УДК 538.971

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПОТОКАМИ ЧАСТИЦ, ХАРАКТЕРНЫМИ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР

Д.К. Когут, Н.Н. Трифонов (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия), В. Котов (Institute of Energy and Climate Research, Forschungszentrum Juelich GmbH, Juelich, Germany)

Проведено моделирование изменения состава поверхности первого диагностического зеркала при облучении потоком нейтронов перезарядки D, He и частицами примеси Be при помощи кода SCATTER (режим эмуляции TRIDYN). Начальные угловые энергетические распределения и величины потоков рассчитаны в коде B2-EIRENE для цилиндрического защитного канала в экваториальном порту токамака ИТЭР. Во всех рассмотренных случаях осаждение примеси бериллия на поверхность зеркала превалирует над эрозией. Основными причинами являются имплантация атомов Be благодаря облучению высокоэнергетичными нейтралами и формирование смешанного слоя Be + Mo. Средняя глубина имплантации составляет 20 нм. При заданной консервативной оценке потока Be 1% от потока дейтронов критическая толщина осаждаемой плёнки (10 нм) достигается после 140 типовых разрядов ИТЭР. Однако уменьшение потока Be на порядок приводит к уменьшению скорости роста плёнки в 7 раз.

Ключевые слова: первые зеркала, осаждение бериллия, ИТЭР, смешанные материалы.

SIMULATION OF THE FIRST MIRROR SURFACE COMPOSITION CHANGE UNDER ITER RELEVANT PARTICLE IRRADIATION. D.K. KOGUT, N.N. TRIFONOV, V. KOTOV. Dynamic modification of the surface composition of a diagnostic first mirror irradiated by CX-flux of D and He atoms simultaneously with the Be impurity deposition is simulated with the code SCATTER (TRIDYN mode). The input angular and energy spectra of the incident atoms as well as their fluxes are taken from the B2-EIRENE modelling. Mirror installed in a cylindrical protective duct in the outer equatorial port of ITER is considered. Net-deposition of Be on the mirror surface is found even for small Be fraction in the incident flux. The main reason is the implantation of Be atoms into the surface by the high-energetic CX-neutrals and formation of mixed Be + Mo-layers. The average calculated implantation depth is 20 nm. On the assumption of 1% Be concentration the critical deposit thickness of 10 nm can be reached after 140 reference ITER discharges. 10 times smaller Be flux would lead to 7 times smaller deposition rate.

Keywords: first mirrors, beryllium deposition, ITER, mixed materials.

ВВЕДЕНИЕ

В оптических и лазерных диагностиках в токамаке ИТЭР будут использоваться металлические зеркала в качестве первичного элемента, обращённого к плазме. Эрозия высокоэнергетичными нейтралами перезарядки и осаждение примесей могут существенно повлиять на отражательную способность зеркал вследствие изменения состава поверхности [1]. Деграция оптических свойств зеркал влияет на качество сигнала и эффективность соответствующих диагностик. В настоящее время активно проводятся экспериментальные и теоретические исследования, посвящённые выбору материала, влиянию эрозии и осаждения на эксплуатационные качества первых зеркал [2—4]. Данные зеркала будут изготовлены из молибдена и установлены внутри защитных конструктивных элементов (каналов), которые предохраняют от прямого взаимодействия плазмы с поверхностью. Однако энергетичные нейтральные частицы, не удерживаемые магнитным полем, могут проникнуть внутрь канала и достигнуть поверхности зеркала.

Эксперименты на токамаке JET [5] с зеркалами в коротких защитных каналах (отношение длины к диаметру $L/d = 3$) показали, что скорость осаждения C:D-плёнок равна 0,1 нм/с, в то же время в каналах с $L/d < 3$ толщина примесной плёнки была существенно меньше благодаря распылению нейтралами. Данные эксперименты будут повторены в условиях бериллиевой первой стенки ITER-Like Wall [6], установленной в JET в 2011 г.

