

УДК 533.924; 621.039.066

ВЛИЯНИЕ БОМБАРДИРОВКИ ИОНАМИ ДЕЙТЕРИЯ НА МОРФОЛОГИЮ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ РЕКРИСТАЛЛИЗОВАННОГО ВОЛЬФРАМА

Беляева А.И., Галуза А.А.¹, Савченко А.А., Слатин К.А.

*Национальный Технический Университет “Харьковский Политехнический Институт”,
Харьков, Украина*

¹Институт электрофизики и радиационных технологий НАНУ, Харьков, Украина

E-mail: belyaeva@kharkov.com

В работе исследуется влияние бомбардировки ионами дейтерия на структуру и оптические свойства поверхности образцов зеркал из рекристаллизованного вольфрама. Облучение проводилось при различной температуре образцов в интервале 300÷700 К. Основными методиками были эллипсометрия, рефлектометрия и микроинтерферометрия. Обнаружено, что температурная зависимость оптических свойств облученного рекристаллизованного W имеет аномальную особенность в окрестности температуры 535 К. Показано, что при этой температуре значения коэффициента отражения, измеренные рефлектометрией, и рассчитанные по данным эллипсометрии, качественно различаются. В работе предложена физическая модель обнаруженного эффекта.

Ключевые слова: рекристаллизованный вольфрам, дейтерий, блистеринг, оптические свойства, рефлектометрия, эллипсометрия.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря ряду уникальных свойств, таких, как малый коэффициент распыления и высокая температура плавления, вольфрам (W) в настоящее время является перспективным материалом для элементов, непосредственно обращенных к плазме в термоядерных реакторах, таких как ITER [1] и DEMO [2]. В частности, W рассматривается как перспективный материал для внутрикорпусных зеркал оптической диагностики плазмы в ITER [3].

Как элемент, непосредственно обращенный к плазме, W зеркало будет подвержено бомбардировке сильным потоком низкоэнергетических частиц дейтерия и трития, включающих гелиевую золу. Поэтому следует ожидать изменения оптических свойств W зеркала после длительного воздействия на него водородно-гелиевой плазмой. Влияние облучения низкоэнергетическими ионами водорода и гелия на оптический коэффициент отражения W зеркал исследуется уже на протяжении ряда лет [4, 5]. Степень ухудшения коэффициента отражения была продемонстрирована в зависимости от типа ионов, температуры облучения, энергии ионов и ионного потока.

Одним из факторов, влияющих на оптические свойства W зеркал, является блистеринг. Блистеринг появляется на поверхности W при облучении ионами водородной плазмы с энергиями, много меньшими порога смещения [6, 7].

Была обнаружена температурная зависимость топографии поверхности

образцов рекристаллизованного W, подвергнутых облучению ионами D-плазмы с низкой энергией (38 эВ/D) и большим потоком (10^{22} D/м²) при флюенсе 10^{26} D/м²с [6, 7]. После воздействия плазмой в температурном диапазоне образца 320÷370 К на поверхности W формируются лишь редкие блистеры диаметром 0.5÷2 мкм (рис. 1а [7]). С ростом температуры плотность блистеров увеличивается, и после воздействия при $T = 520\div 570$ К наблюдается интенсивный блистеринг двух типов: большие плоские блистеры размером 10÷30 мкм и малые конусообразные, диаметр которых не превосходит единиц микрон (рис. 1б [7]). При $T = 600\div 700$ К наблюдаются лишь редкие блистеры вблизи границ зерен (рис. 1в [7]), а при $T > 700$ К блистеринг отсутствует.

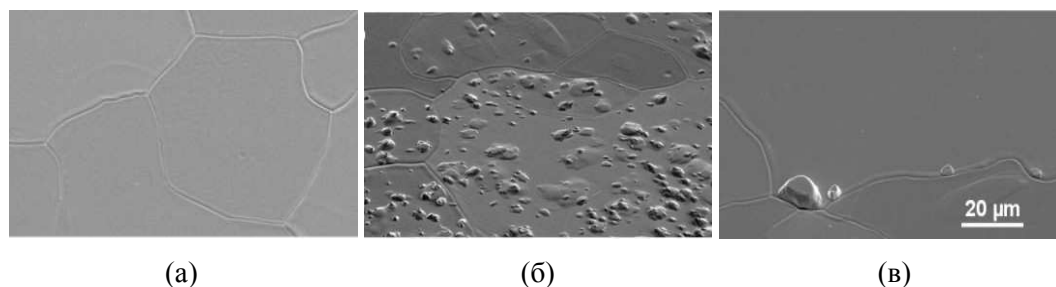


Рис. 1. SEM-фотографии рекристаллизованного W, облученного ионами чистой D плазмы (38 эВ/D) при температурах 330K (а), 535K (б) и 600K (в) до флюенса 10^{26} D/м² [7].

Настоящая работа посвящена изучению зависимости оптических свойств зеркал рекристаллизованного W, подвергнутых облучению большим потоком низкоэнергетических ионов D плазмы, от температуры образцов при облучении.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Образцы зеркал представляли собой пластины поликристаллического W чистотой 99,99% (A.L.M.T. Corp., Japan), размером $10\times 10\times 2$ мм³, полностью рекристаллизованные в атмосфере водорода при $T=2070$ К после порезки и полировки. Для создания пучка плазмы с параметрами, близкими к параметрам плазмы в диверторе ITER, использовался линейный генератор плазмы (JAEA, Tokai, Japan) [8]. Для создания чистой D плазмы в секцию возбуждения закачивался газ D₂ под давлением ~1 Па. При этом был получен плазменный пучок, обогащенный D₂⁺ (~80%). К образцу прикладывалось напряжение смещения -80 В, создающее падающий поток с энергией 38 эВ/D (с учетом потенциала плазмы ~-4 В). Поток и флюенс ионов D составляли 10^{22} D/м²с и 10^{26} D/м², соответственно.

