

УДК 539.25.539.534.9

ИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЙ ПИТТИНГ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ МОЛИБДЕНОВЫХ ЗЕРКАЛ ИОНАМИ ГЕЛИЯ И АРГОНА

© 2021 г. А. В. Рогов^{a, b, *}, Ю. В. Капустин^{a, b}, В. М. Гуреев^{a, b}, А. Г. Домантовский^c

^aНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
Москва, 123182 Россия

^bАвтономная некоммерческая организация Координационный центр
“Управляемый термоядерный синтез—международные проекты”, Москва, 123182 Россия

^cИнститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук,
Москва, 119071 Россия

*e-mail: alex-rogov@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.09.2020 г.

После доработки 02.12.2020 г.

Принята к публикации 05.12.2020 г.

Обнаружен эффект формирования множественных ямок (питтингов) на поверхности полированных поликристаллических и монокристаллических Мо-зеркал после их последовательного облучения ионами He^+ и Ar^+ в газовом разряде. Питтинги имеют форму округлых лунок и длинных разнонаправленных линейных борозд, максимальная глубина которых равна толщине нарушенного при полировке слоя. Форма линейных борозд соответствует замурованным на разных этапах полировки царапинам, а их ширина и глубина, предположительно, определяются характерным размером зерен использованного абразива (~1 мкм). Подавляющее большинство питтингов формируется на границе раздела нарушенного слоя и малодеформированного материала подложки, где скорость диффузии газа резко снижается. Эффект питтинга приводит к резкому ухудшению оптических характеристик зеркал. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологии полировки и при разработке систем очистки зеркал для оптической диагностики плазмы термоядерных установок.

Ключевые слова: питтинг, деградация зеркал, полировка, дефект, гелий, диффузия, распыление, газовый пузырек.

DOI: 10.31857/S1028096021060121

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных компонентов любой системы оптической диагностики, используемой в термоядерных установках, является зеркало, принимающее излучение непосредственно из термоядерной плазмы, так называемое “входное” или “первое” зеркало. Основными проблемами при его эксплуатации являются деградация оптических свойств при распылении отражающей поверхности поступающими из термоядерной плазмы атомами перезарядки и загрязнение продуктами эрозии конструкционных материалов установки в различных режимах ее работы.

Считается, что наиболее опасным фактором является загрязнение отражающей поверхности [1], поэтому в состав всех систем оптической диагностики, разрабатываемых в настоящее время для международного термоядерного реактора ИТЭР, входит встроенная подсистема плазменной очистки входного зеркала. Для проведения очистки

зеркал предусмотрен специальный режим работы установки с увеличенным давлением газа в рабочей камере. В качестве метода удаления загрязнений предполагается использовать ионное распыление поверхности в газовом разряде с осциллирующими электронами на постоянном токе [2] или в емкостном высокочастотном газовом разряде [3, 4].

Первая стенка токамака ИТЭР будет изготовлена из бериллия, поэтому именно этот материал станет основным загрязнением для входного зеркала. Скорость удаления загрязнений зависит от типа рабочего газа, используемого при очистке. Так, коэффициент распыления бериллия атомами и ионами дейтерия с энергией 200–500 эВ меняется незначительно и примерно равен $Y_{\text{D-Be}} \approx 4 \times 10^{-2}$ атом/ион, а при распылении ионами аргона $Y_{\text{Ar-Be}}$ возрастает с 5×10^{-2} до 5×10^{-1} атом/ион с ростом энергии распыляющих частиц в пределах указанного диапазона [5]. По этой причине Ar

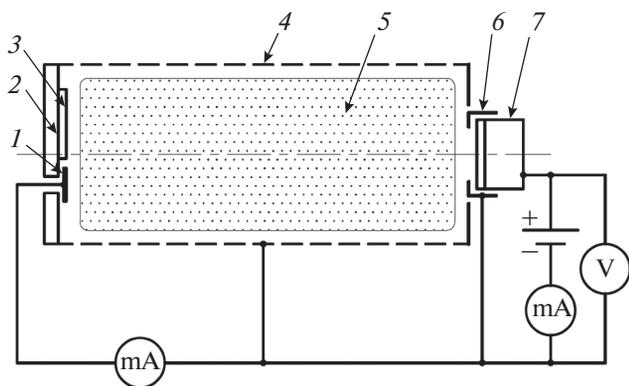


Рис. 1. Схема эксперимента по облучению зеркал ионами He^+ и Ag^+ : 1 – плоский коллектор, 2 – подложкодержатель, 3 – Мо-зеркало, 4 – цилиндрический сеточный полевой катод, 5 – область локализации плазмы, 6 – анод магнетрона, 7 – корпус магнетрона.

рассматривается в качестве одного из кандидатов [6] на роль рабочего газа для проведения очистки зеркал: его использование позволит существенно сократить длительности процесса очистки зеркал по сравнению с He и Ne.

