

Захват и выделение гелия при бомбардировке ниобия ионами He^+

ПИСАРЕВ А. А., ТЕЛЬКОВСКИЙ В. Г.

УДК 539.12.17:539.924

В конструкторских расчетах и прогнозных оценках времени разрушения конструкционных материалов термоядерного реактора следует принимать во внимание процессы поглощения и обратного газовойделения ионов D^+ , T^+ , He^+ в вакуумной стенке, оказывающие сильное влияние на плазму и выбор материала стенки [1]. Необходимость изучения захвата газовых ионов возникает также при разработке дивертеров плазменных установок [2].

Внедрение ионов изотопов водорода экспериментально изучалось в работах [2–7]. Поглощение же ионов He^+ исследовано слабо [8]. Сведения о захвате ионов с энергией >5 кэв в литературе отсутствуют.

В настоящей работе выполнены эксперименты по определению характеристик внедрения и обратного газовойделения ионов He^+ , бомбардирующих с энергией 15 кэв ниобиевую мишень при температурах 300–1800° К.

Условия проведения эксперимента

Поглощение He^+ изучали в вакуумной камере масс-монохроматора с разрешением по массам и энергиям ~ 200 . Давление остаточного газа $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Ионный пучок с плотностью ~ 10 мка/см² распределен равномерно по площади образца $\sim 0,05$ см². Ленточная мишень размером $70 \times 10 \times 0,1$ мм крепится к водоохлаждаемым вводам и допускает омический прогрев центральной облучаемой части вплоть до температуры плавления. Температуру контролировали термопарой ВР5/20.

Эксперимент проводили следующим образом. Перед началом работы образец отжигали при 2000° К в течение 2 ч и затем охлаждали до 290° К. На мишень выводится пучок, интенсивность которого измеряется с поправкой на вторичную электронную эмиссию. Одновременно мишень прогревали. После окончания облучения и охлаждения образца остаточный газ откачивали и мишень прогревали со средней скоростью 8° К/сек до полного удаления внедренного газа. Выход газа исследовали в динамическом режиме [9, 10], при котором скорость газовойделения из образца пропорциональна превышению парциального давления газа над его базовым давлением, а количество внедрен-

ных частиц пропорционально площади под кривой зависимости скорости газовойделения от времени. Парциальное давление гелия измеряли омегатроном ИПДО-1. Контрольные эксперименты показали, что адсорбция и десорбция остаточного и рабочего газа на мишени и окружающих ее поверхностях не искажает кривых газовойделения гелия при прогреве.

Экспериментальные данные

Увеличение температуры мишени после внедрения в нее ионов He^+ приводит к освобождению гелия из ниобия в вакуум. Характер этого процесса зависит от температуры мишени при бомбардировке, от энергии и дозы ионов. Влияния давления остаточного газа и плотности ионного тока на выделение атомов гелия не обнаружено. На рис. 1 представлены зависимости скорости выхода гелия после облучения при 290° К различными дозами ионов. Из рисунка видно, что освобождение газа происходит в три стадии, каждая состоит из нескольких пиков. Поэтому кривые $j(T)$, где j — поток в вакуум; T — температура прогрева, иногда называют спектрами газовойделения. Отметим, что третья, наиболее высокотемпературная ста-