В работе принято следующее определение образцов: буква W (вольфрам) за которой следует число, соответствующее температуре образца при облучении в кельвинах; 0 соответствует необлученному образцу. Т.е., W320 соответствует образцу вольфрама, облученному при $T=320$ К, а W0 - необлученному.

После поступления в Харьков все образцы были подвергнуты очистке ионами

плазмы дейтерия ($E_i \approx 60$ эВ, флюенс $\sim 2.5 \cdot 10^{23}$ ион/м²), полученной в условиях электронно-циклотронного резонанса в установке DSM-2 [9]. Эта процедура была проведена для очистки образцов от загрязнений, которые могли образоваться при хранении образцов на воздухе после окончания экспериментов в Японии по воздействию на них большого флюенса ионов дейтериевой плазмы.

Оптические измерения включали в себя: (1) прямые измерения коэффициента зеркального отражения (КО) $R(\lambda)$ в интервале длин волн 220÷650 нм при нормальном падении света и (2) измерение показателя преломления n и коэффициента поглощения k с помощью эллипсометрической методики [10]. Измерения эллипсометрических параметров (Ψ и Δ) выполнялись при различных углах падения на длине волны $\lambda = 633$ нм [11].

Микрофотографии поверхности образцов были получены с помощью микроскопов ММИ-2 (малое увеличение) и МИИ-4 (большое увеличение). Интерферограммы получены с помощью интерферометрического комплекса [12].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Данные микроскопии и микроинтерферометрии

Получены микрофотографии исследуемых образцов вольфрама. На рис. 2а и 2б с малым увеличением даны фотографии поверхности образцов W535 и W600, соответственно. В случае образца W535 (рис. 2а) облученная область представляет собой светлый центральный круг, который четко виден на микрофотографии, где облученная область контрастно отличается от более темной не облученной. На остальных образцах (W695, W405, W483, W600, W320) она видна лишь при некоторых углах падения света. В качестве примера на рис. 2б облученная область образца W600 обведена пунктирной линией. Поскольку внешне образцы (W695, W405, W483, W600, W320) не отличаются друг от друга, в дальнейшем все примеры будут приводиться для образца W600.

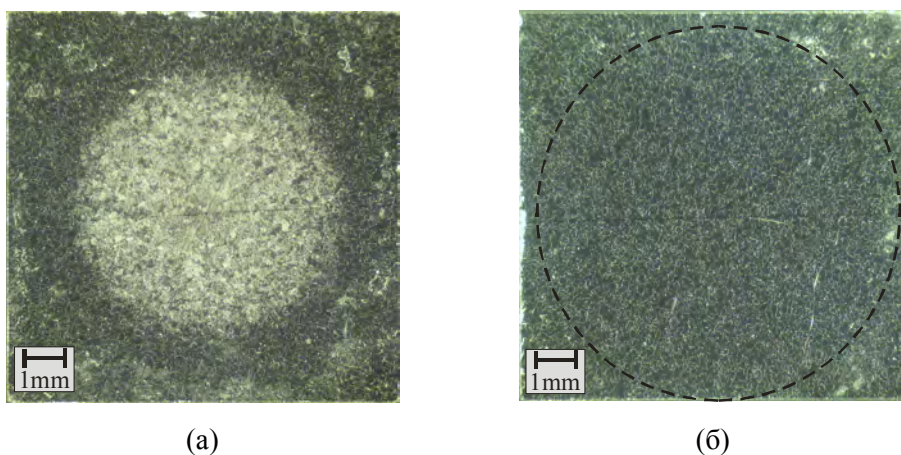


Рис. 2. Общий вид поверхности образцов W535 (а) и W600 (б).

Микрофотография показала, что облученная и необлученная области представляют собой поверхность, разбитую на зерна произвольной формы с размерами 20-250 мкм, что количественно совпадает с результатами [6]. На рис. 3а даны примеры соседствующих зерен малого (А) и большого (В) размеров. Методом интерферометрии выявлено, что зерна всех необлученных образцов имеют зеркальную поверхность, о чем свидетельствует интерференционная картина чистой поверхности образца (рис. 3б), состоящая из параллельных полос.

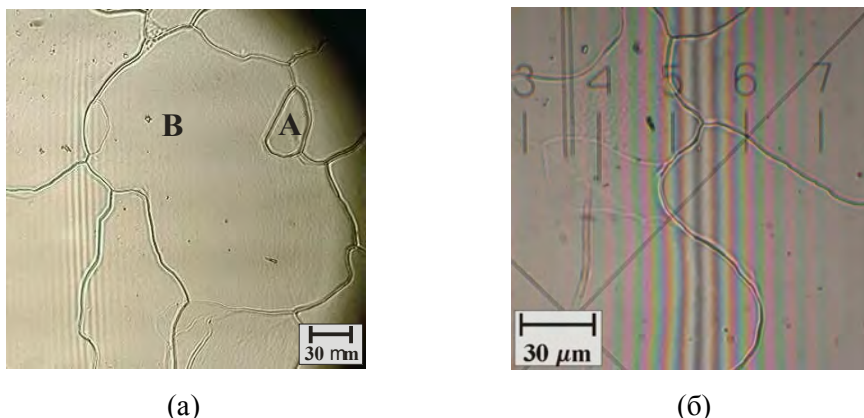


Рис. 3. Структура поверхности необлученных образцов вольфрама: (а) – микрофотография поверхности (А – малое зерно, В – зерно большого размера), (б) – интерференционная картина.