В настоящей работе представлены результаты исследования распыления молибденовых монокристаллических (Single Crystal – SC-Mo) и поликристаллических (Poly Crystal – PC-Mo) зеркал ионами Ag^+ после предварительного облучения ионами He^+ . Такие зеркала предполагается использовать в качестве первого зеркала в нескольких системах оптической диагностики плазмы ИТЭР [7, 8]. Указанный сценарий моделирует условия воздействия на поверхность зеркала потока атомов перезарядки (D, T и He), поступающих из термоядерной плазмы во время рабочих импульсов, и последующее распыление ионами Ag^+ при использовании этого газа в плазменных системах очистки для удаления загрязнений.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования проводились на образцах поликристаллических и монокристаллических молибденовых зеркал, полученных из одной партии поставки (НИИ НПО “Луч”, г. Подольск). Диаметр исследованных образцов зеркал составлял 25 мм, толщина – 3 мм. Оба типа зеркал полировались по одной технологии механической полировки. Отметим, что производитель не раскрывает подробности технологии полировки, а контроль качества зеркал проводится посредством измерения спектров зеркального отражения и диффузного рассеяния зеркал, а также интерферометрии поверхности. В исходном состоянии (непосредственно после поставки) для всех исследованных образцов зеркал в видимом диапазоне спектра зеркальное отражение состав-

ляло 56–60%, а диффузное рассеяние было $<0.2\%$.

Облучение образцов ионами He^+ и Ag^+ проводилось в разряде с цилиндрическим сеточным полярным катодом диаметром 65 мм и длиной 130 мм, изготовленным из плетеной нержавеющей сетки с ячейкой 1.5×1.5 мм и диаметром проволоки 0.5 мм. Образцы зеркал закреплялись внутри полого катода на его “доньшке”. При этом моделировался режим плазменной очистки входных зеркал систем оптической диагностики “Спектроскопия водородных линий” и “Активная спектроскопия”, разрабатываемых в России для ИТЭР [9]. В качестве анода использовался планарный магнетрон в режиме инверсного включения [10]. Плотность тока распыляющих ионов на поверхности подложкодержателя в процессе распыления измерялась плоским изолированным коллектором, выполненным в виде диска диаметром 12 мм. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Все эксперименты проводились при одинаковых условиях и отличались только временем облучения (флуенсом ионов). Использовались следующие режимы:

1) Облучение ионами He: давление He в вакуумной камере $P_{\text{He}} = 4 \times 10^{-2}$ Торр, ток разряда $I_{\text{He}} \approx 250$ мА, напряжение разряда $U_{\text{He}} \approx 250$ В, плотность ионного тока на подложке $J_{\text{He}} \approx 0.8$ мА/см²;

2) Облучение ионами Ag: давление Ag в вакуумной камере $P_{\text{Ag}} = 2.5 \times 10^{-2}$ Торр, ток разряда $I_{\text{Ag}} \approx 200$ мА, напряжение разряда $U_{\text{Ag}} \approx 280$ В, плотность ионного тока на подложке $J_{\text{Ag}} \approx 1$ мА/см².

Морфология поверхности исследовалась методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием электронных микроскопов JEOL 35CF, Zeiss EVO MA10 и Zeiss Supra 40 VP.

Контроль толщины распыленного слоя проводился по результатам взвешивания образцов до и после распыления на аналитических весах CAS CAUW 220D, погрешность определения массы не превышала 0.01 мг, что позволяло контролировать толщину распыленного слоя с точностью ≈ 10 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

После первичного облучения SC-Mo и PC-Mo-зеркал ионами гелия ($\approx 2 \times 10^{19}$ ионов/см²) каких-либо изменений морфологии поверхности выявлено не было. При последующем облучении образцов ионами аргона с флуенсом $\approx 1 \times 10^{19}$ ионов/см² происходит резкое ухудшение оптического качества как PC-Mo, так и SC-Mo-зеркал. Визуально поверхность зеркал мутнеет. При электронно-микроскопическом исследовании обнаружено появление множественных ямок

