chamber. At each pulsed discharge, they are deposited on the irradiated surface of Si single crystal. Experiments and studies have also shown that a device “Vikhr” is promising for simulation of extreme conditions of exposing material to ionizing radiation, which are realized in thermonuclear devices with magnetic and inertial plasma confinement, as well as for creating more “soft” radiation regimes characteristic of the radiation fluxes of the space environment.

Keywords: plasma focus; damageability of materials; high-power pulsed flows; helium ions; helium plasma.

Введение

В настоящее время большой интерес вызывает проблема взаимодействия экстремальных энергетических потоков (ЭЭП) с веществом. Особенно остро она встала в связи с развитием термоядерной энергетики и работами по созданию установок термоядерного синтеза с двумя видами удержания плазмы — магнитным и инерциальным [1]. Кроме того, исследование взаимодействия ЭЭП частиц и излучений с материалом актуально для решения задач космического материаловедения и аэрокосмической техники (АКТ). Это связано с воздействием космической радиации различной природы (солнечных лучей, солнечного ветра и др.) на материалы и изделия, размещаемые снаружи космических аппаратов (КА), а также с влиянием атмосферы Земли на АКТ при прохождении ее с гиперзвуковыми скоростями.

Для моделирования экстремальных условий воздействия на материалы импульсных потоков

высокоэнергетических ионов и электронов, высокотемпературной плазмы, рентгеновского, нейтронного и других излучений используют различные радиационные установки управляемого ядерного синтеза (УЯС) [2 – 6]. Хорошо зарекомендовали себя устройства типа плазменный фокус (ПФ) [7 – 10], каждое из которых в силу конструктивно-технологических особенностей имеет свою специфику в создании условий импульсного облучения образцов-мишеней. При этом «жесткие» режимы воздействия ионизирующих излучений близки к соответствующим режимам, генерируемым в установках УЯС с инерциальным и магнитным удержанием плазмы [11 – 14], а «мягкие» — моделируют взаимодействие космической радиации с материалами КА и АКТ [2, 3]. Как правило, плотности мощности потоков в широком интервале значений ($q = 10^6$ – 10^{12} Вт/см²) достигаются в одном импульсном разряде ПФ длительностью 10^{-8} – 10^{-6} с, генерирующем потоки горячей плазмы (температура до

1 кэВ), быстрых электронов и ионов (энергия $\sim 0,1 - 1,0$ МэВ), а также рентгеновского и нейтронного излучений.

Цель работы — исследование повреждаемости материалов с помощью установки ПФ «Вихрь» как в «жестком» режиме импульсного пучково-плазменного облучения, характерном для установок УЯС, так и в значительно более «мягком» режиме, близком к условиям воздействия на объект космических радиационных потоков.

Условия облучения, материалы и методы исследования

Образцы-мишени облучали с использованием установки ПФ «Вихрь» (рис. 1) (напряжение батареи конденсаторов — до $U = 15$ кВ, емкость — $C = 28$ мкФ, энергия — $E \sim 3,15$ кДж). В качестве рабочего газа применяли гелий (давление гелия в рабочей камере $P_{\text{He}} \approx 230$ Па).

Исследовали образцы монокристаллического кремния, выращенного в направлении [111] (имели форму пластины диаметром 28,5 и толщиной 2,6 мм), и сплава на основе никеля Инконель 718 (размер $20 \times 15 \times 1$ мм). В исходном состоянии в образцах кремния содержание примесных элементов составляло, % масс.: С — до $\sim 0,3$, О — до $\sim 0,1$. Химический состав сплава Инконель 718, % масс.: Ni — 53,0; Cr — 19,0; Fe — 17,0; Nb — 5,40; Mo — 3,30; Ti — 1,0; Al — 1,0; Si — 0,3.

Исследуемые образцы размещали в катодной области рабочей камеры ПФ нормально к падающему потоку энергии (см. рис. 1). Расстояние от анода ПФ до поверхности образца-мишени составляло $L = 7,5$ см, плотность мощности излучения в каждом импульсном воздействии — $q \approx 10^7$ Вт/см², длительность импульса плазменного воздействия — $\tau_{\text{пл}} \approx 100$, а потока быстрых ионов гелия — $\tau_{\text{би}} \approx 20$ нс. Потоки высокотемпературной плазмы имели начальную температуру $T_{\text{пл}} \leq 1,0$ кэВ, скорость $v_{\text{пл}} \sim 2 \cdot 10^7$ см/с и плотность у поверхности мишени $n_{\text{пл}} \approx 10^{17}$ см⁻³, пучки быстрых ионов гелия — энергетический пик $E_{\text{би макс}} \approx 0,1$ МэВ. Каждый импульс энергии воздействовал на мишень в момент, когда она находилась практически при комнатной температуре.