Границы между зернами очень четкие. На рис. 4а приведена интерференционная картина поверхности образца вольфрама в области границы двух зерен. Интерференционные полосы, попадая на границу между зернами, искривляются (пунктирная кривая на рис. 4а), что служит индикатором изменения высоты поверхности. Анализ позволил оценить высоты возникающих при этом ступенек, размеры которых составляют $1.3 \div 5.3$ мкм. С помощью микроинтерферометрии была определена форма границ между зернами. На рис. 4б приведено графическое пояснение хода интерференционного минимума на рис. 4а - формы границы между зернами с характерными размерами. На границе зерен поверхность плавно возвышается с обеих сторон, затем наблюдается резкий спад между «холмами», нижняя точка (между холмами) находится на одном уровне с поверхностью образца.

При микрофотографировании был обнаружен блистеринг на облученной поверхности образцов и выявлена температурная зависимость его появления. При температуре 320К на поверхности W наблюдается незначительный блистеринг диаметром $0.5 \div 2$ мкм (рис. 5а) в соответствии с данными [7]. С увеличением температуры на поверхности образцов увеличивается блистеринг. На рис. 5б приведена микрофотография образца W405, на которой заметно, что количество блистеров увеличилось по сравнению с образцом (W320), облученным при более низкой температуре (рис. 5а).

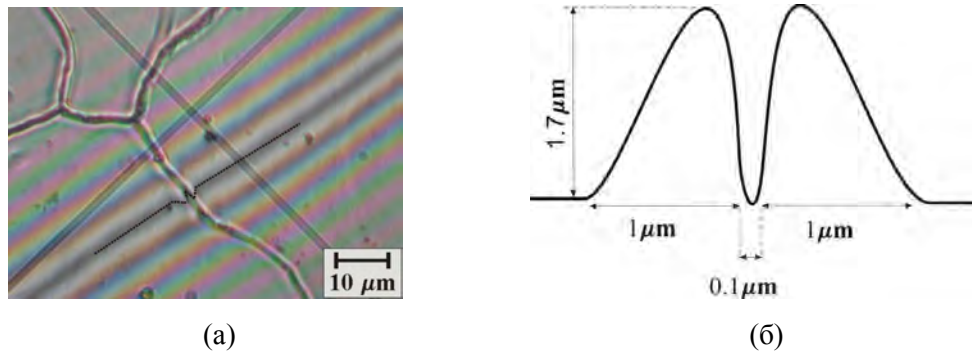


Рис. 4. Структура поверхности необлученных образцов W: (а) – интерференционная картина на границе зерен (пунктиром показан ход интерференционного минимума), (б) – структура и параметры межзеренной границы.

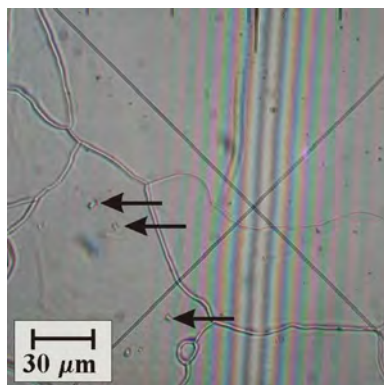
При дальнейшем увеличении температуры плотность блистеров различной формы на поверхности образца увеличивается. Об этом свидетельствует микрофотография образца W483 (рис. 5в). Встречаются как конические (отмечены одинарной стрелкой), так и плоские (отмечены двойной стрелкой) блистеры. Максимум плотности блистеров наблюдается при температуре 535K (рис. 5г).

Дальнейший рост температуры приводит к уменьшению блистеринга, что видно из микрофотографий образцов W600 и W695 (рис. 5д и 5е, соответственно).

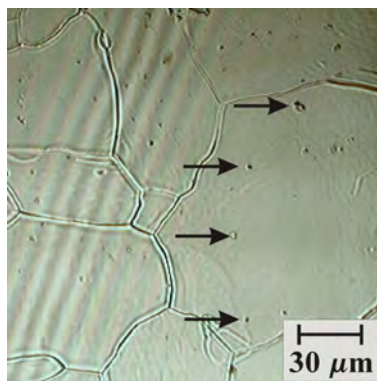
$T \sim 535K$ – особая область температур, которая характеризуется значительным проявлением блистеринга, вследствие чего морфология поверхности образца W535 была изучена более тщательно. Облученная область каждого зерна образца W535 покрыта блистерами, плотность которых в различных зернах различна, что, в соответствии с литературными данными [6], связано с различной ориентацией зерен. На квадрат со стороной $30 \mu m$ приходится от 3 до 20 блистеров. На рис. 6 стрелками отмечены области с высокой (А) и низкой (В) плотностью блистеров.