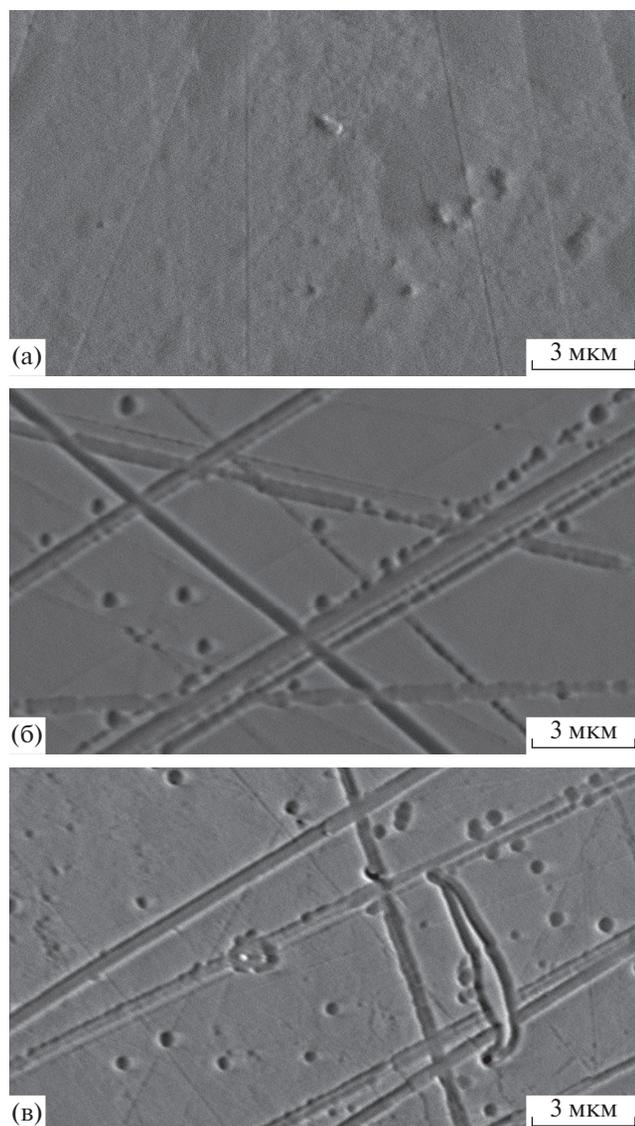


Рис. 2. Отражающая поверхность Мо-зеркала: а – исходное состояние; б – монокристаллическое зеркало после облучения ионами He^+ и Ag^+ ; в – поликристаллическое зеркало после облучения ионами He^+ и Ag^+ .

и длинных линейных борозд в виде царапин. На рис. 2 представлены результаты сравнительного исследования морфологии поверхности РС-Мо и SC-Мо-зеркал до и после последовательного облучения ионами He^+ и Ag^+ .

Новообразования, обнаруженные после облучения зеркал, показаны на рис. 3.

Можно выделить следующие новообразования: круглые лунки 1, линейные борозды 2 и не вскрывшиеся блистеры 3 округлой формы, по размеру соответствующие лункам. Их характерные поперечные размеры лежат в диапазоне 0.5–1 мкм. В зоне пластической деформации поверхности металла (центральная часть рис. 3) наблюдается множественное образование круглых лунок

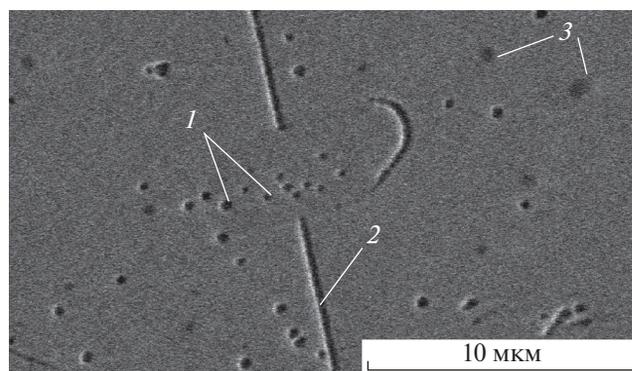


Рис. 3. Дефекты поверхности, образовавшиеся после последовательного облучения полированных Мо-зеркал ионами He и Ag : 1 – лунки, 2 – линейные борозды, 3 – блистеры.

с примерно одинаковым диаметром, что говорит о наличии в этой области высоких остаточных напряжений [11].

Исследование морфологии поверхности при больших увеличениях показало (рис. 4), что как линейные борозды, так и округлые ямки с поперечным размером ≈ 1 мкм имеют плоское дно и практически вертикальные стенки. При этом линейные борозды формируются посредством объединения цепочки из округлых ямок, образовавшихся над замурованными на границе дефектного слоя царапинами.

При исследовании разных РС-Мо-зеркал из одной партии поставки установлено, что питтинг проявляется по-разному, несмотря на одинаковые режимы облучения (флуенс He^+ 2.4×10^{19} ионов/ см^2 , флуенс Ag^+ 1.2×10^{19} ионов/ см^2). Соответствующие изображения приведены на рис. 5.

На рис. 5а вся поверхность покрыта лунками и полностью сформировавшимися линейными бороздами, в то время как на рис. 5б наблюдается гораздо меньше лунок, а крышки над линейными углублениями не полностью удалены. При этом характерные размеры дефектов в обоих случаях примерно одинаковы. Такое расхождение можно объяснить различиями в толщине и микроструктуре дефектного слоя, которые зависят от длительности этапов полировки, размера абразивных частиц и размера зерен поликристаллической подложки и их кристаллографической ориентации. По заявлению изготовителя, при полировке зеркал длительность каждого этапа полировки определяется заданным оптическим качеством и (в зависимости от исходного состояния подложки) для разных экземпляров может значительно отличаться.

Для оценки толщины дефектного слоя на исходном образце поликристаллического зеркала был проведен эксперимент по его распылению только ионами Ag с промежуточным контролем

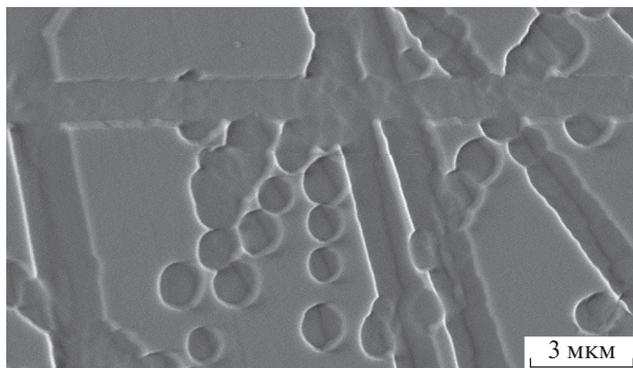


Рис. 4. РС-Мо-зеркало. Режим облучения: He (2.4×10^{19} ионов/см²) + Ag (2.5×10^{19} ионов/см²).