Число импульсных воздействий ионов гелия (ИГ) и гелиевой плазмы (ГП) на образец-мишень

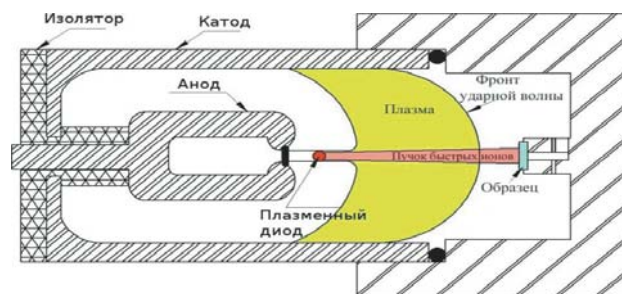


Рис. 1. Схема облучения образца-мишени в установке ПФ «Вихрь»

Fig. 1. Scheme of the target sample irradiation in a PF device “Vikhr”

из никелевого сплава составляло $N = 50$. Плотность мощности импульсных потоков подбирали таким образом, чтобы температура облучаемой поверхности, которая резко увеличивалась в момент воздействия импульса энергии, максимально приближалась к температуре плавления сплава, но не достигала порога его плавления.

Параметры облучения кремниевой пластины представлены в таблице. Испытания проводили в «мягком» ($q = 10^6 - 10^7$ Вт/см², $N = 5$) и в более «жестком» ($q = 10^8 - 10^9$ Вт/см², $N = 45$) режимах облучения. До и после каждой серии экспериментов образец взвешивали для определения изменения его массы и оценки средней толщины удаленного поверхностного слоя (ПС) за один импульсный разряд.

Образцы исследовали методами оптической и растровой сканирующей электронной микроскопии и атомно-эмиссионной спектроскопии, для чего использовали оптический микроскоп Neophot-32 и атомно-эмиссионный спектрометр тлеющего разряда GDS-850.

Результаты и их обсуждение

Сплав Инконель 718. На рис. 2 представлен участок микроструктуры поверхности сплава Инконель 718 после воздействия на него потоков ИГ и ГП в «мягком» режиме облучения.

Как показал анализ, хотя общего расплавления ПС не фиксировали, но при каждом импульсном воздействии потоков энергии (помимо нагрева ПС) происходило распыление поверхности ионами рабочего газа (преимущественно по

Параметры облучения кремниевой пластины потоками ИГ и ГП

The parameters of the silicon plate irradiation with helium ions (HI) and helium plasma (HP)

Плотность мощности излучения q , Вт/см ²	Число импульсных разрядов N	Расстояние от пластины кремния до анода L , см	Длительность импульсного воздействия τ , нс	
			ИГ	ГП
$10^6 - 10^7$	5	8	20	100
$10^8 - 10^9$	45	4	20	100

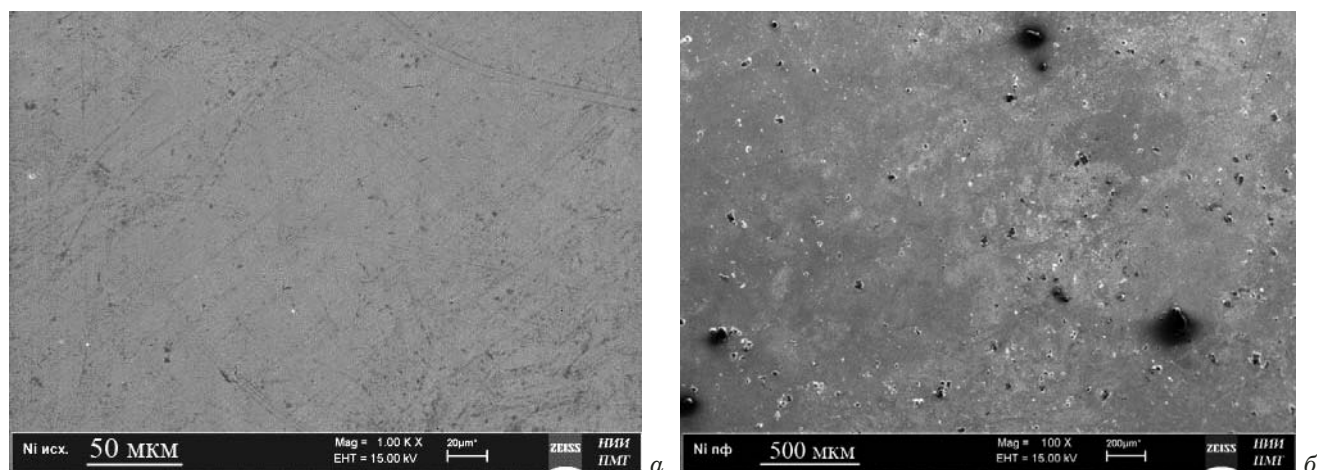


Рис. 2. Микроструктура поверхности сплава Инконель 718 в исходном состоянии (а) и после воздействия ИГ и ГП при $q \approx 10^7$ Вт/см², $N = 50$ (б)