Существующие исследования по компьютерному моделированию не учитывают динамическое изменение состава поверхности зеркала в процессе облучения, что необходимо для оценки скорости эрозии или осаждения плёнки примесей бериллия. В настоящей работе используется код SCATTER [7], основанный на методе бинарных столкновений, с добавлением алгоритма динамической модификации состава поверхности TRIDYN [8] для моделирования облучения первых зеркал, расположенных в экваториальном порту ИТЭР. Благодаря использованию специальных адаптивных методов определения эквивалентного флюенса на одну итерацию моделирования данный код сочетает быстродействие и точность расчётов [9].

МОДЕЛЬ РАСЧЁТОВ

Потоки частиц из плазмы, падающих на первую стенку, а также их угловые и энергетические распределения были рассчитаны с помощью кода B2-EIRENE [10, 11]. Этот код комбинирует двухмерное гидродинамическое описание плазмы с кинетической моделью Монте-Карло транспорта нейтральных частиц. В данной работе были использованы данные из моделирования «разряда» № 1639 для ИТЭР.

Геометрическая модель молибденового зеркала в защитном цилиндрическом канале из нержавеющей стали представлена на рис. 1. Отношение длины трубки к диаметру L/d составляет 10. Канал находится в экваториальном диагностическом порту ИТЭР и ориентирован перпендикулярно первой стенке. Ионы плазмы движутся вдоль линий магнитного поля к поверхности первой стенки под скользящим углом и благодаря конструкции первой стенки и канала не попадают внутрь, поэтому ионный компонент не учитывается в данной модели. Нейтралы перезарядки (D, He) могут достигнуть поверхности зеркала, двигаясь вдоль оси канала либо отражаясь от стенок канала. Полученные энергетические спектры нейтралов перезарядки у входа в канал и у поверхности зеркала представлены на рис. 2. Видно, что доля частиц дейтерия в высокоэнергетической части спектра (>1 кэВ) на порядок больше, чем частиц гелия. Поскольку элементы первой стенки токамака ИТЭР будут изготовлены из бериллия, в пристеночном слое будут присутствовать низкоэнергетичные распылённые атомы Be. Транспорт данных примесных частиц на поверхность зеркала определяется отражением и перепылением осаждённого бериллия со стенок защитного канала. Если в угловом распределении быстрых нейтралов, налетающих на зеркало, преобладает нормальное падение, то для перепыляемых частиц Be характерно равномерное распределение по углам. Осаждение примесей на поверхность зеркала оказывает более выраженное влияние на ухудшение его отражательных свойств, в то время как эрозия молибдена в данных условиях пренебрежимо мала [2].

Неизвестным параметром моделирования является эффективный коэффициент прилипания атомов примеси на поверхность стенок канала. Для наиболее консервативной оценки можно считать, что все влетевшие в канал частицы примеси в конечном итоге оказываются либо на поверхности зеркала, либо вылетают обратно в плазму. Результаты расчёта потоков частиц D, He и Be для данного случая приведены в таблице. Коэффициент ослабления потока бериллия на поверхность зеркала по сравнению

Рис. 1. Схема расположения первого зеркала в защитном цилиндрическом канале

Рис. 2. Энергетические спектры падающих частиц, падающих на первую стенку и на поверхность зеркала: 1 — D (первая стенка); 2 — D (зеркало); 3 — He (первая стенка); 4 — He (зеркало); 5 — Be (зеркало)

Сравнение расчётных потоков частиц D, He и Be на первую стенку и на зеркало

Параметр	D	He	Be
Поток на первую стенку, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$4,1 \cdot 10^{19}$	$4,3 \cdot 10^{16}$	$4,2 \cdot 10^{16}$
Поток на зеркало, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$2,4 \cdot 10^{17}$	$2,8 \cdot 10^{13}$	$2,7 \cdot 10^{15}$
Коэффициент ослабления	170	1550	15

