

7. Langley R.A. — J. Nucl. Mater., 1979, vol. 85—86, p. 1123.
8. Chernikov V.N., Alimov V.Kh., Markin A.V., Zakharov A.P. — J. Nucl. Mater., 1996, vol. 228, p. 47.
9. Hoffmann B., Baumann H., Rauch F., Bethge K. — Nucl. Instr. and Meth., 1987, B28, p. 336.
10. Hoffmann B., Baumann H., Rauch F., Bethge K. — Ibid., 1989, B36, p. 30.
11. Hoffmann B., Baumann H., Rauch F., Bethge K. — Ibid., p. 157.
12. Городецкий А.Е., Залавутдинов Р.Х., Алимов В.Х., Богомолов Д.Б., Захаров А.П. — Поверхность, 1996, № 8, с. 62.
13. Holmen G., Jacobsson H. — Appl. Phys. Lett., 1988; vol. 53, p. 1838.
14. Alimov V.Kh., Zalavutdinov R.Kh., Gorodetsky A.E., Zakharov A.P. — J. Nucl. Mater., 1996, vol. 231, p. 69.
15. Linnik W. Ein Apparat für Mikroskopisch-Interferometrische Untersuchung Reflektierender Objekte (Mikrointerferometer). — Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de l'URSS, 1933, № 1, p. 18.
16. Hirooka Y. — J. Nucl. Mater., 1998, vol. 258—263, p. 1045.

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2000 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2001, вып. 1, с. 35—44.

УДК 537.534

## ИМИТАЦИЯ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НАКОПЛЕНИЕ ВОДОРОДА В БЕРИЛЛИИ

*М.И. Гусева, В.М. Гуреев, Л.С. Данелян, В.В. Затекин, В.С. Куликаускас,  
С.Н. Коршунов, Ю.В. Мартыненко, П.Г. Московкин, В.Г. Столярова*

Бериллий является кандидатным материалом первой стенки термоядерного реактора ИТЭР благодаря малому атомному номеру, хорошим термическим свойствам. В то же время в бериллии образуются дефекты и гелий при нейтронной бомбардировке в результате ядерных реакций  ${}^9\text{Be}(n, 2n) \rightarrow 2\text{He}^4 + 94 \text{ кэВ}$ . Наличие гелиевых пузырьков и примеси кислорода в решетке бериллия является основной причиной накопления трития в облученном бериллии. Установлено, что интегральная концентрация атомов водорода в бериллии, предварительно облученном ионами  $\text{He}^+$ , в 2,6—2,8 раза больше по сравнению с необлученным ионами  $\text{He}^+$  бериллием. Предложена простая физическая модель наблюдаемых эффектов, учитывающая диффузию вакансий и атомов He и захват водорода гелиево-вакансионными ловушками.

RADIATION DEFECT AND HELIUM EFFECTS ON HYDROGEN ACCUMULATION IN BERYLLIUM. M.I. GUSEVA, V.M. GUREEV, L.S. DANELYAN, V.V. ZATEKIN, V.S. KULIKAUSKAS, S.N. KORSHUNOV, Yu. V. MARTYNYENKO, P.G. MOSKOVKIN, V.G. STOLYAROVA. Beryllium is a candidate material for the ITER-first wall due to a low atomic number and due to good thermal properties. At the same time, defects and helium is produced in the beryllium as result of nuclear reactions  ${}^9\text{Be}(n, 2n) \rightarrow 2\text{He}^4 + 94 \text{ keV}$ . Helium bubbles are the main reason of tritium accumulation in irradiate beryllium. The integral concentration of hydrogen atoms in beryllium after helium pre-bombardment is 2,6—2,8 times higher than that without helium pre-bombardment. A theoretical model describing vacancies and He atoms diffusion and hydrogen trapping by vacancy-helium traps is presented.

### ВВЕДЕНИЕ

Бериллий является наиболее приемлемым материалом для первой стенки ИТЭРа благодаря низкому атомному номеру и хорошим термическим свойствам. Вместе с тем при воздействии больших потоков высокоэнергетических нейтронов в решетке бериллия наряду со смещенными атомами образуется гелий. Дефекты в бериллии в основном обусловлены ядерными реакциями  ${}^9\text{Be} + n \rightarrow {}^8\text{Be} + 2n$ ,  ${}^8\text{Be} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + 94 \text{ кэВ}$ .



