

УДК 621.039.665

## МОЖНО ЛИ ИЗБЕЖАТЬ ОБРАЗОВАНИЯ БЛИСТЕРОВ В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛАХ?

(Краткий обзор опубликованных результатов экспериментальных исследований)

*Д.В. Орлинский (ИЯС РНЦ «Курчатовский институт»,  
Россия, 123182 Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1)*

Системы диагностики плазмы и управления разрядом на действующих крупных термоядерных установках обычно оснащаются зеркалами для ввода зондирующего и вывода собственного или отражённого оптического и микроволнового излучения. Вместе с тем эти зеркала подвержены бомбардировке ионами плазмы, а также на них могут осаждаться ионы примесей, обычно в плазме присутствующих. В течение последних десятилетий воздействие ионных потоков на металлы активно исследовалось с точки зрения их влияния на некоторые металлические элементы конструкции вакуумной камеры, что может оказаться существенным для сохранности стенок дивертора токамака. А в последние годы на возможность снижения отражательной способности металлических зеркал обратили внимание и специалисты, разрабатывающие системы диагностики плазмы. При взаимодействии быстрых ионов с поверхностью зеркала его отражательная способность может ухудшаться в результате катодного распыления, если энергия ионов превышает несколько сот электрон-вольт, и, как выяснилось в последние десятилетия, в результате накопления и последующего разрушения газовых пузырей (блистеров) в приповерхностном слое зеркала, накапливаемых в процессе облучения металла ионами газов с энергиями, превышающими несколько электрон-вольт. В предлагаемом вниманию читателей кратком обзоре публикаций, главным образом, японских авторов излагаются основные результаты этих ещё не завершённых исследований.

**Ключевые слова:** блистер, зеркало, взаимодействие иона с поверхностью вольфрама.

IS IT POSSIBLE TO AVOID OF BLISTER FORMATION IN THE DIAGNOSTIC MIRRORS? D.V. ORLINSKI. The systems of the plasma diagnostic and discharge management at the large thermonuclear installations are usually used mirrors for introduce of a probing and to turn out of the own or reflected optical or microwave radiation. At the same time these mirrors may be subjected to the plasma ions bombardment and on their surface may fall different mixtures usually are presented in the plasma. During the last tens years the interaction of the ion fluxes with different metals were actively investigated for to study their influence on the metal elements of the vacuum chamber, what may be essential for a conservation of the divertor walls in the tokamaks. At the last years the specialists in the plasma diagnostics were turned their attention on a possibility of the metal mirrors reflectivity lowering. During fast ions interaction with the mirror surfaces their reflectivity may be loss in a result of a cathode sputtering if their energy is larger then a some hundred of an electron-volts and, as was cleared during the last decades, as a result of appearance of the gas bubbles (the blisters) at the surface layer and subsequent their destruction. In proposals for readers attention short survey of the publications, manly from Japanese publications, there are given the main of yet not finished investigations.

**Key words:** blister, mirror, ion-volfram interaction.

### ВВЕДЕНИЕ. О БЛИСТЕРАХ

При взаимодействии пучка ионов с металлами часть ионов отражается, а остальные проникают внутрь металла на глубину, определяемую длиной пробега ионов [1]. Если энергия ионов достаточно велика, то возможно разрушение металла (катодное распыление). Если ионы, попадающие внутрь металла, химически с ним не взаимодействуют, они вынуждены найти себе место в его структуре, точнее, в её дефектах и имеющихся вакансиях. При большом флюэнсе ионов внутри тела возникают газовые скопления, растущие в продолжающемся потоке ионов. При достижении критической концентрации имплантированного газа (0,3—1 атомов на атом мишени) на поверхности металла наблюдаются вспучивания (блистеры) и отслаивание чешуек (шелушение).

Во многих системах диагностики плазмы и управления разрядом должны использоваться зеркала, помещаемые внутри термоядерного реактора вблизи плазмы. Поверхность зеркала будет неизбежно подвержена облучению потоком частиц из плазмы, что приведёт не только к распылению его отражающей поверхности, но и к конкурирующему с распылением процессу образования и последующему разрушению блистеров. Выбор такой схемы размещения зеркала, в которой удастся избежать распыления его поверхности, не исключает взаимодействия с зеркалом частиц низкой энергии, что обычно приводит к появлению в металле газовых пузырей. Даже если поверхность не будет разрушаться, её оптические свойства могут быть нарушены настолько, что может воспрепятствовать нормальной работе системы диагностики, в схему которой включено зеркало. С этим обстоятельством связано большое число

экспериментальных работ, ставящих своей целью защиту диагностических систем от возможной потери включённых в неё зеркал.

В настоящей статье приводится краткий обзор экспериментальных работ, наиболее интересных с точки зрения автора.

### УСЛОВИЯ БЛИСТЕРИНГА [1]

К влияющим на образование блистеров факторам [1] относятся параметры пучка ионов (флюенс ионов, в меньшей мере их энергия, плотность потока, угол его падения), твёрдого тела (состав, температура, структура, предварительная обработка) и условия их взаимодействия (растворимость, коэффициент диффузии, химические реакции). Тем самым для термоядерного реактора оказывается существенным взаимодействие гелия и изотопов водорода, а также, возможно, углерода с конструкционными металлами — W, Mo и нержавеющей сталь для диагностических зеркал и стенок вакуумной камеры. Для металлов существенна их структура. Зеркала для диагностических систем должны иметь полированную поверхность и, как правило, монокристаллическую структуру, неидеальность которой может привести к скоплению газа в её нарушениях и вакансиях и тем самым появлению на поверхности блистеров.