Блистеры можно разделить на два вида: плоские и конические. Плоские – имеют в основном неправильную круглую или овальную форму и характерные размеры $d \sim 4.5 \div 18 \mu m$. Характерные высоты плоских блистеров составляют $7 \div 12 \mu m$. На рис. 7 двойной черной стрелкой обозначен плоский большой блистер диаметром $20 \mu m$. По отклонению интерференционного максимума можно оценить величину возвышения плоского блистера над поверхностью зерна ($h \sim 8.5 \mu m$). Рядом с ним, в этом же зерне, имеется подобный блистер меньшего размера. Конические блистеры, как правило, имеют меньший размер (диаметр $1 \div 5 \mu m$).

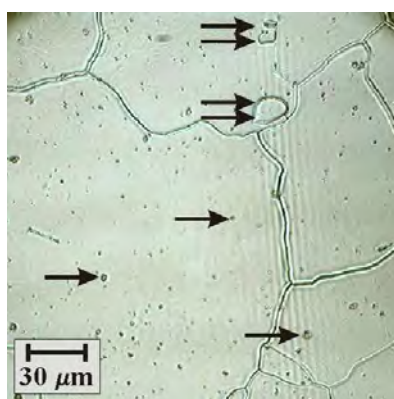
Замечено, что в пределах одного зерна появляются в основном либо только конические блистеры, либо – только плоские. По-видимому, это зерна различной ориентации [6]. Предварительные результаты EBSD-дифракции обратного рассеяния электронов показали, что конические блистеры малых размеров появляются только на поверхности с ориентацией $\langle 111 \rangle$ [13].



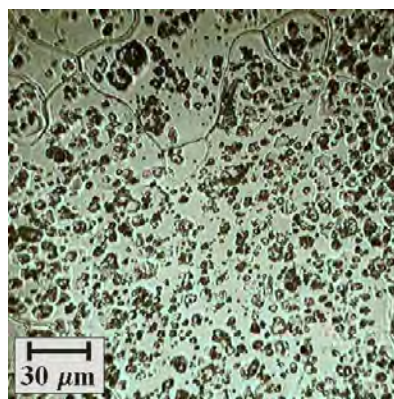
(а)



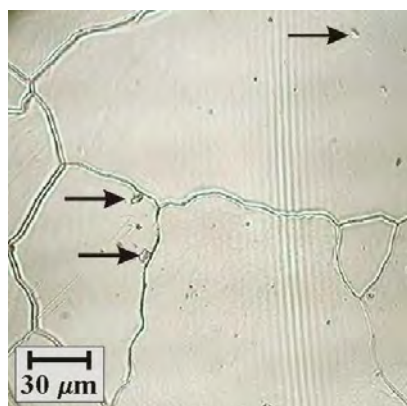
(б)



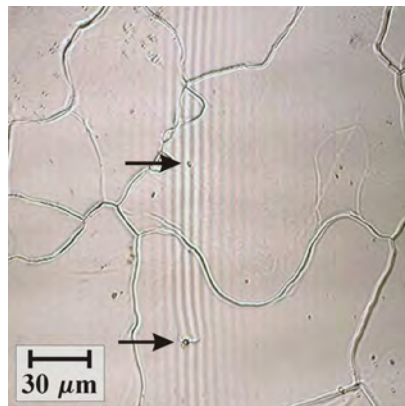
(в)



(г)



(д)



(е)

Рис. 5. Структура поверхности образцов W330 (а), W405 (б), W483 (в), W535 (г), W600 (д), W695 (е).

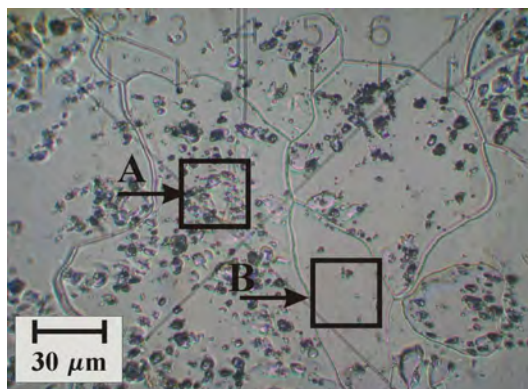


Рис. 6. Поверхность образца W535.

Микрофотография соседних зерен с высокой (область А) и низкой (область В) плотностью блистеринга.

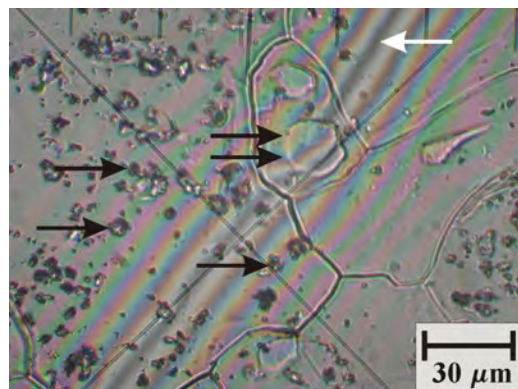


Рис. 7. Поверхность образца W535.

Интерференционная картина в области конических (указаны одинарной черной стрелкой) и плоских (указаны двойной черной стрелкой) блистеров.

2.2. Оптические и эллипсометрические данные

На рис. 8 приведены экспериментальные зависимости величин Ψ и Δ для исследуемых облученных образцов и образца W0 (с целью получения данных о начальном состоянии образцов) от угла падения зондирующего излучения.