7. Langley R.A. — J. Nucl. Mater., 1979, vol. 85—86, p. 1123.
8. Chernikov V.N., Alimov V.Kh., Markin A.V., Zakharov A.P. — J. Nucl. Mater., 1996, vol. 228, p. 47.
9. Hoffmann B., Baumann H., Rauch F., Bethge K. — Nucl. Instr. and Meth., 1987, B28, p. 336.
10. Hoffmann B., Baumann H., Rauch F., Bethge K. — Ibid., 1989, B36, p. 30.
11. Hoffmann B., Baumann H., Rauch F., Bethge K. — Ibid., p. 157.
12. Городецкий А.Е., Залавутдинов Р.Х., Алимов В.Х., Богомолов Д.Б., Захаров А.П. — Поверхность, 1996, № 8, с. 62.
13. Holmen G., Jacobsson H. — Appl. Phys. Lett., 1988, vol. 53, p. 1838.
14. Alimov V.Kh., Zalavutdinov R.Kh., Gorodetsky A.E., Zakharov A.P. — J. Nucl. Mater., 1996, vol. 231, p. 69.
15. Linnik W. Ein Apparat für Mikroskopisch-Interferometrische Untersuchung Reflektierender Objekte (Mikrointerferometer). — Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de l'URSS, 1933, № 1, p. 18.
16. Hirooka Y. — J. Nucl. Mater., 1998, vol. 258—263, p. 1045.

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2000 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2001, вып. 1, с. 35—44.

УДК 537.534

## ИМИТАЦИЯ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НАКОПЛЕНИЕ ВОДОРОДА В БЕРИЛЛИИ

*М.И. Гусева, В.М. Гуреев, Л.С. Данелян, В.В. Затекин, В.С. Куликаускас,  
С.Н. Коршунов, Ю.В. Мартыненко, П.Г. Московкин, В.Г. Столярова*

Бериллий является кандидатным материалом первой стенки термоядерного реактора ИТЭР благодаря малому атомному номеру, хорошим термическим свойствам. В то же время в бериллии образуются дефекты и гелий при нейтронной бомбардировке в результате ядерных реакций  ${}^9\text{Be}(n, 2n) \rightarrow 2\text{He}^4 + 94 \text{ кэВ}$ . Наличие гелиевых пузырьков и примеси кислорода в решетке бериллия является основной причиной накопления трития в облученном бериллии. Установлено, что интегральная концентрация атомов водорода в бериллии, предварительно облученном ионами  $\text{He}^+$ , в 2,6—2,8 раза больше по сравнению с необлученным ионами  $\text{He}^+$  бериллием. Предложена простая физическая модель наблюдаемых эффектов, учитывающая диффузию вакансий и атомов He и захват водорода гелиево-вакансионными ловушками.

**RADIATION DEFECT AND HELIUM EFFECTS ON HYDROGEN ACCUMULATION IN BERYLLIUM.**  
M.I. GUSEVA, V.M. GUREEV, L.S. DANELYAN, V.V. ZATEKIN, V.S. KULIKAUSKAS, S.N. KORSHUNOV, Yu.V. MARTYSENKO, P.G. MOSKOVKIN, V.G. STOLYAROVA. Beryllium is a candidate material for the ITER-first wall due to a low atomic number and due to good thermal properties. At the same time, defects and helium is produced in the beryllium as result of nuclear reactions  ${}^9\text{Be}(n, 2n) \rightarrow 2\text{He}^4 + 94 \text{ keV}$ . Helium bubbles are the main reason of tritium accumulation in irradiate beryllium. The integral concentration of hydrogen atoms in beryllium after helium pre-bombardment is 2,6—2,8 times higher than that without helium pre-bombardment. A theoretical model describing vacancies and He atoms diffusion and hydrogen trapping by vacancy-helium traps is presented.

### ВВЕДЕНИЕ

Бериллий является наиболее приемлемым материалом для первой стенки ИТЭРа благодаря низкому атомному номеру и хорошим термическим свойствам. Вместе с тем при воздействии больших потоков высокоэнергетичных нейтронов в решетке бериллия наряду со смещенными атомами образуется гелий. Дефекты в бериллии в основном обусловлены ядерными реакциями  ${}^9\text{Be} + n \rightarrow {}^8\text{Be} + 2n$ ,  ${}^8\text{Be} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + 94 \text{ кэВ}$ .