Блистеры исследуются примерно с 60-х годов прошлого столетия. Показано, что с ростом энергии (рис. 1) облучающих ионов их флюенс, при котором возникают блистеры, также возрастает. Это приводит к тому, что ионы, имеющие невысокую, но достаточную для имплантации в металл энергию (более примерно 5–6 эВ), проникают в него и в приповерхностном слое металла появляются скопления газа. При более высокой энергии в металлах появляются радиационные нарушения структуры и, соответственно, вакансии и газовые скопления образуются на большей глубине. Ограничивающие их стенки выдерживают более высокое давление, и крышки блистеров оказываются толще.

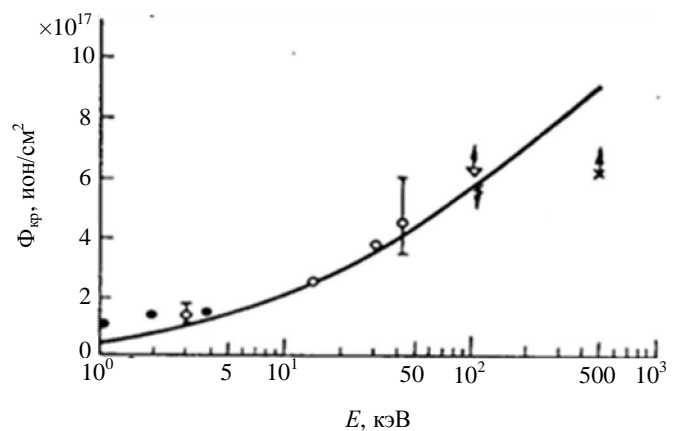


Рис. 1. Зависимость критической дозы формирования блистеров в ниобии от энергии ионов  $\text{He}^+$  [2]: — — Ю. Мартыненко. Физика плазмы, 1977, № 3, с. 697; • — J. Roth et al. J. Nucl. Mater., 1974, № 3; ○ — M. Guseva et al. Ibid., 1976, vol. 63, p. 245; ×, ▽ — S.K. Das, M. Kaminsky. Proc. of Symposium, Chicago, 1975 and J. Appl. Phys., 1973, vol. 44, p. 25

### МОЖНО ЛИ ИЗБЕЖАТЬ ПОЯВЛЕНИЯ БЛИСТЕРОВ?

Многочисленные исследования блистеринга при облучении разных металлов, из которых могут быть изготовлены диагностические зеркала для систем термоядерных установок, пока не привели к выбору металлов и методов их обработки, которые позволили бы избежать появления на них блистеров. Вместе с тем обнаружили возможные пути решения этой проблемы. В качестве материала, пригодного для использования как в конструкции дивертора вакуумной камеры реактора, так и для изготовления диагностических зеркал, акцент в большинстве работ сделан на исследовании вольфрама, как металла, отражательная способность зеркала из которого, как показали его стендовые испытания, в наименьшей степени деградирует при катодном распылении [3]. Кроме того, вольфрам предполагается применить в качестве конструкционного материала в диверторе ИТЭР. Во многих экспериментах с диверторами он уже исследовался. Поэтому рассмотрим вопросы, связанные с применением именно этого, как сейчас представляется, наиболее пригодного для диагностических зеркал материала.

**Выбор способа изготовления и структуры вольфрамового зеркала.** В опубликованных исследованиях использовались разные образцы вольфрама: моно- и поликристаллические, частично и полностью рекристаллизованные образцы, прокатанные, осаждённые плёнки и прессованные порошки.

В нескольких публикациях (например, [4] и [5]) показано, что блистеров не было в монокристаллическом W ( $\text{D}^+$ , 100 эВ, 333 и 1130 К, флюенс до  $10^{26}$  м $^{-2}$ ) в отличие от поликристаллического W [4]

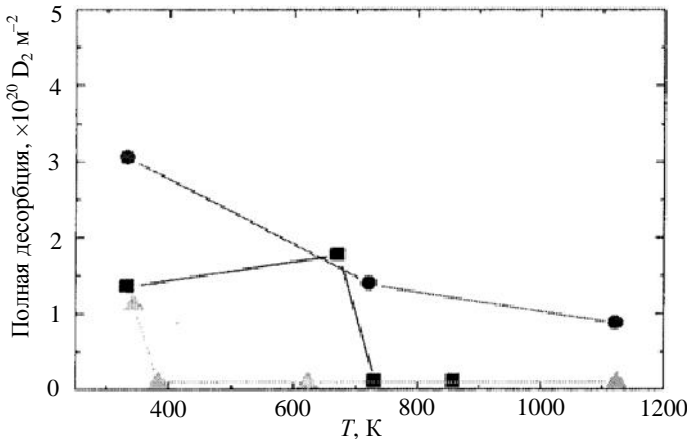


Рис. 2. Зависимость полной десорбции дейтерия от температуры облучения образцов вольфрама, изготовленных методом порошковой металлургии (■ — PM—W), вакуумного плазменного нанесения (● — WPS—WIG) и монокристаллического (▲ — монокристалл—W) [4]

температуры рекристаллизации, около 1500 К) образцов вольфрама. Затем часть тех и других образцов подвергалась рекристаллизации при 2200 К. У рекристаллизованных образцов при облучении ионами  $H^+$  с энергией 100 эВ до флюенса  $4 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2}$  в отличие от остальных образцов блистеры не возникали.