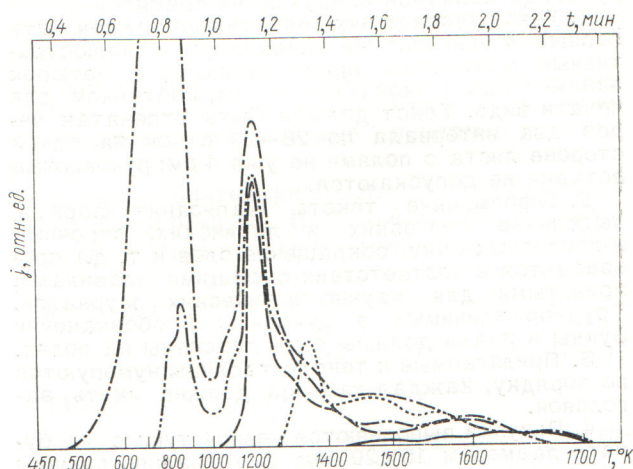


Рис. 1. Зависимость скорости газовойделения гелия из ниобия при прогреве после окончания ионной бомбардировки от температуры мишени. Дозы облучения, ион/см²: — — — — — $1 \cdot 10^{16}$; — — — — — $5 \cdot 10^{16}$; — — — — — $1 \cdot 10^{17}$; — — — — — $1,5 \cdot 10^{17}$; — — — — — $8 \cdot 10^{17}$.

для газовой выделения (1400–1750° K) существует при любых дозах облучения, вторая (1000–1400° K) и первая (500–1000° K) стадии присутствуют не всегда и появляются лишь после достижения критических доз N_{α} , равных $5 \cdot 10^{16}$ и $1,2 \cdot 10^{17}$ ион/см² соответственно.

Существенно, что спектры газовой выделения зависят от температуры мишени при бомбардировке T_b . С увеличением T_b в спектре уменьшаются и исчезают пики, выход гелия в которых происходит при температуре, близкой к T_b . Это означает, что во время бомбардировки часть ионов выделяется в вакуум в результате термически активируемых процессов. При этом количество газа, захваченного в мишени (N_0), уменьшается. Зависимости N_0 от дозы облучения N_{α} представлены на рис. 2 для различных T_b . Определение N_0 проводили по площади под кривой $j(T)$ в предположении, что при $N_b \approx 10^{15}$ ион/см² все бомбардирующие частицы захватываются в металл [11].

Процессы поглощения ионов описываются коэффициентами захвата $\eta = N_0/N_b$, внедрения $\eta_1 = \partial N_0 / \partial N_{\alpha}$, газовой эмиссии $\beta = 1 - \eta_1$. Параметры η , η_1 , β являются функциями N_{α}

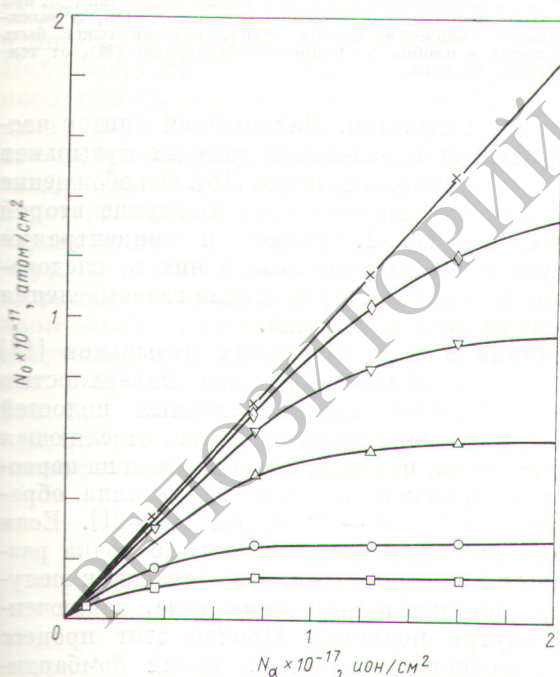


Рис. 2. Зависимость количества частиц, захваченных мишенью при различных температурах, от дозы облучения ионами He^+ :

□ — 300; ◇ — 600; ▽ — 800; △ — 1000; ○ — 1200; × — 1400° K.