Образование междоузельных атомов гелия в решетке бериллия обуславливает ее искажение и при наличии температуры их диффузию к поверхности и к микрополостям, образование газовых пузырьков и их коалесценцию, что приводит к распуханию бериллия [1, 2].

В связи с этим для имитации влияния радиационных дефектов на улавливание атомов водорода желателен наряду с дефектами вводить в бериллий атомы гелия.

В данной работе для изучения влияния радиационных дефектов и гелия на улавливание атомов водорода в бериллии образцы бериллия предварительно облучались ионами гелия с энергией 2,8 МэВ. При указанной энергии ионы гелия проникают на глубину  $\sim 10$  мкм, которая меньше размера зерна исследуемого бериллия.

При исследовании распухания бериллия и накопления в нем трития использовался бериллий, применяемый в материаловедческих атомных реакторах в качестве материала отражателей при низких температурах [5—7]. При температуре 725 К подвижность гелия в решетке бериллия мала и коалесценция его пузырьков отсутствует. Если температура превышает 823 К, то наблюдается десорбция гелия из бериллия. Поэтому облучение бериллия ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ проводилось при температуре 773 К, при которой происходит быстрая диффузия гелия, образование гелиевых пузырьков и их коалесценция [2]. По данным работы [5] гелий в кристаллической решетке оказывает существенное влияние на водородный блистеринг.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При проведении экспериментов использовались образцы промышленного спрессованного бериллия марки ТШР-56, которые вначале полировались алмазной пастой 14 класса и затем электролитически. Образцы бериллия облучались ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ при температуре 773 К в ускорителе Ван де Граафа. Пучок ионов  $\text{He}^+$  был расфокусирован по всей поверхности мишени. Ионы  $\text{He}^+$  имплантировали при трех дозах облучения:  $10^{20}$ ,  $5 \cdot 10^{20}$  и  $10^{21}$   $\text{м}^{-2}$ , которые были меньше критических доз блистерообразования. Предварительно облученные ионами  $\text{He}^+$  мишени, а также исходный бериллий одновременно подвергались бомбардировке моноэнергетическими ионами  $\text{H}_3^+$  с энергией 9 кэВ при интенсивности ионного пучка ( $\text{H}^+$ , 3 кэВ)  $6 \cdot 10^{19}$   $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Дозы ионов водорода были равны  $5 \cdot 10^{22}$  и  $10^{23}$   $\text{м}^{-2}$ . Температура в процессе облучения ионами  $\text{H}^+$  с энергией 3 кэВ поддерживалась на уровне 573 К.

После имплантации ионов He и водорода, а также после совместного облучения ионами гелия и водорода проводились исследования микроструктуры поверхности мишеней с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL. Компонентный состав поверхностных слоев исходного бериллия и бериллия, облученного ионами  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$ , определялся методом обратного резерфордовского рассеяния. С этой целью в ускорителе Ван де Граафа измерялись энергетические спектры ионов гелия с начальной энергией 1,5 МэВ, обратно рассеянные на мишенях Be под углом  $170^\circ$  к поверхности.

Для изучения профилей распределения концентрации водорода в бериллии был применен метод атомов отдачи. В этих экспериментах пучок ионов  $\text{He}^+$  с энергией 2,2 МэВ падал на исследуемый образец под углом  $15^\circ$  к его поверхности, а атомы отдачи регистрировались под углом  $30^\circ$  к первоначальному направлению падения ионов  $\text{He}^+$ . Для получения абсолютных значений концентрации атомов водорода измерялись энергетические спектры стандартной калибровочной фольги милара. В табл. 1 приведены режимы облучения мишеней Be ионами  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$ .



Т а б л и ц а 1. Режимы облучения бериллия ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ ( $T_{\text{обл}} = 773 \text{ K}$ ) и  $\text{H}^+$  с энергией 3 кэВ ( $T_{\text{обл}} = 573 \text{ K}$ )

Номер мишени	Ион	Доза, $\text{He}^+/\text{м}^2$	Доза, $\text{H}^+/\text{м}^2$	$t$ , с, $\text{He}^+$
1	$\text{H}^+$	—	$5 \cdot 10^{22}$	—
2	$\text{He}^+$	$10^{21}$	—	10 000
3	$\text{He}^+ + \text{H}^+$	$10^{20}$	$5 \cdot 10^{22}$	1000
4	$\text{He} + \text{H}^+$	$10^{20}$	$10^{23}$	1000
5	$\text{He} + \text{H}^+$	$5 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{22}$	5000
6	$\text{He} + \text{H}^+$	$5 \cdot 10^{20}$	$10^{23}$	5000
7	$\text{He} + \text{H}^+$	$10^{21}$	$5 \cdot 10^{22}$	10 000
8	$\text{He} + \text{H}^+$	$10^{21}$	$10^{23}$	10 000