Fig. 2. The surface microstructure of Inconel 718 alloy in the initial state (a) and after exposure to helium ions and helium plasma at $q \approx 10^7$ W/cm², $N = 50$ (b)

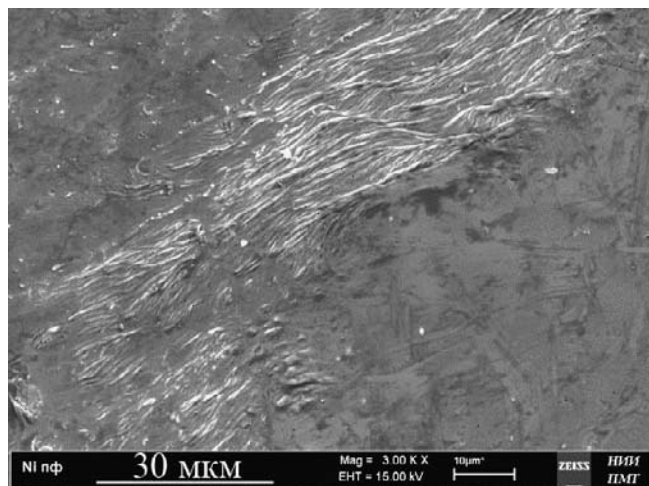


Рис. 3. Микроструктура участка локального плавления поверхности сплава Инконель 718 после облучения ИГ и ГП в «мягком» режиме ($q \approx 10^7$ Вт/см², $N = 50$)

Fig. 3. Microstructure of the area of local melting on the surface of Inconel 718 alloy after irradiation with 50 pulses of HI and HP in the soft mode ($q \approx 10^7$ W/cm², $N = 50$)

границам зерен). Этот процесс в сочетании с имплантацией в материал ИГ способствовал увеличению размера пор, содержащихся в исходном сплаве.

В то же время на облученной поверхности образца-мишени наблюдали локальные участки формирования жидкой фазы с последующей быстрой кристаллизацией расплава, на что указывает их волнообразный рельеф (рис. 3).

Очевидно, что расплавление таких локальных участков при данном режиме облучения происходило благодаря температурным флуктуациям вследствие неоднородного распределения плотности частиц по сечению радиационного по-

тока, падающего на образец-мишень. Характер локального оплавления сплава («мелкая рябь») позволяет предположить, что на его поверхности присутствует тонкая пленка. Она возникает, по-видимому, в результате взаимодействия компонентов сплава с остаточными газами камеры ПФ и химическими элементами, испаренными в процессе предыдущих импульсных разрядов с конструкционных и функциональных узлов камеры и осажденными на ее внутреннюю поверхность.

Вообще рельеф поверхности металлических материалов, оплавленной плазменно-пучковым воздействием, после затвердевания расплава с высокой скоростью ($\sim 10^7 - 10^8$ град/с) обычно имеет волнообразную форму, состоящую из гребней и впадин, и в зависимости от материала и режима облучения содержит блистеры, поры, кратеры, каплевидные фрагменты и др. [10, 16]. Судя по дисперсному характеру волн, наблюдаемых в зонах локального плавления облученного сплава (см. рис. 3), можно полагать, что в этих областях происходило плавление не тонкой пленки, а находящегося под ней ПС материала. Последующее затвердевание жидкой фазы из-за различия коэффициентов термического расширения пленки и «подложки» способствовало «сморщиванию» пленки и образованию «ряби».

Монокристалл кремния. При облучении пластины монокристаллического кремния потоками ИГ и ГП в «мягком» режиме ($q = 10^6 - 10^7$ Вт/см², $N = 5$) оплавления поверхности не фиксировали, но наблюдали распыление ПС, разогретого импульсным воздействием энергии до температуры, близкой к температуре плавления $T_{пл}$. Наиболее интенсивно этот процесс проходил в центральной зоне пластины под действием по-