В итоге можно полагать, что в идеальных бездефектных монокристаллах можно ожидать полного отсутствия образования блистеров. Хотя в условиях термоядерного реактора в металлических зеркалах могут, и будут, образовываться радиационные дефекты, создающие условия для накопления газовых пузырей. Поэтому во избежание образования блистеров должны разрабатываться методы, которые обезопасят диагностические зеркала в системах диагностики и управления термоядерного реактора.

**Влияние температуры облучаемых образцов вольфрама.** Условия образования блистеров на образцах вольфрама, изготовленных методом порошковой металлургии, изучались [8] при энергии ионов  $He^+$  и  $H^+$  50 эВ в диапазоне флюенса  $\Phi = 10^{24}—10^{27} \text{ м}^{-2}$ . Результаты измерений (рис. 3) оказались разными. Если при облучении ионами  $He^+$  блистеры наблюдались при  $\Phi > 10^{25} \text{ м}^{-2}$  и  $T > 1300 \text{ К}$ , то в случае водорода они наблюдались при  $\Phi > 3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$  и  $T < 930 \text{ К}$ . К сожалению, вид вольфрама в исследовавшихся образцах не указан. Аналогичный результат был получен в работе [9]: при облучении образца зеркала из полированного вольфрама, изготовленного методом порошковой металлургии, ионами  $H^+$  с энергией до 80—90 эВ до флюенса  $10^{25} \text{ м}^{-2}$  блистеров не было при  $T > 900 \text{ К}$ . К сожалению, температура

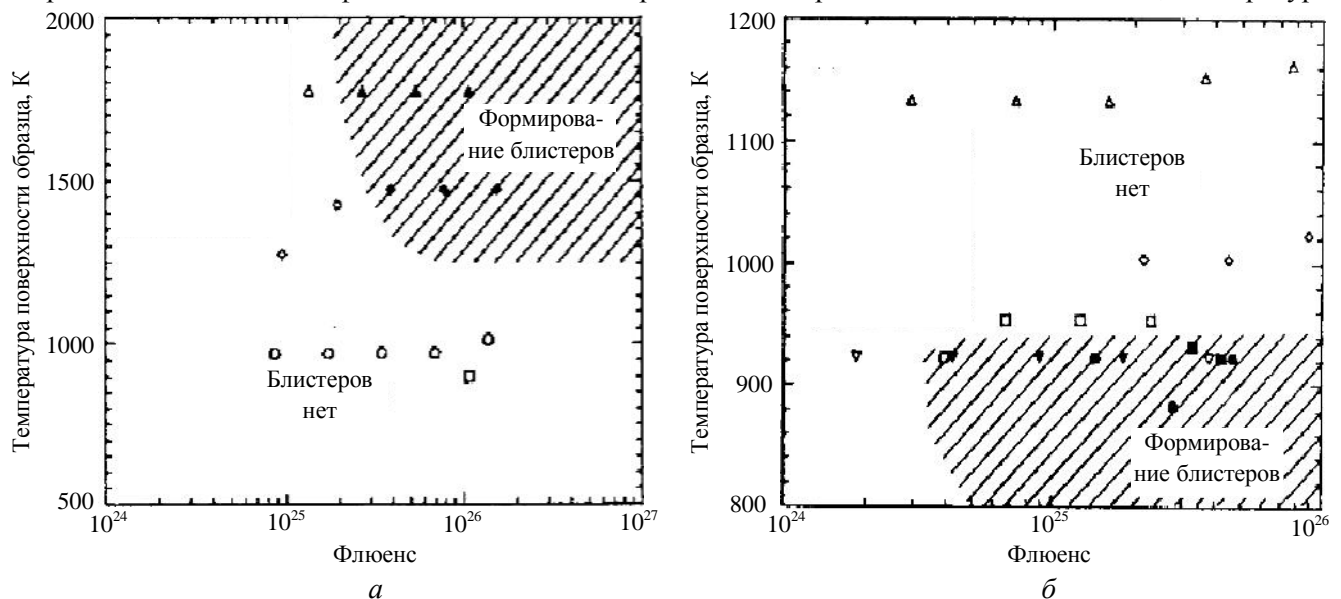


Рис. 3. Образование пузырей на поверхности W при облучении в гелиевой плазме [8] (а) ( $\Delta$  —  $2,2 \cdot 10^{22}$ ;  $\diamond$  —  $1,6 \cdot 10^{22}$ ;  $\circ$  —  $1,4 \cdot 10^{22}$ ;  $\square$  —  $3,1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и в водородной плазме [8] (б) ( $\Delta$  —  $(6—8)10^{21}$ ;  $\diamond$  —  $3 \cdot 10^{21}$ ;  $\square, \nabla$  —  $(3—4)10^{21}$ ;  $\circ$  —  $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ )

(рис. 2), а также от образцов W, изготовленных методами плазменного осаждения и порошковой металлургии, облучавшихся ионами  $D^+$  (200 эВ,  $\Phi = 10^{24} \text{ м}^{-2}$ ) [5]. В работе [6] исследовалось воздействие ионов  $D^+$  с энергией 38 эВ при  $T = 315 \text{ К}$  и флюенсе до  $10^{27} \text{ м}^{-2}$  на образцы из нерекристаллизованного вольфрама, частично и полностью рекристаллизованных, а также монокристаллического. На монокристалле образовались мелкие блистеры, а на полностью рекристаллизованном образце обнаружена различная реакция составляющих кристаллов на облучение при различной ориентации их граней. Блистеры появились только на грани (111).