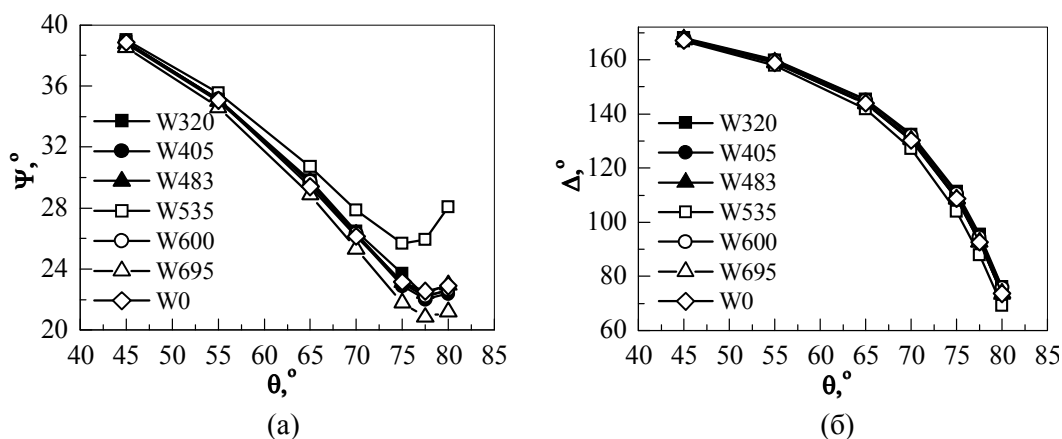


Рис. 8. Угловые зависимости эллипсометрических параметров Ψ (а) и Δ (б) исследуемых образцов.

Видно, что полученные угловые зависимости Ψ и Δ практически совпадают для образцов W320, W405, W483, W600, W695 и W0. Значение Δ для образца W695 совпадает со значением Δ других образцов, но параметр Ψ несколько отличается. Образец W535 значительно выделяется по обоим параметрам. Более детально эти зависимости обсуждаются ниже.

Отличие образца зеркала W535 заметно при сравнении температурных зависимостей главного угла (рис. 9). Главный угол – это угол падения, при котором $\Delta=90^\circ$. Значение главного угла составляет $78^\circ \pm 0.2^\circ$ для всех образцов, кроме W535, для которого главный угол - 77.15° .

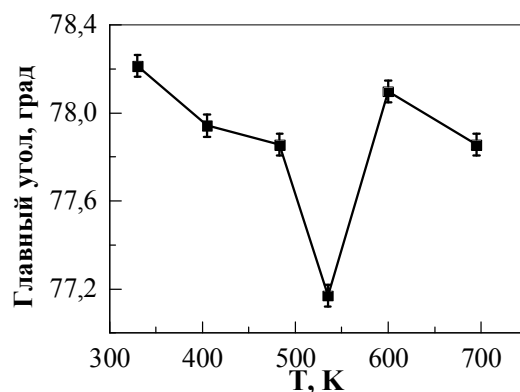


Рис. 9. Зависимость главного угла от температуры образца при облучении.

Подобное отличие образца W535 наблюдается также для оптических параметров n и k (рис. 10а): n падает, а k возрастает. С использованием этих значений n и k был рассчитан коэффициент нормального отражения R (рис. 10б). Необходимо обратить внимание на качественное отличие результатов прямых измерений R для W535 (R падает) и расчетов по данным эллипсометрии (R возрастает). Для остальных образцов результаты практически совпадают.

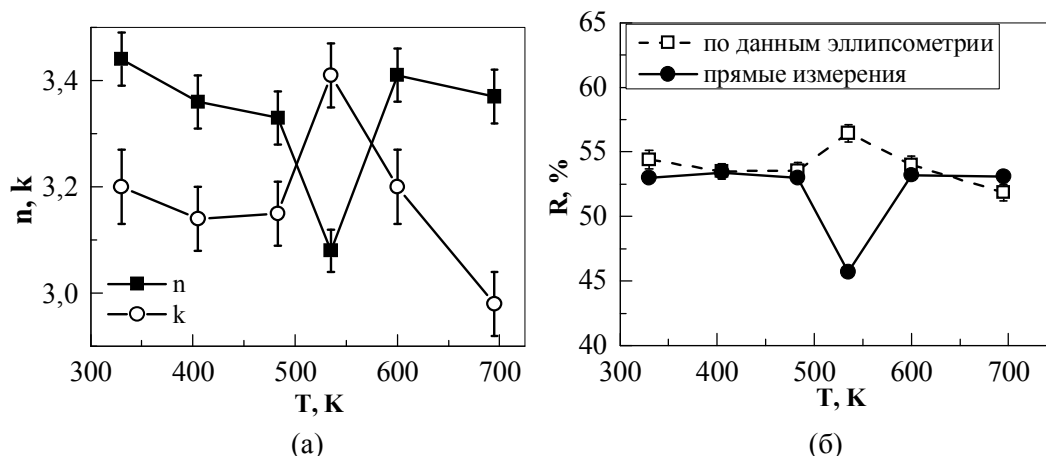


Рис. 10. Зависимости оптических констант n и k образцов W от температуры при облучении (а); сравнение прямых измерений коэффициента отражения R с рассчитанными по данным эллипсометрии при облучении при различных температурах (б).

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования (рис. 5) демонстрируют зависимость блистеринга от ориентации зерен, т.е. некоторые зерна почти не имеют блистеров, в то время как остальные почти полностью покрыты блистерами. Это связано с тем, что зерна с ориентацией (111) более подвержены блистерингу, чем зерна других ориентаций [7]. Экспериментальные условия [7] достаточно близки к условиям нашего эксперимента. Вполне вероятно, что оптические свойства гладких участков этих образцов отличаются от аналогичных свойств поверхности W с блистерингом.