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 сравниваются экспериментальный (1) и рассчитанный (2) по программе TRIM профили распределения ионов водорода с энергией 3 кэВ после облучения дозой  $5 \cdot 10^{22} \text{ H}^+/\text{м}^2$  при температуре 573 К в бериллии. Расширение экспериментального профиля (1) по сравнению с (2) обусловлено диффузией водорода и вакансий при температуре 573 К.

Как показали исследования методом обратного резерфордовского рассеяния, концентрация кислорода в поверхностном слое облученного водородом бериллия не превышает 20 ат. %.

На рис. 2 представлены профили распределения ионов водорода в образцах № 1 и 3 (см. табл. 1). При одном и том же режиме облучения ионами  $\text{H}^+$  в случае предварительной бомбардировки ионами  $\text{He}^+$  дозой  $10^{20} \text{ м}^{-2}$  при температуре 573 К (см. рис. 2, кривая 2) максимум распределения водорода смещается в глубь мишени, а толщина имплантированного водородом слоя возрастает приблизительно в 2 раза. Интегральная концентрация атомов водорода увеличивается от  $1,5 \cdot 10^{21}$  до  $3,9 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ , т.е. в 2,6 раза. В результате предварительной имплантации ионов  $\text{He}$  доля уловленного водорода бериллием возрастает от 3 до 7,8% (образец № 1, 2) от числа пришедших на мишень ионов.

На рис. 3 показано влияние дозы облучения ионами водорода на профили распределения водорода в бериллии (в мишенях № 5, 6), предварительно облученных ионами  $\text{He}^+$  дозой  $5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$ . Увеличение дозы облучения ионами  $\text{H}^+$  от

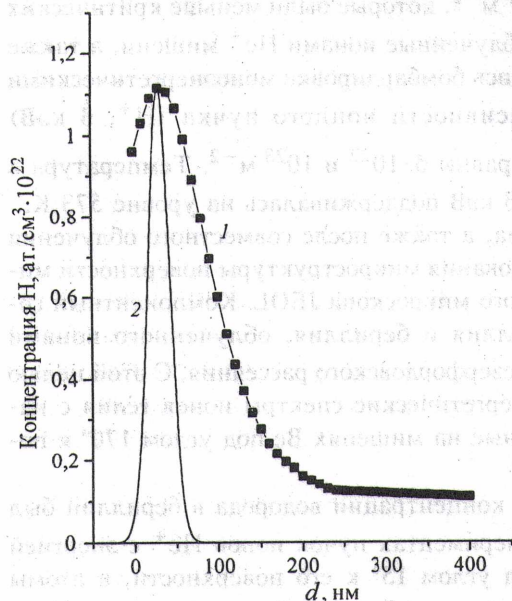


Рис. 1. Профили распределения ионов водорода, имплантированных с энергией 3 кэВ в бериллий до дозы  $5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ : 1 — эксперимент при температуре 573 К; 2 — расчет по программе TRIM



$5 \cdot 10^{22} \text{ Н/м}^2$  (кривая 1) до  $10^{23} \text{ Н/м}^2$  (кривая 2) приводит к увеличению интегральной концентрации водорода до  $4,5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ . Профиль распределения для большей дозы облучения ионами  $\text{H}^+$  смещается вглубь.

На рис. 4 показано влияние флюенса предварительного облучения ионами  $\text{He}^+$  на профили распределения ионов водорода, имплантированных в мишени (№ 3, 5, 7) бериллия (доза  $5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ ,  $T_{\text{обл}} = 573 \text{ К}$ ). Видно, что с ростом флюенса ионов  $\text{He}^+$  профили распределения смещаются к поверхности. В табл. 2 обобщены данные экспериментов по накоплению водорода при различных условиях облучения бериллия ионами  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$ .