В работах [6, 7] определялось влияние рекристаллизации на образование блистеров в структурах холодно- и горячепрессованных (ниже тем-

оказывает существенное влияние на поведение введенных ионов газов, препятствующих образованию блистеров, т.е. скоплений газов в вольфраме — углерода или гелия (эффекты, описываемые в следующих разделах), и это обстоятельство определяет не всегда легко выполнимое требование к поддержанию оптимальной температуры зеркала.

Вместе с тем температура может по-разному влиять на такие свойства вольфрама, как, например, зависимость их твердости от дозы облучения. Так, при облучении ионами  $\text{He}^+$  до флюенса  $10^{13} \text{ м}^{-3}$  образца при комнатной температуре его твердость возрастает в 2—3 раза, а образца, нагретого до  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , — не меняется [10].

**Влияние примеси углерода** (рис. 4). Как было показано в работе [11], введение небольшой примеси углерода в плазму, контактирующую с поверхностью вольфрама, может защитить эту поверхность от эрозии или, напротив, способствовать её деградации. В работе [12] исследовалось влияние примеси углерода в пучке ионов, бомбардирующих поверхность вольфрама, образец которого был изготовлен методом порошковой металлургии (PM—W). Опыты проводились при температуре мишени  $653 \text{ K}$ , в которой при облучении ионами водорода появляются блистеры [8]. Облучение мишени ионами  $\text{H}^+$  с энергией  $1 \text{ кэВ}$  показало, что при флюенсе  $3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$  и содержании углерода в потоке ионов  $0,1\text{—}0,3\%$  блисте-

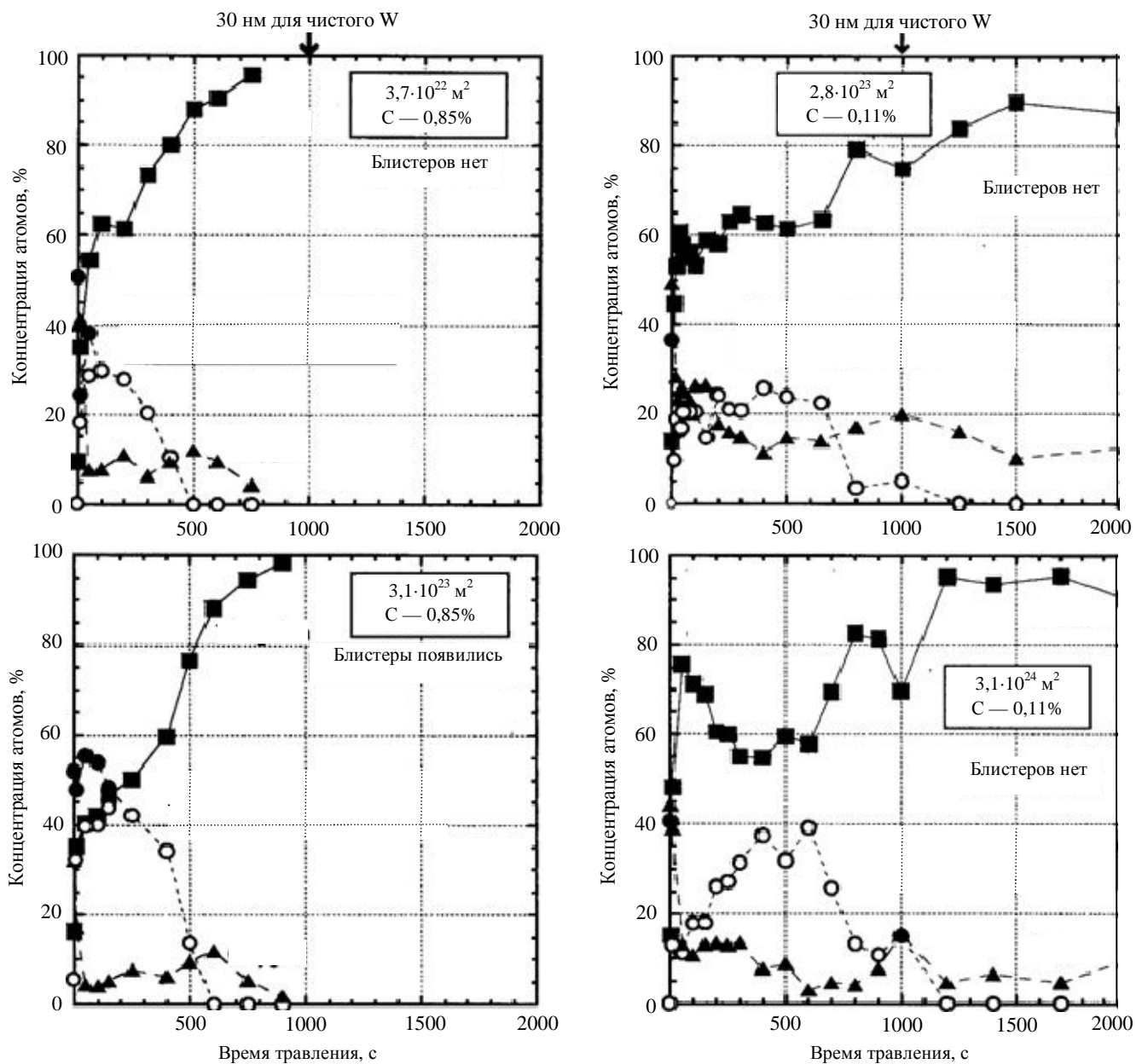


Рис. 4. Глубина распределения W, C и O в образцах вольфрама при облучении ионами  $\text{H}_3^+$  при температуре  $653 \text{ K}$  и содержании углерода  $0,85$  и  $0,11\%$ . Время травления  $1000 \text{ с}$  соответствует глубине травления примерно  $30 \text{ нм}$  для [12]: ● — углерод (WC + графит); ○ — углерод (WC); ■ — W; ▲ — кислород