морфологии поверхности посредством растровой электронной микроскопии. Вплоть до полного удаления дефектного слоя (контролировалось по факту проявления границ зерен) питтинг не наблюдался. При этом толщина распыленного слоя составила ≈ 200 нм. Предварительное удаление слоя такой же толщины с поверхности SC-Мо-зеркал посредством распыления ионами Ag позволило полностью подавить эффект питтинга при последовательном облучении ионами He и Ag.

На следующем этапе было проведено исследование зависимости изменения морфологии поверхности РС-Мо-зеркал от флуенса ионов He при последовательном облучении образцов ионами He и Ag. Флуенс ионов Ag при этом составлял 1.2×10^{19} ионов/см². Результаты представлены на рис. 6.

При распылении поверхности только ионами Ag (рис. 6а) питтинг не наблюдается. По мере увеличения флуенса ионов He (рис. 6б и 6в) концентрация лунок увеличивается. При флуенсе ионов He $\approx 4.8 \times 10^{19}$ ионов/см² (рис. 6г) начинает проявляться поликристаллическая структура материала зеркала, что свидетельствует о почти полном распылении дефектного слоя, а питтинг наблюдался только на отдельных участках образца, где еще сохранился дефектный слой.

Результаты исследования одного и того же участка с использованием детектора вторичных электронов Эверхарта–Торнли (SE2) и внутрилинзового детектора вторичных электронов (In Lens) при использовании электронного микроскопа Zeiss Supra 40 VP показаны на рис. 7.

Детектор SE2 позволяет изучать (главным образом) топографические особенности поверхности, а детектор In Lens – визуализировать участки с измененным химическим составом [12]. На рис. 7б вокруг образовавшихся лунок наблюдаются области неправильной формы с измененной вторичной электронной эмиссией. Предположительно, это зоны, где произошло частичное пересаживание материала при разрушении крышки полости, заполненной He. Сравнение этих изоб-

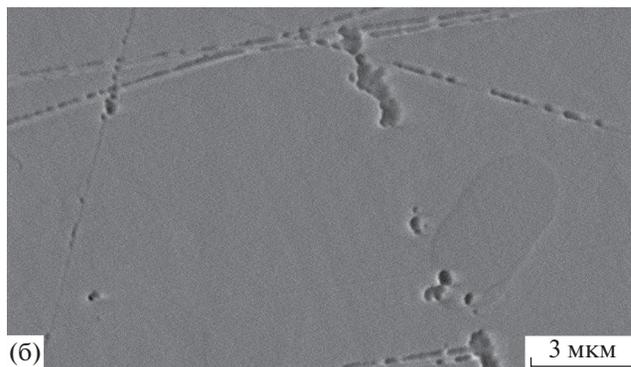
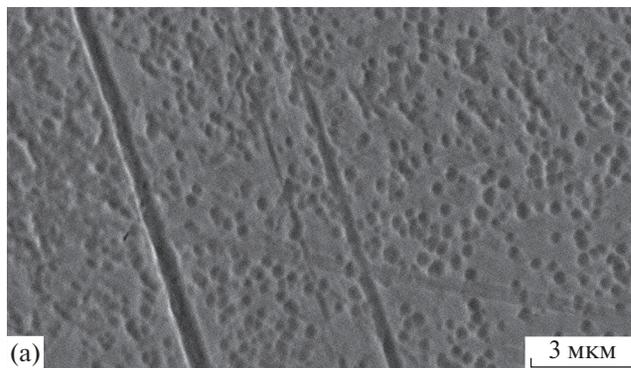


Рис. 5. Различия в проявлении питтинга на двух образцах РС-Мо-зеркал из одной партии поставки.

ражений также выявило наличие скрытых полостей, по размеру соответствующих наблюдаемым ямкам. На рис. 7б они наблюдаются в виде темных одиночных пятен без следов выбросов вокруг них. В отличие от блистеров, выпучивания крышки над ними не наблюдается (рис. 4). Отсутствие затемненных зон вокруг линейного дефекта свидетельствует о том, что процесс его формирования не завершен, то есть его “крышка” еще не потеряла герметичность. Таким образом, на этих изображениях зарегистрированы различные стадии проявления эффекта питтинга.

Распределение ямок, скрытых полостей и пересаживаемого при формировании питтингов материала показаны на рис. 8.

Звездообразная форма зон с измененными электронно-эмиссионными свойствами (более светлые пятна на рис. 9) вокруг сформированных ямок может свидетельствовать о взрывном характере процесса формирования питтинга: направление лучей соответствует трещинам, через которые происходил выброс газа при разрушении крышки блистера. О термическом механизме разрушения свидетельствует наличие застывших капель на дне борозд и ямок, а также оплавленных остатков крышек на их краях (рис. 9).

В отличие от рис. 4 на рис. 9 видно, что имеются ямки, чья глубина меньше толщины дефектного слоя, а поперечный размер ≤ 100 нм. Их отличительной особенностью является округлое дно.