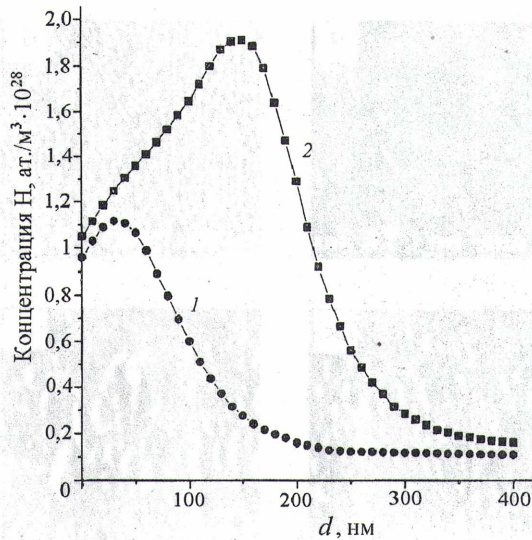


Рис. 2. Профили распределения ионов водорода, имплантированных с энергией 3 кэВ в бериллий до дозы  $5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$  при температуре 573 К: 1 — исходный бериллий; 2 — бериллий, предварительно облученный ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ до дозы  $10^{20} \text{ He/м}^2$  при температуре 773 К

Т а б л и ц а 2. Влияние дозы облучения ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ на накопление водорода в бериллии

Номер мишени	Доза $\text{He}^+/\text{м}^2$	Доза $\text{H}^+/\text{м}^2$	$C, \text{ H/м}^2$	$C/D, \%$
1	—	$5 \cdot 10^{22}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	3
3	$10^{20}$	—	$3,9 \cdot 10^{17}$	7,8
5	$5 \cdot 10^{20}$	—	$4,2 \cdot 10^{17}$	8,4
7	$10^{21}$	—	$4,0 \cdot 10^{17}$	8,0

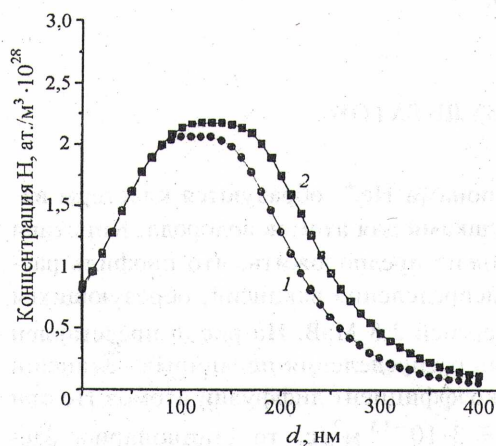


Рис. 3. Профили распределения ионов водорода, имплантированных с энергией 3 кэВ при  $T_{\text{обл}} = 573 \text{ К}$  в бериллий, предварительно облученный ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ при температуре 773 К до дозы  $5 \cdot 10^{20} \text{ He/м}^2$ : 1 —  $\text{H}^+$ ,  $D = 5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ ; 2 —  $\text{H}^+$ ,  $D = 10^{23} \text{ м}^{-2}$

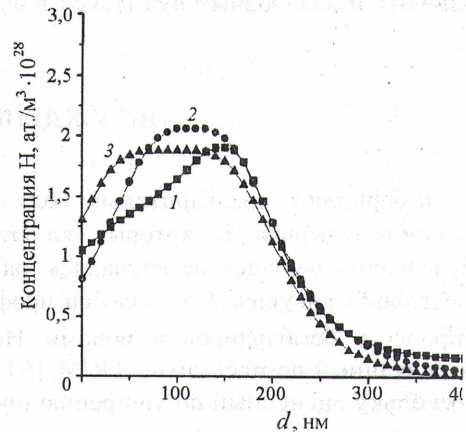


Рис. 4. Профили распределения ионов водорода, имплантированных с энергией 3 кэВ при  $T_{\text{обл}} = 573 \text{ К}$  ( $D = 5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ ) в бериллий, предварительно облученный ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ при  $T_{\text{обл}} = 773 \text{ К}$  и дозах: 1 —  $\text{He}^+$ , 2,8 МэВ,  $D = 10^{20} \text{ He/м}^2 + \text{H}^+$ ; 2 —  $\text{He}^+$ , 2,8 МэВ,  $D = 5 \cdot 10^{20} \text{ He/м}^2 + \text{H}^+$ ; 3 —  $\text{He}^+$ , 2,8 МэВ,  $D = 10^{21} \text{ He/м}^2 + \text{H}^+$