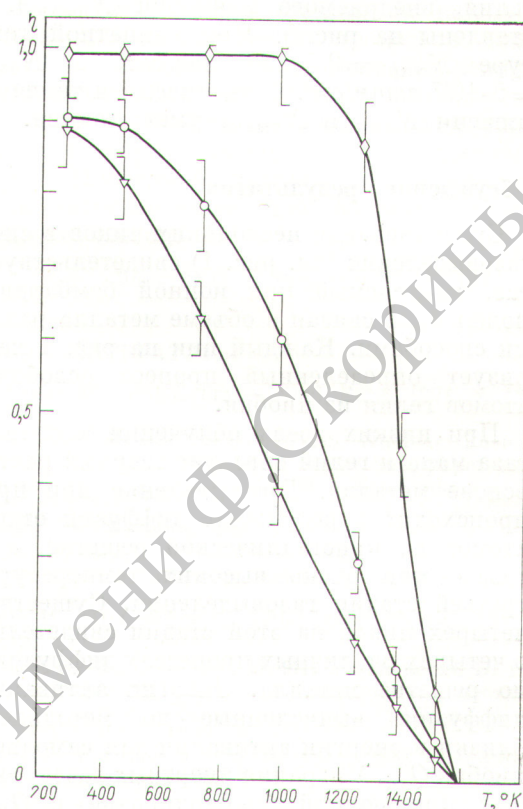


Рис. 3. Зависимость коэффициента захвата ионов He^+ от температуры мишени при бомбардировке.

Дозы облучения, ион/см²: ◇ — $1 \cdot 10^{16}$; ○ — $7 \cdot 10^{16}$; ▽ — $1,5 \cdot 10^{17}$.

и T_b . На рис. 3 представлены зависимости $\eta(T_b)$ для различных N_{α} , а на рис. 4 зависимости $\beta(N_{\alpha})$ для нескольких T_b . При комнатной температуре практически 90% ионов внедряется в образец, если $N_{\alpha} < 1,7 \cdot 10^{17}$ ион/см². При большей дозе происходит резкое возрастание газовой эмиссии до $\beta = 1$. С увеличением температуры термически активируемое газоразделение происходит быстрее и $\beta(T_b)$ возрастает, а $\eta(T_b)$ падает для любых N_{α} . С увеличением N_{α} коэффициент захвата η уменьшается, несмотря на увеличение N_0 . При очень больших дозах и температурах во время бомбардировки $\beta = 1$ и $\eta = 0$. Это означает, что на каждый бомбардирующий ион из мишени выделяется один предварительно внедренный в нее атом гелия, а доля захваченных частиц становится незначительной. Продолжение бомбардировки не приводит к увеличению $N_0(N_{\alpha})$: мишень насыщается гелием (см. рис. 2). Дозы облучения, при которых происходит насыщение ниобия ($N_{\alpha \text{кр}}$), и максимальные количества

гелия, внедряемого в ниобий ($N_{\text{омакс}}$), представлены на рис. 5. При комнатной температуре $N_{\alpha\text{кр}} = 2,5 \cdot 10^{18}$ ион/см², а $N_{\text{омакс}} = 5 \cdot 10^{17}$ атом/см². С увеличением температуры мишени $N_{\alpha\text{кр}}$ и $N_{\text{омакс}}$ уменьшаются.

Обсуждение результатов

Существование нескольких пиков в спектрах газовой эмиссии (см. рис. 1) свидетельствует, что газ, внедряемый при ионной бомбардировке, может быть связан в объеме металла различными способами. Каждый пик на рис. 1 характеризует определенный процесс освобождения атомов гелия из ниобия.

При низких дозах облучения концентрация газа мала и гелий образует твердый раствор на основе металла. Газовыделение при прогреве происходит в результате диффузии отдельных атомов по кристаллической решетке, а выход газа — при очень высоких температурах на третьей стадии газовыделения. Существование четырех пиков на этой стадии свидетельствует о четырех различных процессах диффузии гелия по решетке металла. Энергии активации для диффузии, вычисленные по методике [12], близки к энергии активации для самодиффузии ниобия Q_{sd} . Миграция инертных газов, внедренных при ионной бомбардировке с $Q \approx Q_{sd}$, обнаружена также в работах [11, 13–15].