ров не было. При том же флюенсе ионов, но с содержанием углерода 0,84% блистеры формировались, но при меньшем флюенсе ( $3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ) их не было (что, собственно, соответствует результату численного анализа осаждения углерода, выполненного в работе [13]). В работе [14] показано, что при температуре 1073 К карбид имеет вид  $W_2C$ . Скорость его роста снижается с рекристаллизацией и увеличением плотности дислокаций. Карбид  $WC$  не обнаружен.

Влияние примеси углерода в потоке бомбардирующих поверхность ионов исследовалось во многих опубликованных работах. Сопоставление приведенных в них результатов можно резюмировать следующим образом: примесь углерода к изотопам водорода 0,01—0,035% определённо снижает (обычно исключает) вероятность появления блистеров. При большем содержании углерода блистеры всё же образуются, если флюенс ионов водорода превышает  $10^{23}$ — $10^{24} \text{ м}^{-2}$ . При этом они не наблюдались, если температура превышала 1000 К [15].

**Влияние предварительного облучения W ионами  $He^+$  на предотвращение  $D^+$ -блистеринга.** Присутствие в термоядерной плазме ионов гелия вызвало необходимость исследования их воздействия на стенки дивертора и, возможно, на зеркала систем диагностики плазмы. В ряде экспериментов в Японии было обнаружено, что после облучения образцов ионами  $He^+$  последующее облучение вольфрама ионами водорода не вызывает появления блистеров. В 2005—2007 гг. были опубликованы результаты ряда экспериментов [16, 17] и ряд докладов на конференциях [18].

В работе [17] два образца, приготовленные методом порошковой металлургии, облучались ионами  $He^+$  с энергией 20—25 эВ до флюенса  $10^{25} \text{ м}^{-2}$  первый при  $T = 700 \text{ К}$ , второй — при  $T = 1660 \text{ К}$ . Затем оба облучались ионами  $D^+$  с энергией 80 эВ до флюенса  $10^{25} \text{ м}^{-2}$ . Блистеров у обоих образцов не было, но на втором образце после облучения гелием появились поры, что связано с повышенной температурой образца. Спектры термодесорбции показали, что на втором образце в результате более длительного облучения появились дополнительные вакансии для ионов  $D^+$ .

Результаты, приведенные в трёх указанных работах, а также в других, позволяют сделать следующие заключения:

— при температуре мишени из прессованного порошка вольфрама  $T \lesssim 1000 \text{ К}$  предварительная бомбардировка ионами  $He^+$  с энергией масштаба 100 эВ до флюенса  $\sim 10^{26} \text{ м}^{-2}$  приводит к тому, что последующее облучение ионами  $D^+$  не вызывает появления блистеров при флюенсе  $\Phi \sim 10^{25} \text{ м}^{-2}$ ;

— более высокая температура мишени (см. рис. 3, а), как поли-, так и монокристаллической, вызывает появление на поверхности облучаемой мишени отверстий, или каналов, которые, однако, не предотвращают образование блистеров. На субмикронной глубине образуются пузыри He, захватывающие при последующем облучении ионы дейтерия [16]. Казалось бы, появление пор может препятствовать удержанию газовых пузырей и, соответственно, образованию блистеров. Однако о попытках использовать этот эффект пока ничего не известно. К сожалению, влияние как пор, так и блистеров на отражательную способность вольфрамовых зеркал пока ещё не исследовалось в отличие от воздействия на них катодного распыления.

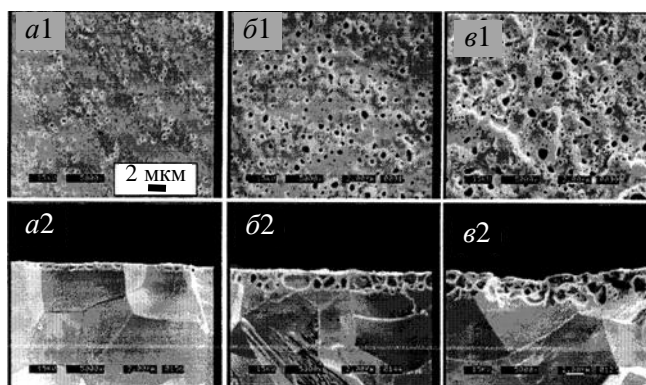


Рис. 5. Зависимости от флюенса роста пор и He-пузырей на образцах W (порошковой металлургии PM—W), экспонированных в He-плазме при 2200 К, в потоке 25 эВ He-ионов  $8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  при экспозициях: *a1* — 1000 с, *b1* — 10 000 с и *v1* — 75 000 с; *a2*, *b2*, *v2* — вид поперечных сечений каждого образца [18]

кал пока ещё не исследовалось в отличие от воздействия на них катодного распыления.