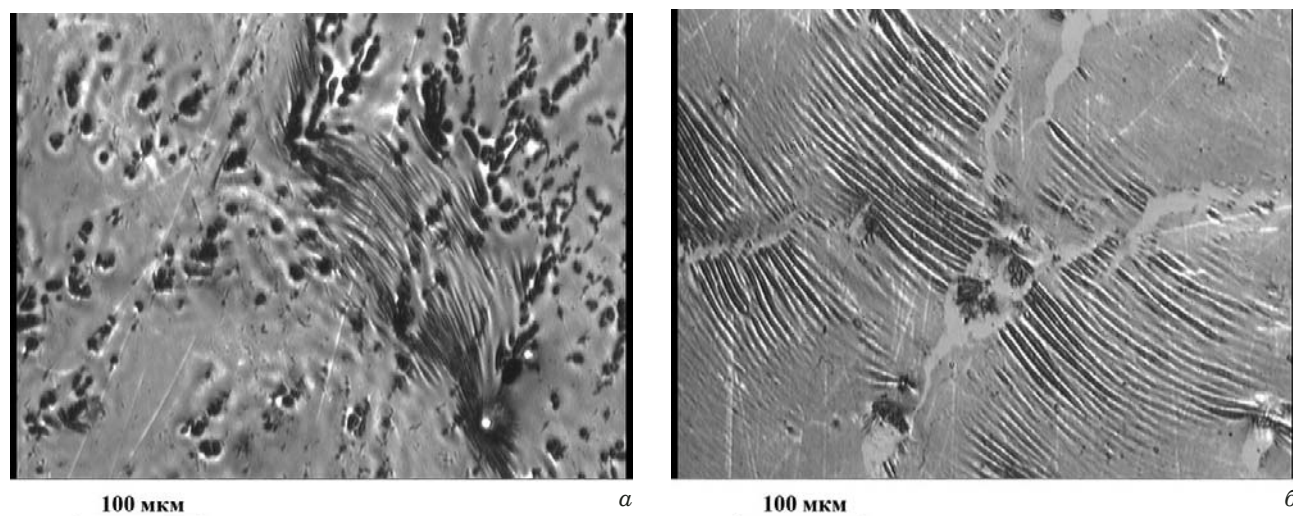


Рис. 4. Микроструктура поверхности монокристаллического кремния после облучения в «мягком» режиме ($q = 10^6 - 10^7$ Вт/см², $N = 5$) с оплавлением поверхности на локальных участках с повышенной пористостью (а) и волнообразным рельефом (б)

Fig. 4. The surface microstructure of Si single crystal after irradiation in the soft mode ($q = 10^6 - 10^7$ W/cm², $N = 5$) and melting of the local surface areas: *a* — the area of increased porosity; *b* — the area of wavelike relief

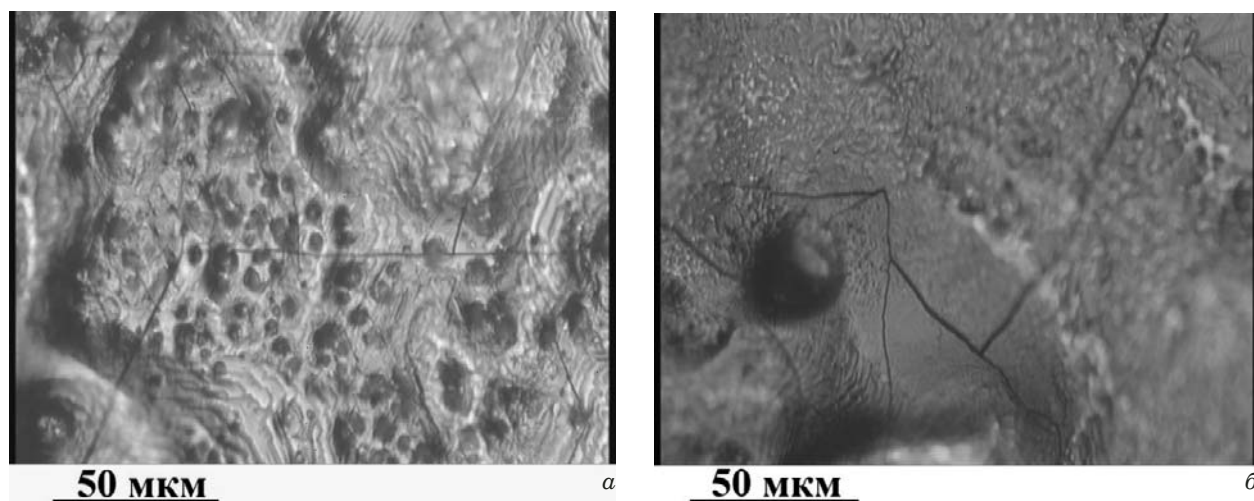


Рис. 5. Микроструктуры участков поверхности облученного монокристалла Si ($q = 10^8 - 10^9$ Вт/см², $N = 45$) с зонами, содержащими наплывы, пузыри, кратеры (а) и микротрещины (б)

Fig. 5. Microstructure of the surface areas of irradiated Si single crystal ($q = 10^8 - 10^9$ W/cm², $N = 45$) containing: *a* — alluviums, bubbles, craters; *b* — microcracks

тока ИГ преимущественно в областях, содержащих механические дефекты, созданные на предварительной стадии подготовки образцов (в зоне царапин, микропор и др.).