Рассмотрим более детально эллипсометрические экспериментальные данные. На рис. 11 приведены угловые зависимости величин $\delta\Psi$ и $\delta\Delta$, характеризующих изменения эллипсометрических параметров Ψ и Δ исследуемых образцов в результате облучения при разных температурах относительно этих же параметров для необлученного образца W0. Величины $\delta\Psi$ и $\delta\Delta$ вычислялись по соотношениям:

$$\delta\Psi(\theta) = \frac{\Psi(\theta) - \Psi_{W0}(\theta)}{\Psi_{W0}(\theta)} \cdot 100\%, \quad \delta\Delta(\theta) = \frac{\Delta(\theta) - \Delta_{W0}(\theta)}{\Delta_{W0}(\theta)} \cdot 100\%,$$

где Ψ_{W0} и Δ_{W0} – значения Ψ и Δ для необлученного образца W0.

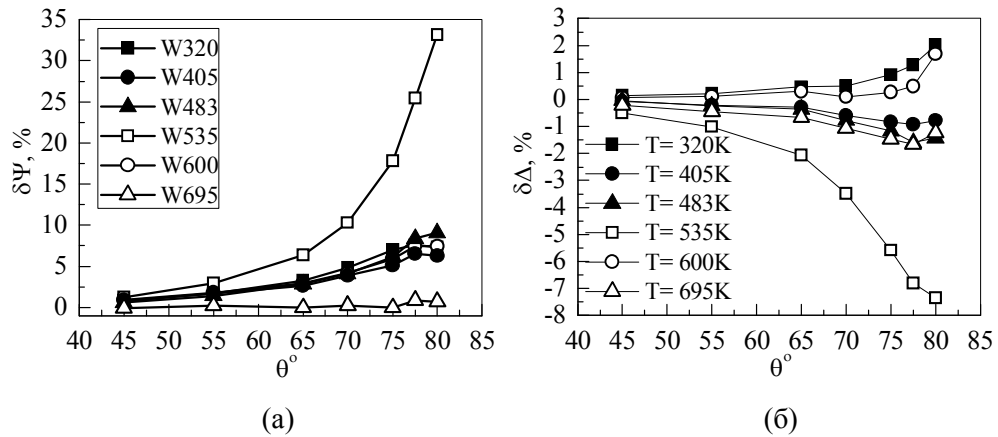


Рис. 11. Угловые зависимости относительных изменений эллипсометрических параметров Ψ (а) и Δ (б) ($\delta\Psi$ и $\delta\Delta$, соответственно) исследуемых образцов в результате облучения при разных температурах.

Видно, что по параметру Ψ (рис. 11а) образцы разбились на 3 четко выраженные группы: в первую группу входят образцы W320, W405, W483 и W600 (среди которых разброс не превосходит 3% даже для самых чувствительных углов), отличающиеся от W0 на 7÷10% в области больших углов. Образцы этой группы в нашей задаче можно считать одинаковыми. Во вторую группу входит один образец W535, который отличается от первой группы и W0 на десятки процентов. Третья группа состоит из образца W695, характеристики которого практически совпадают с W0. Т.е., облучение при максимальной температуре привело к существенно

меньшим изменениям, чем облучение при более низких температурах. Для параметра Δ (рис. 11б) только образец W535 сильно отличается от W0; все остальные образцы отличаются друг от друга и от W0 не более, чем на 2% даже для самых чувствительных углов.

В целом можно сказать, что параметр Ψ более чувствителен к облучению, чем Δ (у которого изменения даже для W535 не превосходят 8% по сравнению с 35% у Ψ). Это может свидетельствовать в пользу развития шероховатости, связанной с развитием блистеринга, у W320, W405, W483 и W600, для которых изменения касаются только Ψ , поскольку именно Ψ в первую очередь реагирует на появление шероховатости.

Совпадение угловых зависимостей Ψ и Δ для необлученного образца (W0) и облученного при 695K (W695) свидетельствует о том, что облучение при высоких температурах практически не влияет на состояние поверхности W под влиянием дейтериевой плазмы. Не удивительно, что при $T \geq 700\text{K}$ блистеринг отсутствует. Этот результат находится в соответствии с существующим в настоящее время модельным представлением о взаимодействии дейтериевой плазмы с поверхностью вольфрама в интервале температур 300÷700K.

При воздействии пучка низкоэнергетической плазмы с высоким потоком ($\geq 10^{21}\text{D}/\text{m}^2$) в зоне ионной имплантации вольфрама (на глубине нескольких нанометров) возникает сильное поле сжимающего напряжения. При этом концентрация дейтерия в междоузлиях определяется потоком ионов. При повышении температуры облучения на границе зерен генерируются вакансии, затем вакансионные кластеры, которые являются зародышами образования газонаполненных пузырей. При $T \sim 480\div 500\text{K}$ увеличивается пластичность W, что определяет возможность сброса накопленных напряжений благодаря тому, что образовавшиеся пузыри выдавливают на поверхность вдоль осей скольжения объем вольфрама, сравнимый с объемом полости на границе зерна. Реализация высокого уровня пластичности возможна при наличии двух факторов: поля напряжений и высокой концентрации дейтерия в междоузельных позициях. В этом механизме определяющую роль играют границы между зернами, сформированные в процессе рекристаллизации. Как показали наши исследования, для нерекристаллизованного W блистеринг в данном диапазоне температур не наблюдался.