При увеличении дозы облучения отдельные атомы гелия в металле объединяются и стано-

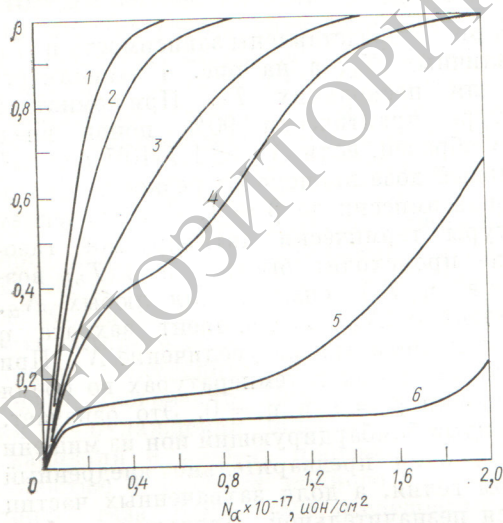


Рис. 4. Зависимость коэффициента газовой эмиссии от дозы бомбардирующих ионов для различных температур мишени при бомбардировке:

1 — 1400; 2 — 1200; 3 — 1000; 4 — 800; 5 — 600; 6 — 300° К.

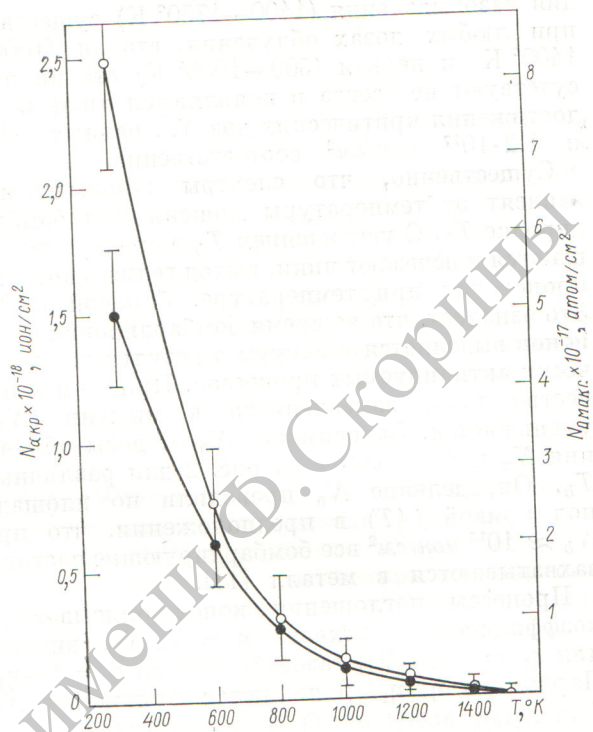


Рис. 5. Зависимость критической дозы облучения (○), при которой происходит насыщение металла гелием, и максимального количества атомов гелия, которое может быть захвачено в ниобий при ионной бомбардировке (●), от температуры мишени.

вятся немобильными. Дальнейший приток частиц вызывает образование газовых пузырьков в области торможения ионов [16]. Освобождение газа из них объясняет происхождение второй стадии на рис. 1. Размер и концентрация пузырьков, количество газа в них и, следовательно, структура второй стадии газовыделения зависят от дозы облучения.

Слияние и рост отдельных пузырьков [17] приводят к образованию под поверхностью металла плоских газонаполненных полостей [18]. При больших дозах оболочка, отделяющая их от вакуума, начинает изгибаться, и на первоначально плоской поверхности металла образуются «волдыри» — блистеры [18–21]. Если напряжения становятся велики, оболочка разрывается или отрывается, что приводит к шелушению металла и выделению газа, заключенного внутри полостей. Причем этот процесс может происходить как во время бомбардировки, так и при последующем прогреве.