На рис. 4 представлен образец монокристалла после облучения с оплавлением поверхности на отдельных участках (подобно сплаву Инконель 718).

Видно, что поры образовались в зоне механических дефектов как результат распыления поверхности и вследствие имплантации в материал ИГ [17]. В то же время волнообразный рельеф свидетельствует о локальном плавлении ПС

в процессе облучения. Наблюдаемая мелкодисперсная «рябь», как и в случае сплава Инконель 718 (см. рис. 3), указывает на присутствие на поверхности тонкой пленки (вероятно, оксида SiO₂). Можно предположить, что при пучково-плазменном воздействии на пластину кремния в локальных областях под твердой пленкой SiO₂ происходило плавление чистого кремния (он имеет более низкую температуру плавления, чем SiO₂ [18]), сверхбыстрое затвердевание которого привело к деформационному «сморщиванию» тонкой оксидной пленки с образованием «ряби».

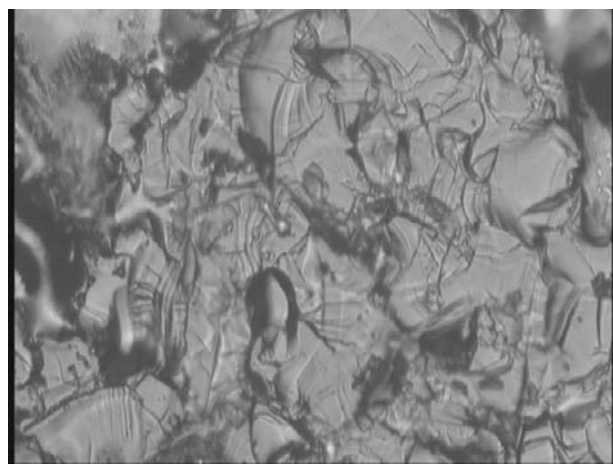


Рис. 6. Микроструктура участка поверхности кремниевой пластины, облученной ИГ и ГП ($q = 10^8 - 10^9$ Вт/см², $N = 45$) после удаления порошкообразного ПС

Fig. 6. Microstructure of the surface of Si plate irradiated with 45 pulses of HI and HP ($q = 10^8 - 10^9$ W/cm², $N = 45$) after removing the powder surface layer

Облучение образца потоками ИГ и ГП в более «жестком» режиме ($q = 10^8 - 10^9$ Вт/см², $N = 45$) ведет к полному расплавлению ПС вместе с пленкой SiO₂ и образованию на поверхности волнообразного рельефа и микроструктурных дефектов типа наплывов, кратеров, пузырей и микротрещин (рис. 5).

Убыль массы кремниевой мишени составила $\Delta m \approx 0,008$ г. При этом при максимальном удалении образца от анода ПФ ($L = 8$ см) основное испарение наблюдали в центральной области пластины — в зоне воздействия ионного пучка, так как в этом случае его плотность потока энергии примерно на порядок превышала плотность потока энергии от плазмы.

Отметим, что после облучения монокристалла кремния потоками ИГ и ГП высокой плотности мощности с большим числом импульсных воздействий ($N = 45$) многократно расплавленный и затвердевший с высокой скоростью ($10^7 - 10^8$ град/с) ПС становился очень хрупким. В отличие от металлических материалов он легко отделялся от неплавившейся кремниевой основы и распадался на мелкие (порошкообразные) частицы. Это связано с тем, что имплантация в материал ИГ способствовала их коагуляции в пузыри (блистеры) и образованию в ПС множества микропор, а действие термических напряжений, возникающих на стадии охлаждения расплава после каждого импульсного воздействия, приводило к формированию у поверхности монокристалла микротрещин и растрескиванию ПС.

На рис. 6 представлена микроструктура участка облученной поверхности пластины после удаления порошкообразного ПС, образованного