с исходным потоком на первую стенку существенно меньше, чем аналогичная величина для D и He. Это следствие предположения того, что для D и He поток на зеркало включает только быстрые частицы (с энергией больше 1 эВ), а для Be считаются все частицы, независимо от их энергии. Поток Be ослабевает только за счёт того, что часть его отражается обратно в плазму. Наличие отражённых частиц, в свою очередь, является следствием предположения о диффузном рассеянии атомов Be со стенки.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основании полученных угловых и энергетических спектров проведено моделирование облучения поверхности молибдена частицами D, He и Be в коде SCATTER. Флюенс падающих на зеркало дейтронов составил $1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$, что соответствует $4 \cdot 10^5 \text{ с}$, или 1000 рабочих разрядов в установке ИТЭР. Поток примеси бериллия варьировался от 5 до 0,01% от потока нейтралов перезарядки, при этом согласно консервативной оценке B2-EIRENE данная величина составит 1%. Предполагается, что D и He не захватываются в молибдене.

Эволюция профиля относительной концентрации компонентов по глубине в процессе облучения для

Рис. 3. Профиль концентрации бериллия по глубине при облучении молибденового зеркала частицами D, He + 1% Be от потока нейтралов для различных доз: D = $0,1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$, 1 — Be, 2 — Mo; D = $0,4 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$, 3 — Be, 4 — Mo; D = $1,0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$, 5 — Be, 6 — Mo

Рис. 4. Профиль концентрации бериллия по глубине при облучении молибденового зеркала частицами Be без потока нейтралов перезарядки для флюенса $4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$: 1 — Be; 2 — Mo

случая 1% примеси Be представлена на рис. 3. В начале расчёта граница поверхности зеркала находится в точке 0 нм, налетающие частицы движутся с левой стороны, последующие положения границы обозначены вертикальными линиями на рис. 3. Скорость роста бериллиевой плёнки на поверхности зеркала составила $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ нм/с}$. Таким образом, уже после облучения дозой $4,0 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ толщина плёнки равна 28 нм. Предельно допустимая толщина плёнки оценивается в 10 нм [12], т.е. после 140 разрядов длительностью 400 с зеркало станет непригодным для оптической диагностики. Осаждение примеси преобладает над эрозией нейтралами перезарядки, несмотря на то, что при аналогичных условиях мишень из чистого бериллия распыляется.

Если не учитывать перемешивание, то получится прямо противоположная ситуация. Плёнка из легкого материала распыляется сильнее, если она расположена на тяжёлой подложке [13]. В нашем случае нет отдельных плёнок, а есть зона перемешивания, где существует динамическое равновесие между распыляемыми частицами примесей и постоянно приходящей примесью из плазмы. Атомы Be имплантируются в молибден благодаря вбиванию высокоэнергетичными нейтралами перезарядки. Максимум профиля концентрации бериллия лежит на глубине $\sim 20 \text{ нм}$ от поверхности зеркала. Подобный эффект наблюдался в экспериментах и моделировании в коде TRIDYN облучения углеродной плёнки на поверхности вольфрама ионами дейтерия [14].

Моделирование осаждения примеси Be с потоком $2,7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ без облучения нейтралами обнаруживает более высокую скорость роста плёнки $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ нм/с}$ (рис. 4), при этом не наблюдается формирование максимума профиля концентрации.

Поток примеси бериллия для приведённых расчётов мог быть переоценен, поскольку не учитывалось осаждение примеси на стенки защитного канала. Если предположить, что истинный поток Be на поверхность зеркала на порядок меньше (0,1% от потока D), то скорость роста плёнки уменьшается приблизительно в 7 раз ($2,3 \cdot 10^{-5}$ нм/с). Результаты моделирования профилей концентрации для случаев 0,1 и 0,01% примесного потока бериллия от потока нейтралов для дозы облучения $4,0 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ представлены на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование изменения состава поверхности первого зеркала лазерной диагностической системы при облучении потоком нейтралов перезарядки D, He и термализованными частицами Be с помощью кода SCATTER (режим TRIDYN). Начальные угловые энергетические распределения и величины потоков рассчитаны в коде B2-EIRENE для цилиндрического защитного канала в экваториальном порту токамака ИТЭР.