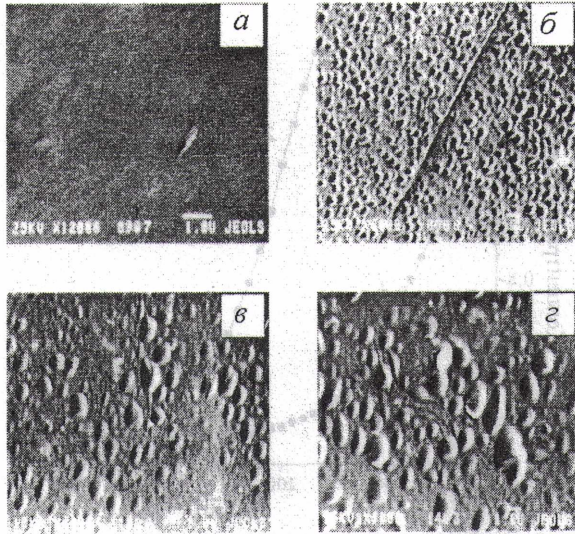


Рис. 5. Микроструктура поверхности бериллия после облучения ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ при  $T_{\text{обл}} = 773 \text{ К}$  и имплантации ионов  $\text{H}^+$  с энергией 3 кэВ при  $T_{\text{обл}} = 573 \text{ К}$ : а —  $\text{He}^+$ ,  $D = 10^{21} \text{ He}/\text{м}^2$ ; б —  $\text{H}^+$ ,  $D = 10^{23} \text{ H}/\text{м}^2$ ; в —  $\text{He}^+$ ,  $D = 5 \cdot 10^{20} \text{ He}/\text{м}^2 + \text{H}^+$ ,  $D = 10^{23} \text{ H}/\text{м}^2$ ; г —  $\text{He}^+$ ,  $D = 10^{21} \text{ He}/\text{м}^2 + \text{H}^+$ ,  $D = 5 \cdot 10^{22} \text{ H}/\text{м}^2$ .

( $10^{21} \text{ He}^+/\text{м}^2$ ), наблюдается разрыв крышек у части блистеров. Уменьшение интегральной концентрации накопленного водорода в мишени № 7 (см. табл. 2) обусловлено этим эффектом.

Как видно из рис. 5, а, максимальный флюенс ионов  $\text{He}^+$  ( $5 \cdot 10^{21} \text{ He}/\text{м}^2$ , мишень № 2) ниже критической дозы блистерообразования. Таким образом, разрыв оболочек блистеров в мишени № 7 является результатом суммарного вклада — накопления гелиевых и водородных пузырьков в бериллии.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В бериллии, предварительно облученном ионами  $\text{He}^+$ , образуются кластеры вакансий и пузырьки He, которые являются ловушками для атомов водорода. Кинетика образования ловушек не изучалась, однако можно предположить, что профиль распределения ловушек  $T(x)$  подобен профилю распределения вакансий, образующихся в процессе бомбардировки ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ. На рис. 6 представлен рассчитанный по программе TRIM [6] профиль распределения первичных вакансий. Поскольку оцененный по уширению профиля коэффициент диффузии атомов He при исследуемой температуре облучения равен  $D \cong 3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ , то стационарное распределение с линейной зависимостью  $n(x) = n_{\text{max}} \cdot x/R_p$  при  $x < R_p \cong 10,9 \text{ мкм}$  достигается за время облучения  $t \cong 10^2 \text{ с}$  (флюенс  $10^{20} \text{ He}/\text{м}^2$ ). Исходя из этого, можно предположить, что кинетика атомов водорода может быть описана с помощью уравнения (1)

$$\partial C/\partial t = D_{\text{H}} \cdot \partial^2 C/\partial x^2 - \alpha \cdot D_{\text{H}} \cdot (T(x) - (a/r)^3 \cdot C_p) \cdot C + G(x), \quad (1)$$

Из данных табл. 2 можно сделать вывод о том, что интегральная концентрация атомов водорода и доля уловленного водорода по отношению к числу приходящих на мишень ионов максимальны для мишени № 5, которая предварительно облучалась флюенсом  $5 \cdot 10^{20} \text{ He}^+/\text{м}^2$ . Дальнейшее увеличение флюенса облучения бериллия ионами  $\text{He}^+$  до  $10^{21} \text{ He}/\text{м}^2$  (мишень № 7) при прочих равных условиях способствует уменьшению накопления водорода в бериллии.

Исследования топографии поверхности показали, что при исследуемых режимах облучения ионами  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$  на поверхности мишеней № 1—7 образуются блистеры с поврежденными крышками (рис. 5, б, в).