В качестве иллюстрации на рис. 5 показаны результаты облучения вольфрама при температуре 2200 К ионами  $He^+$  с энергией 25 эВ и потоком  $8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  при разных длительностях — 17 мин, 2,8 ч и 19,5 ч.

**Что показали модельные эксперименты при бомбардировке W ионами с периодически изменяющейся энергией [19].** В качестве источника ионов в модельных экспериментах использовалась очень простая система (рис. 6) [19] на основе микроволнового разряда в пробочной магнитной ловушке в условиях циклотронного электронного резонанса на частоте 2,37 ГГц в дейтерии (иногда в водороде). При микроволновой мощности  $\sim 400 \text{ Вт}$  и давлении рабочего газа  $\sim 3 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$  параметры плазмы:  $n_e \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e \leq 5 \text{ эВ}$ . Испытываемые образцы крепились на подвижном коаксиальном, охлаждаемом водой держателе, вводились через шлюз в ваку-

умную камеру вдоль оси системы и закреплялись вне магнитной пробки. На держатель образца подавалось отрицательное напряжение для ускорения ионов плазмы к поверхности зеркала, либо фиксированное (между 0,05 и 1,5 кВ), либо изменявшееся во времени с частотой 100 Гц. Во втором случае к фиксированному напряжению 1,5 кВ добавлялась положительная полуволна напряжения от отдельного двухфазного выпрямителя, и таким способом ускоряющее напряжение изменялось между 0,1 и 1,5 кВ при средней плотности тока на образце примерно 1 мА/см<sup>2</sup>. Изменение во времени напряжения смещения и ионного тока на образец показано на рис. 7.

Благодаря применению двух источников напряжения эффективный спектр энергии ионов, ускоренных к поверхности зеркала, был широким в диапазоне между 0,1 и 1,5 кВ и имел форму, показанную на рис. 8 (кривая б). Этот спектр энергии ионов был получен с учётом измеренных вольт-амперных характеристик и вторичной эмиссии электронов с поверхности зеркала в результате ионной бомбардировки [19].

Во всех этих экспериментах систематически измерялся спектр отражённого излучения и эпизодически снимались фотографии поверхности.

В случае монокристаллических W и Mo коэффициенты отражения не изменялись до толщины распыленного слоя 7 мкм. У поликристаллических образцов этих металлов при той же толщине распыленного слоя он снижался на 10—15%. Никаких признаков образования блистеров в этом случае обнаружено не было, как и при измерениях отражательной способности других образцов испытывавшихся металлических зеркал. Это даёт веское основание полагать, что при облучении металлических образцов полиэнергетическим пучком ионов блистеры либо не образуются, либо сразу разрушаются более энергичными ионами, почти не ухудшая отражательной способности зеркала.

**Влияние радиационных повреждений («радиационный блистеринг»).** На конференции ICFRM-13 [20] были доложены результаты образования блистеров на поверхности вольфрама, образцы которых из предварительно облучённого вольфрама PM—W, отожжённого при 900 °С, были спрессованы до 1 мм толщины и облучены отрицательными ионами водорода одни при энергии 399 кэВ, другие — 700 кэВ. Затем предварительно облучённые и необлучённые образцы были облучены при температуре 200 °С ионами водорода с энергией 1,0 кэВ при потоке  $2,2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  до флюенса  $7,5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$ . Для того чтобы стимулировать появление блистеров, к пучку ионов водорода добавлялся углерод — 0,8%.

Для определения положения внедрённых ионов водорода использовались зондирование образцов ионами галлия (39 кэВ) и Cs<sup>+</sup> (под углом 60°) и сканирующий пучок с энергией 11 кэВ. В результате обнаружены распределения блистеров по их плотности и размерам (рис. 9).

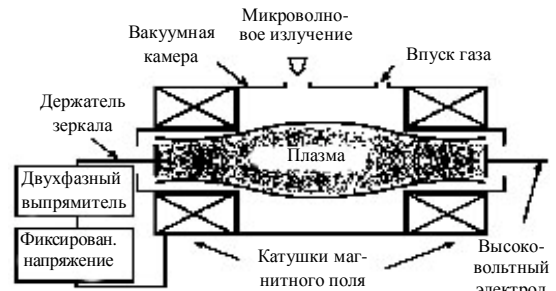


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для плазменной обработки образцов зеркал

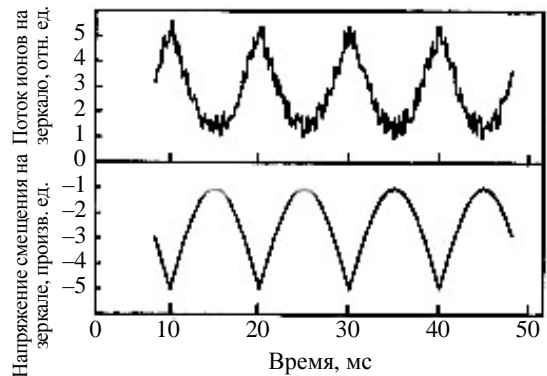


Рис. 7. Изменение во времени тока ионов и потенциала на поверхность зеркала [18]