Во всех рассмотренных случаях осаждение примеси бериллия на поверхность молибденового зеркала превалирует над эрозией, несмотря на то, что при аналогичных условиях мишень из чистого бериллия распыляется. Этот эффект обусловлен наличием зоны перемешивания компонентов Be и Mo, что отличает используемый код от более простых моделей. Атомы Be имплантируются на глубину порядка 20 нм благодаря облучению атомами с высокой энергией.

При заданной консервативной оценке потока Be 1% от потока дейтронов ресурс зеркала ограничен 140 типовыми разрядами ИТЭР. Более аккуратная оценка транспорта примеси бериллия внутри канала предполагает более мягкие условия. В случае предположения, что поток Be в 10 раз меньше, результаты расчётов показывают уменьшение скорости роста примесной плёнки на поверхности зеркала в 7 раз. Тем не менее если рядом с входной апертурой канала будет находиться локальный источник распылённых атомов Be (обусловленный геометрией первой стенки) или система газонапуска, то поток примеси на поверхность зеркала может оказаться существенно больше. В любом случае процесс осаждения примесей играет ключевую роль в оценке срока службы первых зеркал для оптической диагностики.

Работа проведена при поддержке Федеральной целевой программы «Кадры», госконтракт № 14.740.11.0712 от 12 октября 2010 г.

REFERENCES

1. Litnovsky A., Voitsenya V., Costley A., Donné A. — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, pp. 833—838.
2. Litnovsky A., Voitsenya V., Suge T. et al. — Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 075015.
3. Brooks J., Allain J. — Nucl. Fusion, 2008, vol. 48, p. 045003.
4. Kotov V., Litnovsky A., Kukushkin A.S. et al. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, pp. 528—531.
5. Rubel M., DeTemmerman G., Sundelin P., Coad J.P., Widdson A. et al. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, p. 1066.
6. JET Insight, EFDA JET Close Support Unit, Culham Science Centre, 2009, <http://www.jet.efda.org/wp-content/uploads/insight-march-2009.pdf>.
7. Kurnaev V.A., Trifonov N.N. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2002, issue 3—4, p. 76 (in Russian).

Рис. 5. Профиль концентрации бериллия по глубине при облучении молибденового зеркала частицами D, He + 0,1% Be/0,01% Be от потока нейтралов для флюенса $4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$: 0,1% Be, 1 — Be, 2 — Mo; 0,01% Be, 3 — Be, 4 — Mo

8. **Moller W., Eckstein W.** — Nucl. Instrum. Meth., 1984, vol. B2, p. 814.
9. **Trifonov N.N., Kogut D.K., Kurnaev V.A.** — Poverkhnost', Rentgen., Sinkhrotr. i neytr. issled. (Surface. Roentgen., synchrotr. and neutr. research), 2008, issue 3, pp. 7—10 (in Russian).
10. **Kotov V., Reiter D., Kukushkin A.S. et al.** — Fusion Eng. Des., 2010 (in press); doi:10.1016/j.fusengdes.2010.12.04.
11. **Kukushkin A.S., Pacher H.D., Loarte A., Komarov V., Kotov V. et al.** — Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 0755008.
12. **Litnovskiy A.** Private message (in Russian).
13. **Linsmeier Ch., Ertl K., Roth J., Wiltner A., Schmid K. et al.** — J. Nucl. Mater., 2007, vol. 363—365, pp. 1129—1137.
14. **Gasparyan Yu.M.** Capture and gas emission of deuterium at ion implementation into tungsten. Dissertation for scientific degree of the cand. of phys.-math. sciences, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 2009. 114 p. (in Russian).

AUTHORS

Kogut D.K. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; kogutdk@gmail.com.

Trifonov N.N. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; nnt@plasma.mephi.ru.

Kotov V. Institute of Energy and Climate Research, Forschungszentrum Juelich GmbH, Juelich, Germany.

Received 20 September 2011
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2011, issue 4, pp. 60—64.