В отличие от этого на поверхности мишени № 7 (рис. 5, г) предварительно имплантированной ионами  $\text{He}^+$  при наибольшем флюенсе



где  $C$  — профиль распределения подвижных атомов водорода;  $C_t$  — профиль распределения уловленных атомов водорода;  $G(x) = j/\Delta R \cdot \exp(x - 2r_p)^2/2\Delta r^2$  — функция источника, описывающая распределение имплантированных атомов водорода;  $r_p$  и  $\Delta r_p$  — средний проективный пробег и разброс пробегов ионов водорода с энергией 3 кэВ;  $\alpha = 4\pi r$ ,  $r = 5$  нм — радиус ловушки;  $T(x) = kx + T_0$ , где  $k = T_{\max}/R_p = 7 \cdot 10^{30} \text{ м}^{-2}$ ,  $T_0 = 10^{28} \text{ м}^{-3}$  — описывает ловушки, образованные ионами водорода. Второй член в уравнении (1) характеризует подвижные атомы водорода, уловленные при насыщении ловушками;  $a$  — радиус атома водорода в ловушке.

Для простоты в качестве граничного условия принято  $C(0) = 0$ .

На рис. 7 сравниваются рассчитанные (1, 2) и экспериментальные (1а, 2а) профили распределения ионов водорода в предварительно облученном ионами  $\text{He}^+$  бериллии. Простая модель дает хорошее согласие рассчитанного максимума распределения (кривая 1) с экспериментальным (кривая 2) при дозе облучения ионами  $\text{H}^+$   $5 \cdot 10^{22} \text{ Н/м}^2$ . Профили распределения концентрации водорода также хорошо совпадают.

Увеличение дозы облучения ионами  $\text{H}^+$  приводит к увеличению концентрации уловленного водорода и сдвигу максимума распределения вглубь в соответствии с экспериментальными результатами. Вместе с тем расчетные концентрация водорода и сдвиг профиля (кривая 2) несколько выше экспериментальных (кривая 2а).

Расчет подтверждает важную роль ловушек в улавливании водорода.

Следует отметить, что наблюдается сдвиг к поверхности экспериментальных профилей распределения водорода в бериллии с ростом флюенса предварительного облучения ионами  $\text{He}^+$  (см. рис. 5). Это расширение профилей обусловлено образованием на облучаемой поверхности блистеров в результате облучения ионами  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$ . Изменение профиля поверхности вследствие блистерообразования необходимо принимать во внимание при определении концентрации водорода методом атомов отдачи. Оценка потерь энергии атомами отдачи определяется формулой

$$\Delta E = (\partial E / \partial z)(h / \sin \alpha), \quad (2)$$

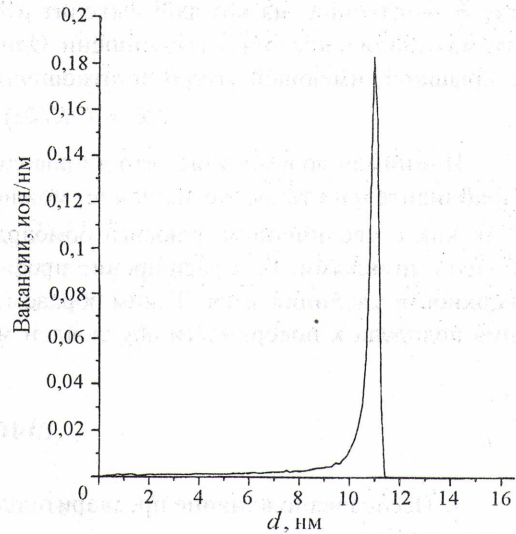


Рис. 6. Распределение вакансий в бериллии, облученном ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ при  $T_{\text{обл}} = 773 \text{ К}$