Температура, при которой происходит десорбция дейтерия, изначально находившего в полостях в виде молекул, составляет 500-600K. С повышением температуры дейтерий не может накапливаться в виде молекул в вакансиях и вакансионных кластерах. Поэтому в условиях нашей плазмы для рекристаллизованного W блистеринг исчезает при $T \geq 700\text{K}$. При этих температурах вакансионные комплексы, формирующиеся в результате стресса, не могут трансформироваться в газонаполненные пузырьки с высоким давлением внутри. Дейтерий не может накапливаться в них в виде молекул. Поэтому нет движущей силы для выдавливания W на поверхность. Блистеринг не формируется и, соответственно, нет причин для модификации поверхности под влиянием облучения. Поэтому и нет воздействия облучения на оптические характеристики поверхности.

Теперь проанализируем качественное отличие между значениями КО, рассчитанными по данным эллипсометрии и измеренными рефлектотроном (рис. 10б). Эллипсометрия и рефлектотрометрия основаны на разных физических эффектах. В рефлектотрометрии зеркального отражения измеряется полная энергия, зеркально отраженная от образца. Соответственно, наличие незначительных дефектов поверхности может приводить к увеличению диффузной компоненты в отражении, и, следовательно, к падению коэффициента зеркального отражения. С другой стороны, эллипсометрия основана на исследовании изменения состояния поляризации зеркальной компоненты зондирующего излучения, которое не зависит от полной энергии падающей и отраженной волн, а зависит только от оптических констант поверхности. В результате, наличие рассеяния при отражении уменьшает энергетический коэффициент зеркального отражения, но в геометрическом приближении не влияет на состояние поляризации зеркальной компоненты, поскольку диффузная компонента не регистрируется.

Таким образом, наличие на поверхности макродефектов, рассеивающих падающее излучение, не влияет на эллипсометрические данные, а сами эти данные содержат информацию об оптических свойствах только тех участков поверхности, которые отражают зеркально.

В принципе, возможна ситуация, когда при развитом рельефе поверхности в результате сложных переотражений излучения существенная часть диффузной компоненты отразится под зеркальным углом (рис. 12а). Это приведет к тому, что отраженное излучение будет представлять собой суперпозицию нескольких лучей, которые из-за различных условий отражения будут иметь разные поляризации (лучи I и II на рис. 12а). В результате, поляризация регистрируемой волны будет иметь сложную структуру (фактически, имеет место деполяризация), которая не может быть проанализирована в рамках классической эллипсометрии, и не будет характеризовать оптические свойства поверхности. Если такая ситуация реализуется, отраженное излучение деполяризуется, и полного затемнения (при нулевом методе измерений) линейными поляризаторами не происходит [14].

При эллипсометрических измерениях образца W535 наблюдалось практически полное гашение отраженного излучения, что свидетельствует об отсутствии деполяризации и, следовательно, незначительности вклада излучения, рассеянного на дефектах, в эллипсометрические результаты. Таким образом, в случае образца W535 модель поверхности имеет вид, приведенный на рис. 12б.

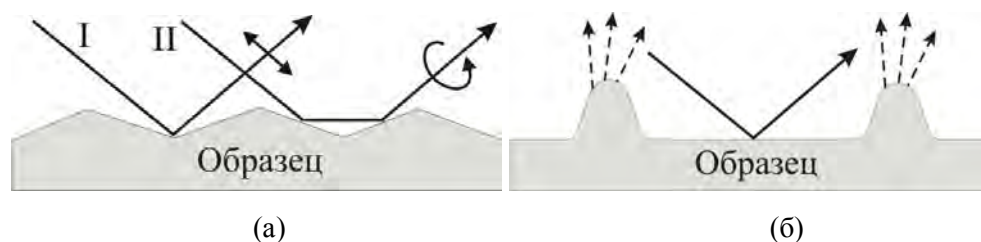


Рис. 12. Модели рассеяния света поверхностями с различной структурой: (а) – зеркальное отражение + деполяризация, (б) – зеркальное отражение + рассеяние без деполяризации зеркальной компоненты.

Наличие рассеяния, связанного с образованием блистеринга, приводит к падению коэффициента отражения, измеренного прямым способом (рис. 10б). Рост коэффициента отражения по данным эллипсометрии означает, что модификация поверхности заключается не только в изменении морфологии в результате блистеринга, но и в изменении электронной структуры той части поверхности, которая не затронута блистерингом; эллипсометрия определяет оптические константы именно этих участков поверхности.

Небольшое увеличение КО (рис. 10б), полученное по данным эллипсометрии, может быть связано либо с увеличением коэффициента поглощения k в результате облучения (рис. 10а), либо с формированием на поверхности W535 квази пленки. Для интерпретации данных эллипсометрии было рассмотрено несколько моделей поверхности. Оптимальной оказалась модель чистой поверхности. Это значит, что толщина модифицированного приповерхностного слоя превышает глубину проникновения света или что этот слой не имеет четких границ и поэтому не может быть определен как пленка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптические свойства образцов зеркал из рекристаллизованного W были изучены после их экспонирования ионам дейтериевой плазмы при различной температуре образцов. Обнаружено резкое изменение коэффициента отражения при экспозиции образца с температурой $T=535$ K.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что на поверхности W535 имеют место два процесса: (1) появление блистеринга и (2) изменение электронной структуры поверхностного слоя. Тот факт, что модель чистой поверхности оказалась оптимальной, означает, что модифицированный слой толще, чем глубина проникновения света или что его границы размыты. Очевидно, что эллипсометрия и рефлектометрия эффективно дополняют друг друга при исследовании такого сложного явления, как блистеринг.