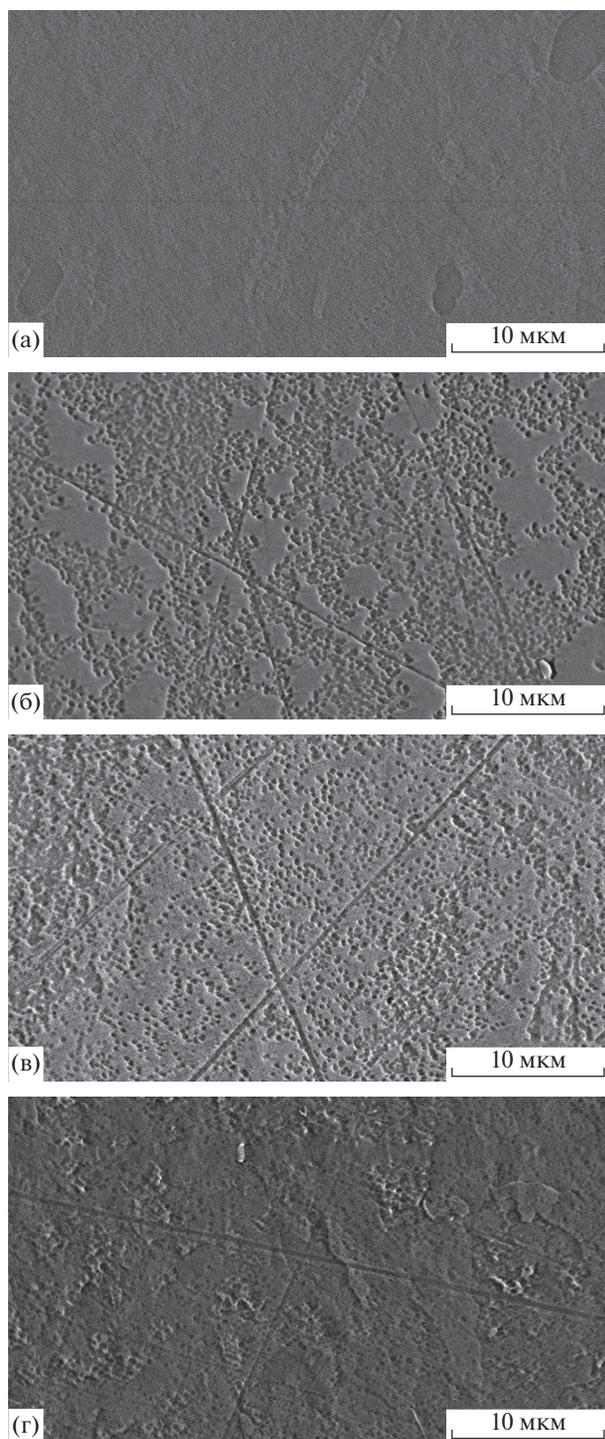


Рис. 6. Зависимость морфологии поверхности РС-Мо-зеркала от флуенса ионов He, ионов/см²: а – 0, б – 0.6×10^{19} , в – 1.2×10^{19} , г – 4.8×10^{19} . После облучения ионами He все образцы облучались ионами Ag с флуенсом 1.2×10^{19} ионов/см².

Более детальное исследование начального этапа формирования питтингов выявило, что начальной стадией их образования является блистеринг. При этом поперечная форма блистеров соответствует конечной форме питтингов. Соот-

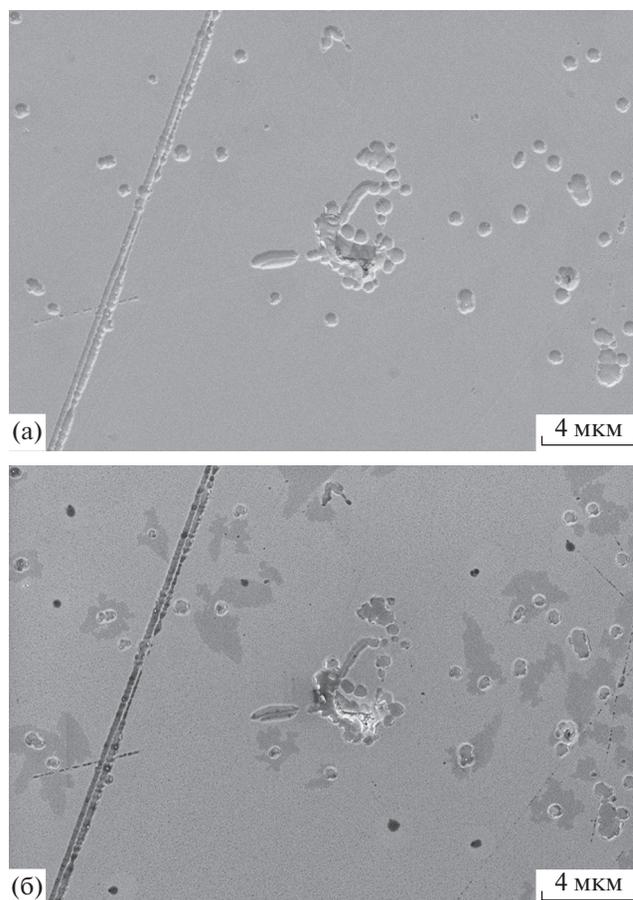


Рис. 7. Изображения одного и того же участка, полученные с использованием детектора вторичных электронов Эверхарта–Торнли (а) и внутри линзового детектора вторичных электронов (б).

ветствующее этому этапу изображение поверхности приведено на рис. 10.