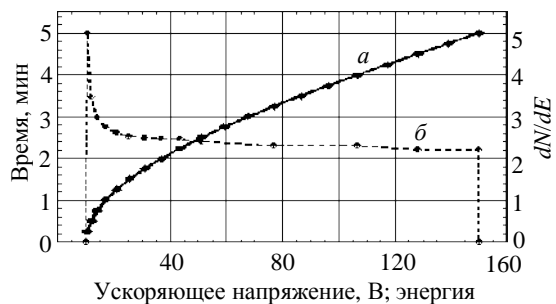


Рис. 8. Изменение во времени ускоряющего напряжения (а) и эквивалентный спектр энергии ионов, определённый с учётом вольт-амперных характеристик смещения на зеркале (б) [19]



Рис. 9. Распределение размеров блистеров при различных значениях энергии создавших их ионов

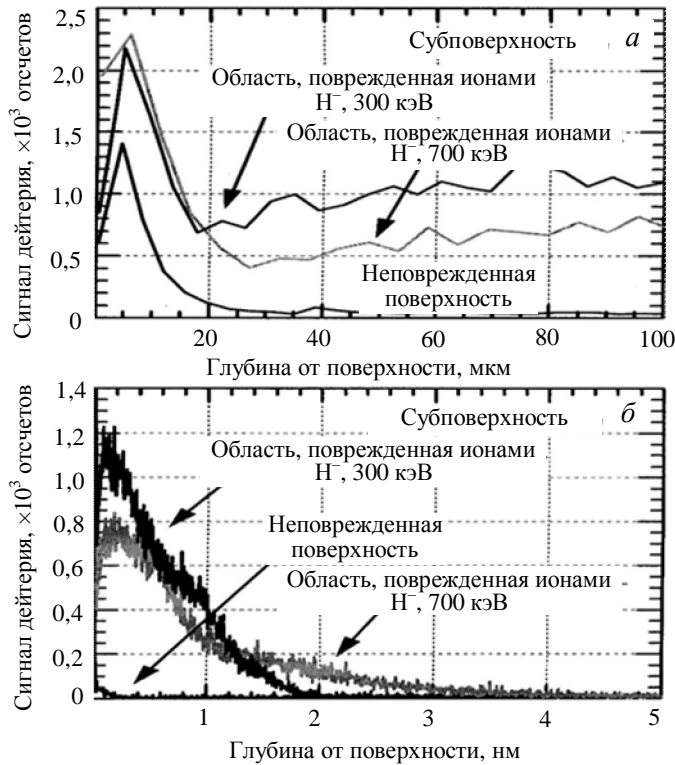


Рис. 10. Профили плотности внедрённого после облучения дейтерия в верхней части поверхности (а) и под поверхностью (б)

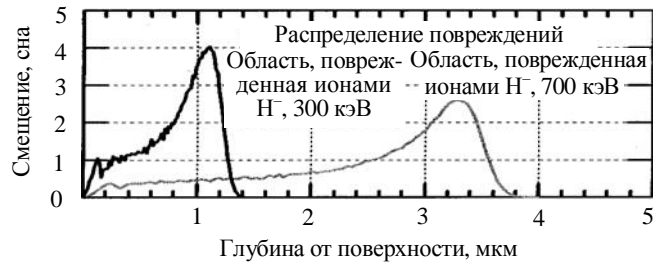


Рис. 11. Распределение повреждений в образцах вольфрама, созданных при облучении отрицательными ионами водорода с энергией 300 и 799 кэВ [20]



Дориан Владимирович Орлинский, в.н.с., к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат премии им. И.В. Курчатова  
e-mail: orlinskd@nfi.kiae.ru

Профили распределения внедрённых отрицательных тонов водорода показаны на рис. 10, 11.

Полученные результаты указывают на то, что после облучения образцов ионами с энергией, достаточной для создания большого количества вакансий, захват ионов изотопов водорода с низкой энергией на границах радиационно повреждённых зон снижает вероятность образования блистеров.

Как показали измерения, концентрация дейтерия вокруг зон радиационного повреждения сильно уменьшена, что свидетельствует о его диффузии в зону повреждения и согласуется с наблюдаемым снижением числа блистеров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования процессов, связанных с состоянием отражающей поверхности образцов металлов, обращённых к плазме, активно проводились в конце прошлого столетия и резюмированы в интересном обзоре Шерцера [1]. В начале нынешнего столетия интерес к этим процессам обострился из-за возможного повреждения стенок вакуумной камеры токамака в области дивертора. В последние несколько лет на эту проблему обратили внимание специалисты, занимающиеся диагностикой плазмы и использующие в диагностических системах металлические зеркала, размещаемые вблизи плазмы и подверженные поэтому всем возможным с её стороны воздействиям. Имитационные исследования сохранности диагностических зеркал в условиях, сначала имитирующих условия термоядерного

реактора, были начаты в конце прошлого столетия в Харькове [20], а затем, уже в нынешнем столетии, распространились и в других странах. Использовались уже не макетные условия, зеркала испытывались уже на действующих термоядерных установках [21]. Если макетные исследования были ориентированы на возможное распыление зеркал, то испытания зеркал на действующих термоядерных установках указали на осаждение примесей, как на главную для них опасность. В последние годы исследования блистеринга металлов в Японии указали ещё на одну опасность, пока ещё ни на одной действующей установке не обнаруженную. Тем не менее возникла ещё одна проблема сохранности диагностических зеркал в реакторе, которая потребовала дополнительных исследований, до сих пор для зеркал не проводившихся.