Анализ спектров газовыделения позволяет сделать следующие выводы. Основным процессом, приводящим к обратной эмиссии гелия

в вакуум во время ионной бомбардировки, является взрыв больших волдырей. С увеличением температуры T_b давление газа в волдырях возрастает, а предел прочности металла падает. Это способствует шелушению поверхности и сопутствующему газовыделению, в результате чего η и N_0 уменьшаются, а β возрастает. Насыщение металла при больших дозах происходит в результате конкуренции исчезновения и зарождения новых гелиевых полостей. С повышением T_b состояние насыщения достигается быстрее за счет ускорения первого процесса. При очень больших температурах газовыделение определяется миграцией отдельных атомов гелия, диффузионная подвижность которых становится высокой. Можно предположить, что в диапазоне температур третьей стадии ($\sim 1500^\circ \text{K}$) быстрый выход диффундирующих частиц в вакуум будет препятствовать образованию волдырей и шелушению поверхности. При этой же температуре должен спадать до нуля коэффициент захвата η и $N_{\text{макс}}$, что подтверждается рис. 3 и 4.

Заключение

Исследован захват и выделение гелия при бомбардировке ниобиевой мишени, находящейся в интервале температур $290-1800^\circ \text{K}$, ионами He^+ с энергией 15 кэВ. Показано, что с увеличением температуры при облучении T_b коэффициент обратной газовой эмиссии β увеличивается, а коэффициент захвата η и количество внедренных ионов N_0 уменьшаются. При температурах $>1500^\circ \text{K}$ практически 100% бомбардирующих ионов выделяют обратно в вакуум. С повышением дозы облучения β и N_0 возрастают, а η спадает. Увеличение β до единицы означает насыщение ниобия гелием. Доза облучения, при которой наступает это насыщение, и его уровень уменьшаются с температурой T_b .

В результате анализа спектров обратного газовыделения показано, что освобождение

гелия происходит в три стадии, за каждую ответствен один из следующих процессов: диффузия отдельных атомов, растворенных в решетке; выделение гелия из газовых пузырьков, находящихся в объеме металла; выход газа в результате взрыва оболочки поверхностных волдырей. Последний процесс дает основной вклад в газовыделение при больших дозах внедренных частиц.

Поступила в Редакцию 1/IV 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaminsky M. «IEEE Trans. Nucl. Sci.», 1971, v. 18, p. 208.
2. Erents K., McCracken G. BNES Nuclear Fusion Reactor Conf. at Culham Lab., Sept. 1969, paper 4.9.
3. Боровик Е. С., Катрич Н. П., Николаев Г. Т. «Атомная энергия», 1966, т. 21, вып. 5, с. 339.
4. Катрич Н. П. «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 3, с. 307.
5. Erents K., McCracken G. «Brit. J. Appl. Phys.», 1969, v. 2, p. 1397.
6. Erents K., McCracken G. «Radiation effects», 1970, v. 3, p. 123.
7. Писарев А. А., Сотников В. М., Тельковский В. Г. В сб.: II Всесоюз. симп. по взаимодействию частиц с твердым телом (Москва, 9—11 окт. 1972 г.), М., изд. ОНТИ ИАЭ, 1972, с. 240.
8. Carter G., Colligon J. Ion Bombardment of Solids. London, Heinemann, 1968.
9. Carter G. «Vacuum», 1962, v. 12, N 5, p. 245.
10. Redhead P. Ibid., N 8, p. 203.
11. Erents K., Carter G., «Vacuum», 1963, v. 16, p. 523.
12. Бергамбеков Л. Б. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 6, с. 625.
13. Erents K., Carter G. «Vacuum», 1967, v. 17, p. 97.
14. Erents K., Carter G., Ibid., p. 215.
15. Davies A., Carter G. [6], p. 107.
16. Быков В. Н., Кротов В. И., Лебедев С. Я. [7], с. 382.
17. Barnes R., Mazey D. «Proc. Roy. Soc.», 1963, v. A275, p. 47.
18. Blewer R., Maurin J. «J. Nucl. Mater.», 1972, v. 44, p. 260.
19. Primak W., Luthra J. «J. Appl. Phys.», 1966, v. 37, p. 2287.
20. Kaminsky M., Das S. «Appl. Phys. Lett.», 1972, v. 21, p. 443.
21. Das S., Kaminsky M. «J. Appl. Phys.», 1973, v. 44, p. 25.