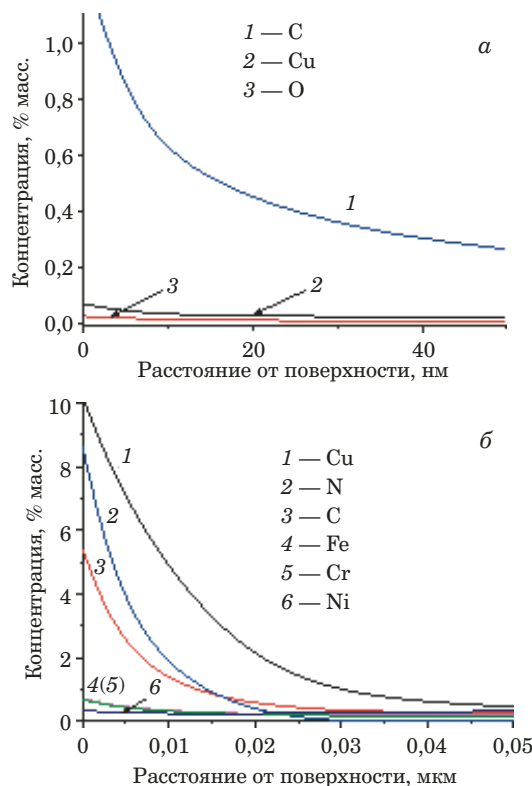


Рис. 7. Распределение элементов по глубине пластины кремния в исходном состоянии (а) и после расплавления ПС потоками ИГ и ГП в центре зоны облучения (б) (кривые распределения Fe (4) и Cr (5) практически совпадают)

Fig. 7. Distribution of the elements in depth of the silicon plate in the initial state (a) and after HI and HP induced melting of the surface layer in the center of irradiation zone (b) [Fe (4) and Cr (5) distribution curves almost coincide]

импульсным воздействием потоков ИГ и ГП в «жестком» режиме облучения. Видно, что поверхность мелкокристаллическая и содержит множество микротрещин.

Методом атомно-эмиссионной спектроскопии определяли распределения концентраций элементов в тонких ПС пластины кремния в исходном состоянии и после облучения в режиме полного расплавления облучаемой поверхности (рис. 7).

Получили, что если в исходном состоянии основные примесные элементы, которые содержались в ПС монокристалла кремния, — С, О и Cu, то после пучково-плазменной обработки — это (помимо С и Cu) N, Fe, Cr и Ni. Очевидно, что в процессе эрозии поверхности кислород удаляется из ПС вместе с испаряемой пленкой оксида SiO₂. Вместе с тем Fe, Cr и Ni входят в состав конструкционных и функциональных материалов, присутствующих в камере ПФ, и после испарения при каждом импульсном разряде под действием потоков ИГ и ГП осаждаются на облучаемую поверхность монокристалла. Медь, из которой изготовлен анод установки, осаждается на ту же по-

верхность образца-мишени после испарения высокоэнергичным пучком электронов [9 – 11].

После облучения также существенно возросли концентрации С и N в ПС монокристалла кремния (см. рис. 7). Эти элементы, по-видимому, присутствовали в составе рабочего газа установки (как примеси) и могли проникать в ПС в процессе имплантации в него ИГ. Этот эффект представляет большой интерес для дальнейшего изучения, поскольку пленки карбонитрида кремния обладают целым рядом важных для практического применения физико-химических свойств (высокими твердостью, теплопроводностью, термостойкостью, устойчивостью к окислению и др.).

Заключение

С использованием установки ПФ «Вихрь» исследовали повреждаемость металлического (сплав Инконель 718) и полупроводникового (монокристалл кремния) материалов мощными импульсными потоками ИГ и ГП с длительностью импульса в наносекундном диапазоне. У обоих материалов в «мягком» режиме облучения ($q = 10^6 - 10^7$ Вт/см²), не приводящем к оплавлению поверхности, наблюдали распыление преимущественно на тех участках, которые содержали механические дефекты. При этом локальные зоны оплавления ПС материалов позволили выявить наличие более тугоплавких тонких пленок на поверхности.

Более «жесткий» режим облучения ($q = 10^8 - 10^9$ Вт/см²) с большим числом импульсных воздействий в случае монокристалла кремния приводил к плавлению и частичному испарению ПС с образованием после кристаллизации расплава волнообразного рельефа и микроструктурных дефектов типа наплывов, кратеров, пузырей и микротрещин. Затвердевший ПС становился очень хрупким, легко отделялся от неплавившейся кремниевой основы и распадался на мелкие порошкообразные частицы.

Таким образом, проведенные исследования показали, что установка ПФ «Вихрь» эффективна для моделирования экстремальных условий воздействия ионизирующих излучений на материал. Она также может применяться для создания более «мягких» режимов облучения, характерных для радиационных потоков, действующих на внешние поверхности АКТ.

Финансирование

Работа выполнена по государственному заданию № 075-00746-19-00.

ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин М. Л., Курбатов Д. К., Филимонова Е. А. Обзор состояния исследований демонстрационных термоядерных реакторов в мире / ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2010. Вып. 3. С. 55 – 74.
2. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника. — М.: Техносфера, 2015. — 488 с.
3. Безродных И. П., Тютнев А. П., Семенов В. Т. Радиационные эффекты в космосе. Ч. 3. Влияние ионизирующего излучения на изделия электронной техники. — М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017. — 64 с.
4. Garkusha I. E., Burdakov A. V., Ivanov I. A., Kruglyakov E. P., et al. Plasma surface interaction during ITER transient events simulation with QSPA Kh-50 and Gold-3 Facilities / Problems of atomic science and technology. Ser. Plasma Physics. 2008. N 6. P. 58 – 60.
5. Zhitlukhin A., Klimov N., Landman I., Linke J., Loarte A., Merola M., et al. Effects of ELMs on ITER divertor armour materials / J. Nucl. Mater. 2007. Vol. 363 – 365. P. 301 – 308.
6. Bolt H., Barabash V., Krauss W., Linke J., Neu R., Suzuki S., Yoshida N. Materials for the plasma-facing components of fusion reactors / J. Nucl. Mater. 2004. Vol. 329 – 333. P. 66 – 73.
7. Bernard A., Bruzzone H., Choi P., Chuaqui H., Gribkov V., Herrera J., Hirano K., Krejci A., Lee S., et al. Scientific status of plasma focus research / J. Moscow Phys. Soc. 1998. N 8. P. 93 – 170.
8. Gribkov V., Banaszak A., Bienkowska B., Dubrovsky A., Ivanova-Stanik I., Jakubowski L., et al. Plasma dynamics in the PF-1000 device under full-scale energy storage: II, Fast electron and ion characteristics versus neutron emission parameters and gun optimization perspectives / J. Phys. D. Appl. Phys. 2007. N 40. P. 3592 – 3607. doi: 10.1088/0022-3727/40/12/008.
9. Gribkov V. A. Physical processes taking place in dense plasma focus devices at the interaction of hot plasma and fast ion streams with materials under test / Plasma Phys. Control. Fusion. 2015. Vol. 57. N 6. doi: 10.1088/0741-3335/57/6/065010.
10. Pimenov V. N., Maslyayev S. A., Ivanov L. I., Dyomina E. V., Gribkov V. A., Dubrovsky A. V., Scholz M., et al. Surface and bulk processes in materials induced by pulsed ion and plasma beams at Dense Plasma Focus devices / Nukleonika. 2006. Vol. 51. N 1. P. 71 – 78.
11. Иванов Л. И., Пименов В. Н., Грибков В. А. Взаимодействие мощных импульсных потоков энергии с материалами / ФХОМ. 2009. № 1. С. 23 – 37.
12. Krauz V., Mitrofanov K., Scholz M., Paduch M., Karpinski L., Zielinska E., Kubes P. Experimental study of the structure of the plasma-current sheath on the PF-1000 facility / Plasma Phys. Control. Fusion. 2012. Vol. 54. N 22. 025010.
13. Kubes P., Klir D., Paduch M., Pisarczyk T., Scholz M., et al. Characterization of the neutron production in the modified MA plasma focus / IEEE Trans. Plasma Sci. PS-40. 2012. P. 1075 – 1081.
14. Cicuttin A., Crespo M., Gribkov V., Niemela J., Tuniz C., Zanolli C., et al. Experimental results on the irradiation of nuclear fusion relevant materials at the dense plasma focus “Bora” device / Nucl. Fusion. 2015. Vol. 55. 063037. doi: 10.1088/0029-5515/55/6/063037.
15. Боровицкая И. В., Грибков В. А., Григорович К. В., Демин А. С., Масляев С. А., Морозов Е. В., Пименов В. Н., Спрыгин Г. С., Цепелев А. Б., Гусаков М. С., Логачев И. А., Бондаренко Г. Г., Гайдар А. И. Воздействие импульсных потоков ионов гелия и гелиевой плазмы на сплав Инконель 718 / Металлы. 2018. Вып. 9. С. 826 – 834. doi: 10.1134/S0036029518090057.
16. Gribkov V., Paduch M., Zielinska E., Demin A., Demina E., Kazilin E., Latyshev S., Maslyayev S., Morozov E., Pimenov V. Comparative analysis of damageability produced by powerful pulsed ion/plasma streams and laser radiation on the plasma-facing W samples / Radiation Physics and Chemist-

ry. 2018. Vol. 150. P 20 – 29. doi: 10.1016/j.radphyschem.2018.03.020.

17. **Бондаренко Г. Г.** Радиационная физика, структура и прочность твердых тел. — М.: Лаборатория знаний, 2016. — 462 с.
18. **Физические величины. Справочник** / Под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.

