

ей. Длительность радиочастотного импульса 1—2 мсек.

Для резонансного ВЧ-нагрева плазмы применяется автогенератор мощностью 4 Мвт на частотах 8—12 Мгц. ВЧ-мощность вводится в плазму при помощи периодической индукционной катушки, размещенной на керамическом участке камеры стелларатора.

При экспериментах по турбулентному нагреву используется быстрая конденсаторная батарея из четырех конденсаторов типа КИМ-2 общей емкостью 0,8 мкф. Батарея коммутируется при помощи двух вакуумных разрядников [5].

Для омического нагрева плазмы на криволинейных участках стелларатора располагаются тороидальные сердечники трансформаторов, на которые намотана первичная обмотка. Вторичным витком трансформаторов служит плазменное кольцо. Конденсаторная батарея омического нагрева емкостью 1500 мкф собрана из 10 конденсаторов типа ИМ-5/150; коммутирующим элементом служат два игнитрона ИВС-100/15.

В дальнейшем на прямолинейном участке вакуумной камеры будет установлен импульсный магнитный клапан для инъекции плазмы в стелларатор [6].

Последовательное использование трех методик настройки системы магнитных полей (маг-

нитные измерения, кольцевые электронные пушки, многократное прохождение электронного пучка) позволило провести наиболее точную юстировку. Методика, основанная на использовании многократного прохождения электронного пучка [7], дала возможность в приближении ведущих центров отдельных частиц доказать существование магнитных поверхностей в стеллараторе типа рейстрека и определить их форму. Положение и углы поворота катушек основного поля позже были рассчитаны на электронно-счетной машине. Результаты расчета хорошо совпадают с результатами юстировки системы.

Поступила в Редакцию 20/VIII 1966 г.
В окончательной редакции 10/I 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Сухомлин и др. ЖЭТФ, 1, 45 (1965).
2. Н. И. Назаров, А. И. Ермаков, В. Т. Толлок. В сб. «Высокочастотные свойства плазмы». Киев, «Наукова думка», 1965.
3. Е. К. Завойский. «Атомная энергия», 14, 57 (1963).
4. W. Hooge et al. Phys. Fluids, 8, 1146 (1965).
5. П. Я. Бурченко и др. ЖЭТФ, III, 243 (1966).
6. К. Д. Синельников, В. Т. Толлок. ЖТФ, 32, 248 (1962).
7. Г. М. Батанов и др. «Докл. АН СССР», № 6, 1293 (1965).

Определение коэффициента внедрения быстрых ионов H_1^+ в металлы методом конденсации

Е. С. БОРОВИК, Н. П. КАТРИЧ, Г. Т. НИКОЛАЕВ

УДК 533.9:621.521

В работе [1] было показано, что величина коэффициента внедрения η ионов H_1^+ с энергией 35 кэв в металлы зависит от концентрации внедренного водорода, температуры T и вида металла. Характер зависимости η от T для различных металлов неодинаков. В области больших концентраций внедренного водорода кривая зависимости η от T для металлов, образующих с водородом прочные химические связи (тантал, титан), имеет максимум в интервале температур 300—600° К. Для металлов, образующих с водородом слабые химические связи (например, никель), кривая не имеет максимума. Общее для них то, что при высоких температурах коэффициент внедрения близок к нулю, при низких температурах величина η практически одинакова и достаточно велика.

Как отмечалось в работе [1], при температурах выше 300° К удовлетворительное объяснение результатов может быть получено на основе обычных представлений о диффузии водорода в металлах. Высокий коэффициент внедрения при низких температурах объяснить трудно. Действительно, при 78° К коэффициент диффузии настолько мал, что диффузией водорода в глубь металла можно пренебречь. В связи с этим внедренный водород должен концентрироваться в тонком поверхностном слое металла и величина η должна определяться диффузией внедренного водорода из металла по макроскопическим тепловым каналам. При больших концентрациях внедренного водорода коэффициент η должен равняться нулю. Однако эксперименты показали [1], что η не снижается ниже