Как показали проведенные ранее эксперименты [13], при осаждении Мо-столбчатых нанокристаллитных покрытий на полированную Мо-монокристаллическую подложку скалывание покрытия вместе с дефектным слоем происходит на границе дефектный слой–подложка (аналогично технологии “Smart Cut” [14]). Эффект формирования крупных блистеров (диаметром ≈ 10 мкм) наблюдался ранее на молибденовых зеркалах со столбчатым нанокристаллитным покрытием толщиной ≈ 1 мкм при интенсивном облучении ионами He и относительно высоком давлении нейтрального газа над облучаемой поверхностью [15]. В этом случае отслоение крышек блистеров также происходило на границе дефектного слоя и основного материала подложки, что свидетельствует об общности процессов при формировании питтингов и блистеров в рассматриваемых условиях.

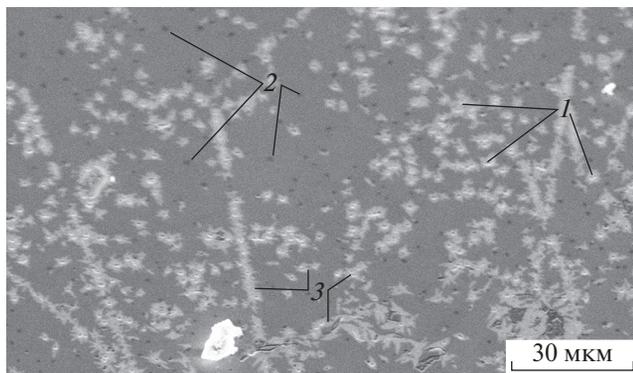


Рис. 8. Распределение ямок, скрытых полостей и зон переосаждения при формировании питтингов, где: 1 – ямки, 2 – скрытые приповерхностные полости, заполненные He, 3 – зоны переосаждения.

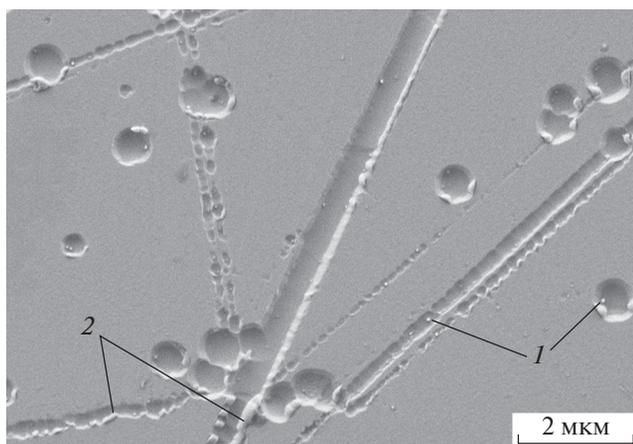


Рис. 9. Поверхность Mo-зеркала после проявления питтинга: 1 – застывшие капли, 2 – оплавленные остатки крышек.

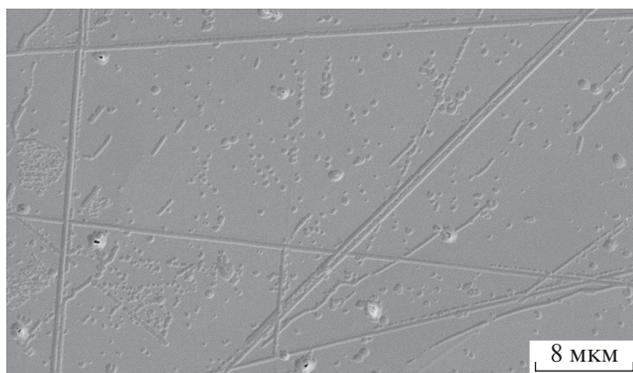


Рис. 10. Поверхность Mo-зеркала на этапе формирования блистеров. Режим облучения: He (1×10^{19} ионов/см²) + Ag (1.5×10^{19} ионов/см²).

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основной вклад в инициирование и интенсификацию структурно-фазовых процессов в облученных металлических материалах вносят два

процесса: радиационно-усиленная диффузия и радиационно-индуцированная сегрегация. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие заключения об особенностях проявления эффекта питтинга на Mo-зеркала при последовательном облучении поверхности низкоэнергетическими ионами He и Ag:

1. Эффект проявляется только при наличии на поверхности образца дефектного слоя, сформированного в ходе механической полировки. Для исследованных образцов поликристаллических и монокристаллических Mo-зеркал, полировка которых проводилась по одинаковой технологии в НИИ НПО “Луч”, толщина этого слоя находится в диапазоне 100–200 нм.

2. При одинаковом качестве (т.е. одинаковых оптических характеристиках) и технологии полировки на разных образцах зеркал (даже из одной партии поставки) проявление питтинга может сильно отличаться. Это связано с тем, что при полировке производится контроль только оптического качества зеркал и морфологии отражающей поверхности. При этом длительность обработки на разных этапах шлифовки и полировки для разных экземпляров зеркал может существенно варьироваться, что приводит к различиям в структуре и толщине поверхностного дефектного слоя.