REFERENCES

1. **Subbotin M. L., Kurbatov D. K., Filimonova E. A.** Worldwide review of studies of demonstration fusion power reactors / VANT. Ser. Termoyad. Sintez. 2010. Issue 3. P 55 – 74 [in Russian].
2. **Belous A. I., Soloduha V. A., Shvedov S. V.** Space electronics. — Moscow: Tekhnosfera, 2015. — 488 p. [in Russian].
3. **Bezrodnykh I. P., Tyutnev A. P., Semenov V. T.** Radiation effects in space. Part 3. The effect of ionizing radiation on electronic products. — Moscow: AO "Korporatsiya VNIIE", 2017. — 64 p. [in Russian].
4. **Garkusha I. E., Burdakov A. V., Ivanov I. A., Kruglyakov E. P., et al.** Plasma surface interaction during ITER transient events simulation with QSPA Kh-50 and Gold-3 Facilities / Problems of atomic science and technology. Ser. Plasma Physics. 2008. N 6. P 58 – 60.
5. **Zhitlukhin A., Klimov N., Landman I., Linke J., Loarte A., Merola M., et al.** Effects of ELMs on ITER divertor armour materials / J. Nucl. Mater. 2007. Vol. 363 – 365. P 301 – 308.
6. **Bolt H., Barabash V., Krauss W., Linke J., Neu R., Suzuki S., Yoshida N.** Materials for the plasma-facing components of fusion reactors / J. Nucl. Mater. 2004. Vol. 329 – 333. P 66 – 73.
7. **Bernard A., Bruzzone H., Choi P., Chuaqui H., Gribkov V., Herrera J., Hirano K., Krejci A., Lee S., et al.** Scientific status of plasma focus research / J. Moscow Phys. Soc. 1998. N 8. P 93 – 170.
8. **Gribkov V., Banaszak A., Bienkowska B., Dubrovsky A., Ivanova-Stanik I., Jakubowski L., et al.** Plasma dynamics in the PF-1000 device under full-scale energy storage: II. Fast electron and ion characteristics versus neutron emission parameters and gun optimization perspectives / J. Phys. D. Appl. Phys. 2007. N 40. P 3592 – 3607. doi: 10.1088/0022-3727/40/12/008.
9. **Gribkov V. A.** Physical processes taking place in dense plasma focus devices at the interaction of hot plasma and fast ion streams with materials under test / Plasma Phys. Control. Fusion. 2015. Vol. 57. N 6. doi: 10.1088/0741-3335/57/6/065010.
10. **Pimenov V. N., Maslyayev S. A., Ivanov L. I., Dyomina E. V., Gribkov V. A., Dubrovsky A. V., Scholz M., et al.** Surface and bulk processes in materials induced by pulsed ion and plasma beams at Dense Plasma Focus devices / Nukleonika. 2006. Vol. 51. N 1. P 71 – 78.
11. **Ivanov L. I., Pimenov V. N., Gribkov V. A.** Interaction of power pulsed fluxes of energy with materials / Fiz. Khim. Obrab. Mater. 2009. N 1. P 23 – 37 [in Russian].
12. **Krauz V., Mitrofanov K., Scholz M., Paduch M., Karpinski L., Zielinska E., Kubes P.** Experimental study of the structure of the plasma-current sheath on the PF-1000 facility / Plasma Phys. Control. Fusion. 2012. Vol. 54. N 22. 025010.
13. **Kubes P., Klir D., Paduch M., Pisarczyk T., Scholz M., et al.** Characterization of the neutron production in the modified MA plasma focus / IEEE Trans. Plasma Sci. PS-40. 2012. P 1075 – 1081.
14. **Cicuttin A., Crespo M., Gribkov V., Niemela J., Tuniz C., Zanolli C., et al.** Experimental results on the irradiation of nuclear fusion relevant materials at the dense plasma focus "Bora" device / Nucl. Fusion. 2015. Vol. 55. 063037. doi: 10.1088/0029-5515/55/6/063037.
15. **Borovitskaya I. V., Gribkov V. A., Grigorovich K. V., Demin A. S., Maslyayev S. A., Morozov E. V., Pimenov V. N., Sprygin G. S., Zepelev A. B., Gusakov M. S., Logachev I. A., Bondarenko G. G., Gaydar A. I.** Effect of pulsed helium ion fluxes and helium plasma on the inconel 718 alloy / Metally. 2018. Issue 9. P 826 – 834. doi: 10.1134/S0036029518090057 [in Russian].
16. **Gribkov V., Paduch M., Zielinska E., Demin A., Demina E., Kazilin E., Latyshev S., Maslyayev S., Morozov E., Pimenov V.** Comparative analysis of damageability produced by powerful pulsed ion/plasma streams and laser radiation on the plasma-facing W samples / Radiation Physics and Chemistry. 2018. Vol. 150. P 20 – 29. doi: 10.1016/j.radphyschem.2018.03.020.
17. **Bondarenko G. G.** Radiation physics, structure and strength of solids. — Moscow: Laboratoria znaniy, 2016. — 462 p. [in Russian].
18. **Physical values. Handbook** / Grigoryev I. S., Meylikhov E. Z., eds. — Moscow: Energoatomizdat, 1991. — 1232 p. [in Russian].