0,5 даже при таких высоких концентрациях внедренного водорода, как $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Для объяснения этих результатов необходимы дальнейшие исследования. В частности, нужно определить скорость распыления внедренного водорода бомбардирующими ионами. Может оказаться, что скорость распыления внедренного водорода в виде атомов сравнима со скоростью диффузии по макроскопическим тепловым каналам. В этих условиях для экспериментального определения η по количеству выделившегося из мишени газа необходимо знать парциальные давления смеси H_1 и H_2 . Определение парциального давления атомарного водорода является сложной задачей, требующей специальной калибровки датчика масс-спектрометра. В наших условиях наиболее простой метод учета парциального давления атомарного водорода — метод конденсации. Как известно, в твердом состоянии атомарная модификация водорода неустойчива, поэтому атомарный водород, сконденсированный при температуре $\leq 4^\circ \text{K}$, должен практически мгновенно рекомбинировать [3]. Последующее испарение молекулярного водорода дает возможность определить количество несорбированных атомов, а следовательно, и η независимо от соотношения между парциальными давлениями H_1 и H_2 .

Метод измерения

Установка, на которой проводились измерения, подробно описана в работах [1, 2]. На рис. 1 показана схема камеры мишени. Подготовка камеры к измерениям, как и прежде, включала в себя предварительный прогрев до 600°K в течение 3 ч. Предельный вакуум в камере мишени составлял $5 \cdot 10^{-10} \div 1 \cdot 10^{-9} \text{ торр}$. Исследуемая мишень монтировалась на фланце таким образом, чтобы ток пучка ионов H_1^+ на нее измерялся непрерывно во время бомбардировки. Для исследований в области температур 300°K применялись мишени в виде полых коробочек (подготовка их к измерениям описана в работе [1]). Мишень охлаждалась жидким азотом или проточной водой. Для исследований при высоких температурах применялись тонкие мишени толщиной $0,05\text{--}0,025 \text{ мм}$, которые перед измерениями обезгаживались омическим нагревом до температуры, близкой к температуре плавления. Во время экспериментов эти мишени нагревались только бомбардирующим пучком ионов H_1^+ . Ток пучка ионов был равен 60 мкА (плотность тока $120 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$), энергия ионов составляла 35 кэВ . Бомбардируемая

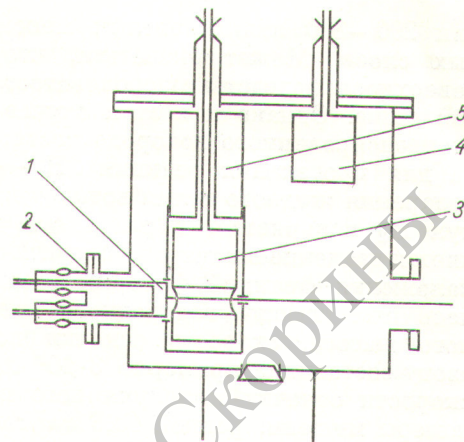


Рис. 1. Схема камеры измерений:

1 — мишень; 2 — держатель мишени; 3 — гелиевый конденсационный насос; 4 — водородный конденсационный насос; 5 — азотный экран.

поверхность мишени окружена гелиевым конденсационным насосом и азотным экраном с отверстиями для входа пучка ионов диаметром 16 мм . Емкость гелиевого конденсационного насоса равна $0,5 \text{ дм}^3$. Азотный экран служит для защиты гелиевого конденсационного насоса от теплового излучения стенок камеры. Водородный конденсационный насос предназначен для откачки фоновых газов.

Метод измерений заключался в следующем. Исследуемая мишень бомбардировалась ионами H_1^+ . При достижении таких концентраций внедренного водорода, при которых величина η имеет минимальное значение, бомбардировка прекращалась, затем в гелиевый конденсационный насос заливался жидкий гелий. Откачкой паров над жидким гелием температура поверхности гелиевого конденсационного насоса понижалась до $\sim 2,5^\circ \text{K}$, после чего бомбардировка мишени возобновлялась. Водород, выделявшийся из мишени во время бомбардировки, практически весь конденсировался на поверхности гелиевого конденсационного насоса. Поверхность, доступная для конденсации, составляла 60 см^2 . Продолжительность бомбардировки ограничивалась скоростью испарения жидкого гелия. При бомбардировке мишени, охлаждаемой жидким азотом, гелий испарялся за $1,5 \text{ ч}$. При бомбардировке тонкой мишени, нагреваемой быстрыми ионами, гелий испарялся за 30 мин . При токе ионов 60 мкА в зависимости от величины η и продолжительности бомбардировки на поверхности гелиевого конденсационного насоса в пересчете на молекулярный водород конденсировалось $3,5\text{--}6 \cdot 10^{17}$ молекул,