3. Ионная бомбардировка должна производиться при достаточно высоком давлении газа вблизи облучаемой поверхности ($\sim 10^{-2}$ Торр). За счет удаления адсорбированного на обрабатываемой поверхности газа происходит повышение скорости поступления нейтрального He в материал нарушенного слоя (эффект ионной стимуляции). За счет диффузии по границам зерен, размер которых на несколько порядков меньше, чем в материале подложки, скорость диффузии газа внутри дефектного слоя значительно повышена по сравнению с крупнокристаллическим и монокристаллическим материалом.

4. Первичные микрополости образуются за счет диффузионного накопления He на дислокациях, образовавшихся в зоне сдвиговой пластической деформации поверхности материала при механическом воздействии зерна абразива в ходе полировки [16];

5. Характерный размер питтингов (диаметр круглых лунок, ширина борозд) пропорционален размеру абразивных частиц, использованных на разных этапах полировки [17]. На начальном этапе применяются наиболее крупнозернистые абразивы, финишная полировка производится порошками с размером частиц ≤ 1 мкм. Замена шлифовальной суспензии производится при уменьшении неровностей поверхности до требуемого на данном этапе значения, при этом толщина измененного слоя меньше, чем на предыдущем этапе полировки. Таким образом, формируется многослойная структура дефектного слоя, где наиболее крупные дефекты в виде царапин замуровываются

ся в толщу нарушенного слоя. При питтинге происходит проявление скрытых структурных дефектов этого слоя.

6. Основное накопление газа происходит на дефектах, расположенных на границе дефектного слоя и малодеформированного материала подложки, за счет резкого скачка скорости диффузии и максимальной концентрации дефектов в этой зоне [16], что обеспечивает наименьшую когезионную прочность материала. В этих условиях формируется полость с максимальным поперечным размером (≈ 1 мкм) и плоским дном. Соответственно, исходный пузырек с газом имел полусферическую форму с плоским основанием на границе раздела дефектный слой – подложка.

7. Питтинги меньшего размера формируются над замурованными в толще нарушенного слоя дефектами полировки, полученными в результате воздействия на поверхность материала зерен с характерным размером меньше толщины дефектного слоя. Кроме меньших размеров (0.05–0.2 мкм), их отличительной особенностью является полусферическое дно углубления. Скрытые полости вблизи поверхности имеют наименьшие размеры.

8. Питтинг проявляется только после дополнительного облучения образца ионами Ag^+ : распыление поверхности ионами Ag вызывает интенсивный нагрев дефектного слоя над полостью за счет малой теплопроводности ее крышки. С ростом температуры давление He в полости увеличивается. При нарушении герметичности крышки происходит выброс газа из полости через образовавшиеся трещины. При этом за счет локального увеличения давления плотность ионного потока в этой области резко возрастает и происходит дополнительный нагрев и испарение материала крышки блистера. Наиболее толстые края оплавляются. Согласно предлагаемой гипотезе, процесс носит взрывной характер. Выброс газа из полости приводит к конденсации металлического пара над кратером питтинга и формированию капель, наблюдаемых на рис. 9. Испарившийся материал крышки частично пересаживается за счет обратного рассеяния и ионизации вблизи зоны выброса. В пользу такой гипотезы свидетельствует звездообразная форма зоны пересадки испаренного материала вокруг вскрытых ямок (рис. 8). Кроме He (за счет эффекта радиационной сегрегации) в полости скапливаются примеси, среди которых присутствует O_2 и химически активные вещества, использованные при полировке. По этой причине пленки, пересаженные вблизи лунок после вскрытия блистера, имеют измененный химический состав. Форма этих пятен (одиночные языки, звездообразная и линейная форма) определяется количеством, расположением и формой трещин при разрыве крышки блистера.

9. Питтинг проявляется как на монокристаллических, так и на поликристаллических зеркалах

с одинаковой технологией механической полировки (то есть определяется структурой дефектного отражающего слоя, сформированного при полировке).

10. Линейные борозды проявляются за счет объединения цепочки одиночных лунок, образующихся над скрытой (замурованной в толще дефектного слоя) царапиной.

11. Питтинг приводит к резкому ухудшению оптического качества зеркала (развитию рельефа поверхности, резкому снижению коэффициента отражения и увеличению коэффициента диффузного рассеяния).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При последовательном облучении полированных Мо-монокристаллических и поликристаллических зеркал ионами He и Ag с энергией ~ 100 эВ обнаружен эффект питтинга – образование множественных округлых ямок и линейных борозд над замурованными в толще нарушенного приповерхностного слоя дефектами полировки. Так как характерный размер дефектов (≈ 1 мкм) существенно превышает длину волны излучения, их появление приводит к резкому ухудшению оптического качества обоих типов зеркал в видимом диапазоне спектра. Проявление данного эффекта устраняется только при полном удалении дефектного слоя, образовавшегося в процессе полировки. В частности, питтинг может проявиться при использовании Ag в качестве рабочего газа при плазменной очистке входных Мо-зеркал в системах оптической диагностики установки ИТЭР. Эффект ионно-стимулированного диффузионного питтинга также может быть использован для контроля и исследования структуры нарушенного дефектного слоя, сформированного при полировке.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kotov V. // Nuclear Fusion. 2016. V. 56. № 10. P. 106027. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/56/10/106027>
2. Рогов А.В., Капустин Ю.В. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 3. С. 240.
3. Leipold F., Reichle R., Vorpahl C., Mukhin E.E., Dmitriev A.M., Razdobarin A.G., Samsonov D.S., Marot L., Moser L., Steiner R., Meyer E. // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. № 11. P. 11D439. <https://doi.org/10.1063/1.4962055>
4. Dmitriev A.M., Babinov N.A., Bazhenov A.N., Bukreev I.M., Kochergin M.M., Koval A.N., Kurskiev G.S., Litvinov A.E., Masyukevich S.V., Mukhin E.E., Razdobarin A.G., Samsonov D.S., Solokha V.V., Tolstyakov S.Y., Andrew P., Leipold F., Shigin P.A., Reichle R., Bukhovets V.L., Gorodetsky A.E., Markin A.V., Zakharov A.P., Zalavutdinov R.K., Chernakov An.P., Chernakov Al.P., Chernakov P.V., Chernozumskaya T.V., Kobelev A.A., Smirnov A.S.,