К сожалению, условия предотвращения появления блистеров до сих пор окончательно не установлены. Эффект полиэнергетического спектра бомбардирующих ионов нуждается в специальных дополнительных исследованиях. Предполагаемое нанесение на внутренние поверхности вакуумной камеры слоя металла с малым  $Z$  (лития или бериллия) может привести к нежелательному осаждению на зеркала атомов этих металлов.



В заключение автор считает своим долгом выразить признательность Владимиру Сергеевичу Войцене за обсуждение вопросов, затронутых в настоящей статье, и за предоставление копий статей, опубликованных в зарубежных научных журналах за 1996—2006 гг. (главным образом в *Journal of Nuclear Materials*), отсутствующих в московских научных библиотеках.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шерцер Б.** Развитие рельефа на поверхности вследствие имплантации ионов газов. — В кн.: *Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой*. Под ред. Р. Бериша. — М.: Мир, 1986. (В этой главе приведено 456 ссылок на другие публикации.)
2. **Гусева М.И., Мартыненко Ю.В.** Радиационный блистеринг. — УФН, 1981, т. 135, вып. 4, с. 671.
3. **Орлинский Д.В., Вуколов К.Ю., Войцена В.С.** Имитационные исследования поведения зеркал диагностических систем экспериментального термоядерного реактора. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2005, вып. 3, с. 3.
4. **Tokunaga K., Baldwin M.J. et al.** Blister formation and deuterium retention on W exposed to low energy and high flux deuterium plasma. — *JNM*, 2005, vol. 337—339, p. 887—891.
5. **Alimov V.Kh., Roth J., Mayer M.** Depth distribution in single- and polycrystalline tungsten up to depths of several micrometer. — *JNM*, 2004, vol. 329—333, p. 775.
6. **Shu W.M. et al.** Microstructure dependence of deuterium retention and blistering in the near-surface region of tungsten exposed to high flux D<sub>2</sub> plasmas of 38 eV at 316 K. — *Physica Scripta*, 2007, vol. 128, p. 86—99.
7. **Nishijima D. et al.** Hydrogen blister formation on cold-worked tungsten with layered structure. — *Japan J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 44, № 1A, p. 389—382.
8. **Moriguchi K., Fukuta S. et al.** Modifications of tungsten surface under low energy and high flux plasma irradiation. — Report at XXV ICPIA (2001), Nagoya, vol. 1, p. 83—84.
9. **Ye M.Y. et al.** Blister formation on tungsten surface under low energy and high flux hydrogen plasma irradiation in NAGDIS-I. — *J. Nucl. Mater.*, 2003, vol. 313—316, p. 72—76.
10. **Yoshida N. et al.** Impact of low energy helium irradiation on plasma facing materials. — *J. Nucl. Mater.*, 2005, vol. 337—339, p. 946.
11. **Naujoks D., Eckstein W.** Sputtering of plasma facing material by simulating bombardment with carbon and deuterium beams. — *J. Nucl. Mater.*, 1995, vol. 220—222, p. 993.
12. **Ueda Y., Shimada T., Nishikawa M.** Impact of carbon impurities in hydrogen plasmas on tungsten blistering. — *Nucl. Fusion*, 2004, vol. 44, p. 62—67.
13. **Naujoks D., Behrigh R.** Erosion and deposition at the vessel walls in fusion devices. — *J. Nucl. Mater.*, 1995, vol. 229—222, p. 227.
14. **Hatano Y. et al.** Influence of microstructure of tungsten on solid state reaction rate with amorphous carbon film. — *J. Nucl. Mater.*, 1995, vol. 337—339, p. 902.
15. **Shimada T., Ueda Y. et al.** Carbon behavior on W surface after C and H mixed beam irradiation. — *J. Nucl. Mater.*, 2004, vol. 329—333, p. 747.
16. **Nishijima D., Sugimoto T. et al.** Characteristic changes of deuterium retention on tungsten surfaces due to low-energy helium plasma pre-exposure. — *J. Nucl. Mater.*, 2005, vol. 337—339, p. 927.
17. **Nishijima D., Iwakiri H. et al.** Suppression of blister formation and deuterium retention on tungsten surface due to mechanical polishing and helium pre-exposure. — *Nuclear Fusion*, 2005, vol. 45, p. 669.
18. **Nishijima D., Iwakiri H., Ye V.Y. et al.** Blister/hole formation on tungsten surface due to low-energy and high-flux deuterium/helium plasma exposures. — In: *Plasma Science Symposium on Plasma Processing, L4449A, 2005/22nd; FT/P1-17*.
19. **Bardamid A.F., Gritsyna V.T., Konovalov V.G. et al.** Ion energy distribution effect on degradation of optical properties of ion bombarded copper mirrors. — *Surface Coating Technol.*, 1998, vol. 103—104, p. 365.
20. **Fukumoto F., Kashiwagi H., Ohtsuka Y., Ueda Y. et al.** Hydrogen behavior in damaged tungsten by high-energy ion irradiation. *ICFRM-13*, 2007, p. 1433—1445.
21. **Voitsenya V.S., Borisenko Yu.N., Bryl V.V. et al.** Simulation of radiation effects on reflectors using heavy ion beams. — *J. Nucl. Mater.*, 1994, vol. 212—215, p. 1640.
22. **Orkinski D.V., Voitsenya V.S., Vukolov K.Yu.** First mirrors for diagnostic systems of experimental fusion reactor. Part II. — *Plasma Device and Operation*, 2007, vol. 15, p. 1—20.

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2008 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 1, с. 42—49.