или 200—300 эквивалентных мономолекулярных слоев. Может оказаться, что истинная поверхность вследствие шероховатостей на порядок выше. Однако и в этом случае плотность скопированного водорода достаточно велика для протекания реакции $2H_1 \rightarrow H_2$. После испарения жидкого гелия водород в виде молекул H_2 испаряется, в результате чего изменяется давление в камере мишени. Возможность наложения фракций фоновых газов исключалась при помощи водородного конденсационного насоса, скорость откачки которого по азоту составляла примерно $3 \cdot 10^3 \text{ дм}^3/\text{сек}$. При скорости откачки молекулярного водорода из камеры мишени, равной $13,5 \text{ дм}^3/\text{сек}$, давление вследствие испарения H_2 изменялось в пределах $1 \cdot 10^{-9} - 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ торр}$. Скорость испарения рассчитывалась по формуле

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_0(p-p_0)w}{760} \text{ молекул/сек},$$

где n_0 — число молекул в 1 дм^3 при нормальных условиях; p_0 — начальное давление, торр; p — рабочее давление, торр; w — скорость откачки молекулярного водорода, $\text{дм}^3/\text{сек}$; 760 — атмосферное давление, торр.

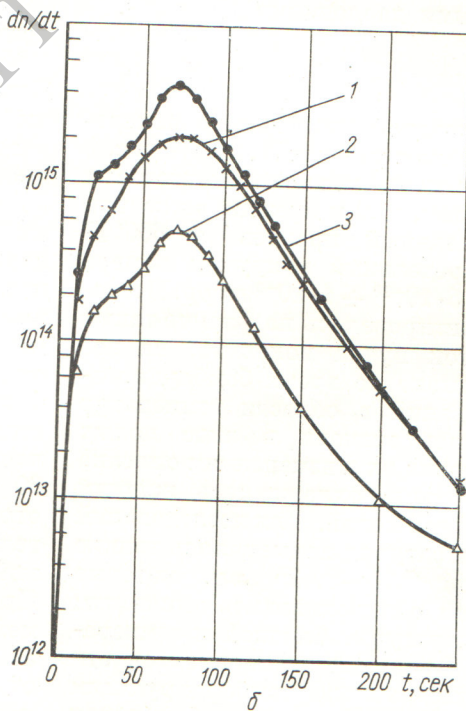
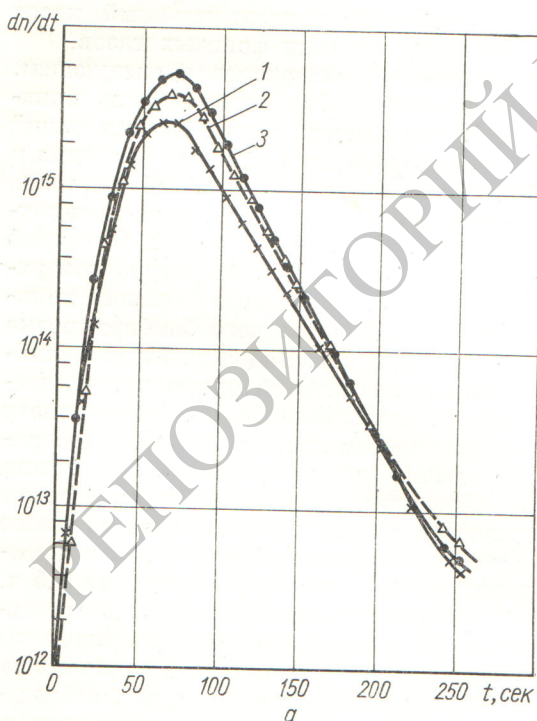


Рис. 2. Кривые зависимости скорости испарения молекулярного водорода от времени, полученные в результате испарения водорода, скопированного при бомбардировке никелевых (а) и титановых (б) мишеней, охлаждаемых жидким азотом, проточной водой и нагреваемых до температуры примерно 1000° К (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