- Marzinovsky I.A.* // Phys. Scripta. 2017. V. T 170. P. 014072.
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa95e5>
5. *Eckstein W., Stephens J.A., Clark R.E.H., Davis J.W., Haasz A.A., Vietzke E., Hirooka Y.* // Atomic and Plasma—Material Interaction Data for Fusion. Part B: Physical Sputtering and Radiation-Enhanced Sublimation. 2001. V. 7. P. 30.
6. *Soni K., Moser L., Steiner R., Mathys D., Le Guern F., Piqueras J., Marot L., Meyer E.* // Nucl. Mater. Energy. 2019. V. 21. P. 100702.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.100702>
7. *Orlovskiy I., Alekseev A., Andreenko E.N., Asadulin G., Gorshkov A.V.* // Fusion Engineering and Design. 2017. V. 123. P. 1011.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.057>
8. *Kuznetsov A.P., Alexandrova A.S., Buzhinsky O.I., Gubskiy K.L., Kazieva T.V., Savchenkov A.V., Tugarinov S.N.* // Physics of Atomic Nuclei. 2015. V. 78. № 10. P. 1155.
<https://doi.org/10.1134/S1063778815100063>
9. *Lisitsa V.S., Bureyeva L.A., Kukushkin A.B., Kadomtsev M.B., Krupin V.A., Levashova M.G., Medvedev A.A., Mukhin E.E., Shurygin V.A., Tugarinov S.N., Vukolov K.Yu.* // J. Physics Conference Series. 2012. V. 397. P. 012015.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/397/1/012015>
10. *Рогов А.В., Капустин Ю.В.* // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 2. С. 150.
<https://doi.org/10.7868/S0032816218020064>
11. *Городецкий А.Е., Залавутдинов Р.Х., Буховец В.Л., Маркин А.В., Захаров А.П., Рыбкина Т.В., Золотаревский В.И., Мухин Е.Е., Раздобарин А.Г., Дмитриев А.М.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 12. С. 1.
12. *Goldstein J.I., Newbury D.E., Michael J.R., Ritchie N.W.M., Scott J.H.J., Joy D.C.* Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. N.Y.: Springer, 2018. 554 p.
13. *Рогов А.В., Вуколов К.Ю.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 4. С. 109.
14. *Auberton-Herve A.J., Bruel M.* // International J. High Speed Electronics and Systems. 2000. V. 10. № 1. P. 131.
<https://doi.org/10.1142/S0129156400000179>
15. *Рогов А.В., Вуколов К.Ю., Горшков А.В., Гуреев В.М.* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. 2005. № 2. С. 39.
16. *Новиков И.И., Розин К.М.* Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1990. 336 с.
17. *Городецкий А.Е., Маркин А.В., Буховец В.Л., Войтицкий В.Л., Рыбкина Т.В., Залавутдинов Р.Х., Золотаревский В.И., Захаров А.П., Архипушкин И.А., Казанский Л.П., Дмитриев А.М., Раздобарин А.Г., Самсонов Д.С., Мухин Е.Е.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 10. С. 12.
<https://doi.org/10.31857/S1028096020100088>

Ion-Stimulated Diffusion Pitting upon Sequential Irradiation of Polished Molybdenum Mirrors with Helium and Argon Ions

A. V. Rogov^{1,2,*}, Yu. V. Kapustin^{1,2}, V.M. Gureev^{1,2}, A. G. Domantovskii³

¹*NRC Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia*

²*Fusion Centre, Moscow, 123182 Russia*

³*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia*

**e-mail: alex-rogov@yandex.ru*

The effect of the formation of multiple pits on the surface of polished polycrystalline and monocrystalline Mo mirrors after their successive irradiation with He and Ar ions in a gas discharge is found. The pits have the shape of rounded holes and long, multidirectional linear grooves, the maximum depth of which is equal to the thickness of the layer damaged during polishing. The shape of the linear grooves corresponds to the scratches embedded at different stages of polishing, and their width and depth are determined by the size of abrasive grains. The majority of pits are formed at the boundary between the damaged layer and the slightly deformed substrate material, where the gas diffusion rate sharply decreases. The pitting effect leads to a sharp degradation of the mirrors optical characteristics. obtained results can be used to improve the polishing technology and in the development of mirror cleaning systems for optical diagnostics of thermonuclear plasmas.

Keywords: pitting, mirror degradation, polishing, defect, helium, diffusion, sputtering, gas bubble.