Список литературы

1. Key ITER plasma edge and plasma/material interaction issues / Federici G., Andrew P., Barabaschi P. et al. // J. Nucl. Mater. – 2003. – V. 313-316. – P. 11-22.
2. Design Study of Fusion DEMO Plant at JAERI / Tobita K., Nishio S., Enoda M. et al. // Fusion Eng. Des. – 2006. – V. 81. – P. 1151-1158.
3. First mirrors for diagnostic systems of ITER / Litnovsky A., Voitsenya V.S., Costley A. et al. // Nucl. Fusion – 2007. - V. 47. - P. 833.
4. Irradiation test of Mo- and W-mirrors for ITER by low energy deuterium ions / Sugie T., Kasai S., Taniguchi M. et al. // J. Nucl. Mater. – 2004. – V. 329-333. – P. 1481-1485.
5. In situ reflectivity of tungsten mirrors under helium plasma exposure / Sakaguchi W., Kajita S., Ohno N. et al. // J. Nucl. Mater. – 2009. – V. 390-391. – P. 1149-1152.
6. Subsurface morphology changes due to deuterium bombardment of tungsten / Lindig S., Balden M., Alimov V.Kh. et al. // Phys. Scr. – 2009. – T. 138. – 014040.
7. Surface morphology and deuterium retention in tungsten exposed to low-energy, high flux pure and helium-seeded deuterium plasmas / Alimov V.Kh., Shu W.M., Roth J. et al. // Phys. Scr. – 2009. – T. 138. – 014048.

8. Ion species control in high flux deuterium plasma beams produced by a linear plasma generator / Luo G.-N., Shu W.M., Nakamura H. et al. // Rev. Sci. Instrum. – 2004. – V. 75. – P. 4374-4378.
9. Orlinski D.V. First mirrors for diagnostic systems of an experimental fusion reactor. I. Simulation mirror tests under neutron and ion bombardment / Orlinski D.V., Voitsenya V.S., Vukolov K.Yu. // Plasma Dev. Oper. – 2007. – V. 15. – P. 33-75.
10. Optical properties of Al mirrors under impact of deuterium plasma ions in experiments simulating ITER conditions / Bardamid A.F., Belyaeva A.I., Davis J.W. et al. // J. Nucl. Mater. – 2009. – V. 393. – P. 473-480.
11. System for the Automation of a Cryogenic Spectral Ellipsometer / Galuza A.A., Slatin K.A., Belyaeva A.I. et al. // Instruments and Experimental Techniques. – 2003. – V. 46. – P. 477-479.
12. Программно-апаратний комплекс для мікроінтерферометричних досліджень / Беляєва А.И., Галуза А.А., Кудленко А.Д. и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 6. – С. 135-136.
13. Blister bursting and deuterium bursting release from tungsten exposed to high fluences of high flux and low energy deuterium plasma / Shu W.M., Wakai E., Yamanishi T. et al. // Nucl. Fusion. – 2007. – V. 47. – P. 201-209.
14. On the theory of the ellipsometry of an actual surface / Gainutdinov I.S., Nesmelov E.A., Shaimardanov R.G. et al. // J. Optical Technol. – 2008. – V. 75. – P. 41-43.

Беляєва А.И. Вплив бомбардування іонами дейтерію на морфологію та оптичні властивості поверхні рекристалізованого вольфраму / Беляєва А.И., Галуза А.А., Савченко А.О., Слатин К.О. // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Фізико-математичні науки. – 2010. – Т. 23(62), №3. – С. 136-148.

Робота присвячена дослідженню впливу бомбардування іонами дейтерію на структуру та оптичні властивості поверхні зразків дзеркал з рекристалізованого вольфраму. Опромінення проводились при різних температурах зразків у інтервалі 300÷700 К. Основними методиками були еліпсометрія, рефлектометрія й мікроінтерферометрія. Виявлено, що температурна залежність оптичних властивостей рекристалізованого W, що опромінено, має аномальну особливість біля температури 535 К. Показано, що при цій температурі значення коефіцієнту відбиття, отримані за допомогою рефлектометрії, та розраховані за даними еліпсометрії, якісно розрізняються. У роботі запропоновано фізична модель цього ефекту.

Ключевые слова: рекристалізований вольфрам, дейтерій, блістерінг, оптичні властивості, рефлектометрія, еліпсометрія.

Belyaeva A.I. Influence of deuterium ions bombardment on the morphology and optical properties of recrystallized tungsten / Belyaeva A.I., Galuza A.A., Savchenko A.A., Slatin A.A. // Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2010. – Vol. 23(62), No.3. – P. 136-148.

The paper is devoted to investigation of deuterium ions bombardment influence on the structure and optical properties of the surface of recrystallized. Irradiation was carried out under at different samples temperature within 300÷700 K interval. Ellipsometry, reflectometry and microinterferometry were used as the principle experimental techniques. It was found that the temperature dependencies of the irradiated recrystallized tungsten optical properties have anomalous peculiarity in the neighborhood of 535 K temperature. It is shown that values of reflection coefficient measured directly and calculated after ellipsometric data differ qualitatively near this temperature. A physical model of the found phenomenon is suggested.

Keywords: recrystallized tungsten, deuterium, blistering, optical properties, reflectometry, ellipsometry.

Поступила в редакцію 09.11.2010 г.