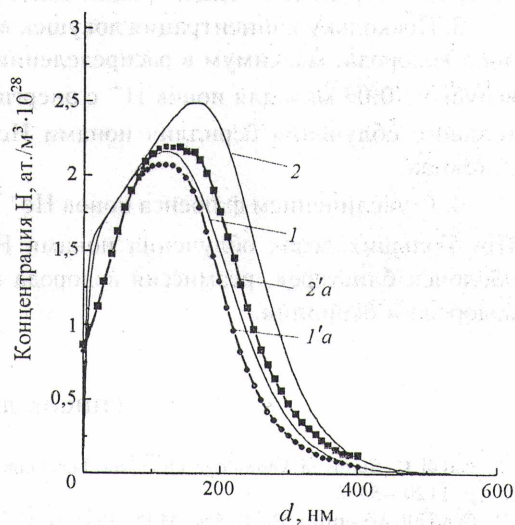


Рис. 7. Сравнение экспериментальных (1а, 2а) и рассчитанных (1, 2) профилей распределения ионов водорода с энергией 3 кэВ, имплантированных в предварительно облученный ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ (доза  $10^{20} \text{ Н/м}^2$ ) бериллий: 1, 1а —  $D_{\text{H}} = 5 \cdot 10^{22} \text{ Н/м}^2$ ; 2, 2а —  $D_{\text{H}} = 10^{23} \text{ Н/м}^2$



где  $h$  — глубина, из которой выходит атом отдачи;  $\alpha$  — угол между направлением атома отдачи и поверхностью мишени. Однако если атом водорода находится в блистере с крышкой, имеющей угол  $\theta$  по отношению к поверхности, то

$$\Delta E = (\partial E / \partial z) (h / \sin(\alpha + \theta)). \quad (3)$$

Принимая во внимание, что в проводимых экспериментах  $\alpha = 15^\circ$  и угол  $\theta$  имеет приблизительно такое же значение, можно заключить, что  $h$  уменьшается в  $\sim 2$  раза. Так как с увеличением флюенса бомбардирующих ионов  $\text{He}^+$  блистеры становятся более выпуклыми, то и расширение профиля распределения водорода в сторону к поверхности увеличивается. Таким образом, наблюдаемый сдвиг профилей распределения водорода к поверхности обусловлен методикой эксперимента.

## ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние предварительного облучения ионами  $\text{He}^+$  на улавливание водорода бериллием.
2. Кластеры вакансий и гелиевые пузырьки, образующиеся в бериллии при его предварительном облучении высокоэнергетичными ионами  $\text{He}^+$ , способствуют увеличению интегральной концентрации водорода в 2,8 раза.
3. Поскольку концентрация ловушек возрастает на глубине, превышающей пробег иона водорода, максимум в распределении концентрации атомов водорода смещается вглубь от 0,03 мкм для ионов  $\text{H}^+$  с энергией 3 кэВ до 0,15 мкм для случая предварительного облучения бериллия ионами  $\text{He}^+$  с энергией 2,8 МэВ при прочих равных условиях.
4. С увеличением флюенса ионов  $\text{He}^+$  возрастает скорость образования блистеров. При больших дозах облучения ионами  $\text{He}^+$  ( $D \geq 10^{21} \text{ He}/\text{м}^2$ ) наблюдается разрыв оболочек блистеров, реэмиссия водорода и уменьшение интегральной концентрации водорода в бериллии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nardi C. Status of knowledge about the beryllium swelling by neutron irradiation: PT /Nucl./91/24 ISSN, p. 1120—5598.
2. Scaffidi-Argentina F., Donne M.D., Ferrero C., Ronchi C. Helium induced swelling and tritium trapping mechanisms in irradiated beryllium: ISFNT-3 Pre-Print.
3. Beeston J.M. Gas Retention in Irradiated Beryllium: EGG Idna O Report, EGG-FSP-9125, 1950.
4. Sannen L. et al. Helium content and Swelling of Low Temperature Irradiated/Post Irradiated Annealed Beryllium: CFN/SCK Report mater.
5. Guseva M.I., Martynenko Yu.V. — J. Nucl. Mater., 1980, vol. 93—94, p. 734—738.
6. Mayer M., Berisch R., Plank H. — J. Nucl. Mater., 1996, vol. 230, p. 67.
7. Wampler W.R. — J. Nucl. Mater., 1984, vol. 122/123, p. 1598.
8. Haasz A.A., Davis J.W. — J. Nucl. Mater., 1997, vol. 241—243, p. 1076.
9. Causey R.A., Walsh D.S. — J. Nucl. Mater., 1998, vol. 254, p. 84—86.
10. Causey R.A., Longhurst G.R., Harbin W. — In: Proc. Int. Workshop on Present Status and Prospect of Tritium-Material Interaction Studies, Toyma, Japan, 1996.
11. Haasz A.A., Davis J.W. — J. Nucl. Mater., 1997, vol. 241—243.

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2001 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2001, вып. 1, с. 44—50.