Результаты измерений

Конденсация и последующее испарение невнедренного водорода происходили при таких концентрациях, когда η достигает минимального постоянного значения. Кривые, приведенные на рис. 2, а, соответствуют результатам испарения водорода, скопированного во время бомбардировки никелевых мишеней, охлаждаемых жидким азотом, проточной водой и нагреваемых до $T = 1000^\circ \text{ К}$. Число бомбардирующих ионов (см. рис. 2, кривая 1), столкнувшихся с мишенью, равно $7,2 \cdot 10^{17}$, число молекул H_2 , рассчитанное по этой кривой, $1,7 \cdot 10^{17}$ (или $3,4 \cdot 10^{17}$ атомов). Таким образом, доля невнедренного водорода при температуре никелевой мишени 78° К составляет 0,5 числа ионов, столкнувшихся с мишенью, т. е. величина η близка к 0,5. Такой же коэффициент внедрения получен после столкновения с мишенью $1,2 \cdot 10^{18}$ ионов. Этот результат на рис. 2 не приводится. Кривая 2 на рис. 2 соответствует данным, полученным в результате испарения водорода, скопированного при бомбардировке никелевой мишени, охлаждаемой проточной водой. Число ионов, столкнувшихся с мишенью, равно $7 \cdot 10^{17}$, число десорби-

рованных молекул H_2 , рассчитанное по этой кривой, составляет $2,5 \cdot 10^{17}$ ($5 \cdot 10^{17}$ атомов). Таким образом, доля невнедренного водорода в пересчете на атомарный водород составляет 0,7 числа ионов, столкнувшихся с мишенью, т. е. коэффициент внедрения, как и в работе [1], равен 0,3. Кривая 3 на рис. 2 получена в результате испарения водорода, сконденсированного при бомбардировке тонкой никелевой мишени (толщиной 0,025 мм). Мишень нагревалась бомбардирующими ионами примерно до $1000^\circ K$. Число ионов, столкнувшихся с мишенью, составляло $7 \cdot 10^{17}$, число молекул H_2 , рассчитанное на основании кривой 3, равно $3,3 \cdot 10^{17}$ ($6,6 \cdot 10^{17}$ атомов). Таким образом, доля невнедренного водорода равна 0,94, т. е. $\eta = 0,06$.

Подобные измерения были проведены для титана (см. рис. 2, б). Кривые соответствуют результатам, полученным при испарении водорода, сконденсированного при бомбардировке мишеней, охлаждаемых жидким азотом, проточной водой и нагреваемых пучком ионов примерно до $1000^\circ K$. В каждом из этих экспериментов число ионов, столкнувшихся с мишенью, равно $6 \cdot 10^{17}$. Числа молекул водорода, рассчитанные из кривых 1, 2, 3, равны соответственно $1,5 \cdot 10^{17}$ ($3 \cdot 10^{17}$ атомов), $2,7 \cdot 10^{16}$ ($5,4 \cdot 10^{16}$ атомов) и $2,6 \cdot 10^{17}$ ($5,2 \cdot 10^{17}$ атомов). Следовательно, величина коэффициента внедрения ионов H_1^+ с энергией 35 кэв в титан в области больших концентраций внедренного водорода равна: при низких температурах 0,5; при нормальной температуре 0,9; при высоких температурах 0,1.

Обсуждение результатов

Как известно, в твердом состоянии существует только молекулярная модификация водорода. Атомарная (металлическая) модификация неустойчива и, как показали расчеты, может существовать только при давлении около $2,4 \cdot 10^6$ ат [3]. Следовательно, если бы распыление внедренного водорода в виде атомов

действительно имело место, то атомы рекомбинировали бы в сконденсированном слое практически мгновенно. При этом коэффициент внедрения, определенный методом конденсации, был бы меньше значения η , найденного в работе [1], где соотношение между H_1 и H_2 не учитывалось. Однако проведенные исследования показали, что коэффициент внедрения ионов H_1^+ с энергией 35 кэв в области больших концентраций внедренного водорода согласуется с величиной, полученной в работе [1]. Таким образом, предположение о том, что распыление внедренного водорода в виде атомов является основным механизмом, определяющим величину η , не подтверждается.

Характерно, что кривые испарения водорода, сконденсированного при бомбардировке никеля и титана, отличаются по форме. Кривые испарения, полученные в экспериментах с титаном, «шире» и как бы состоят из двух кривых наложенных одна на другую. Так как все измерения проводились в одинаковых условиях с полной конденсацией фоновых газов водородным конденсационным насосом, кажется вероятным, что форма кривых отражает различный характер состояния водорода, сконденсированного при бомбардировке металлов. По-видимому, при взаимодействии быстрых ионов H_1^+ с никелем образуется либо параводород, либо ортоводород. При взаимодействии быстрых ионов H_1^+ с титаном образуются параводород и ортоводород, которые заметно различаются по своим свойствам [4].

Поступила в Редакцию 1/VIII 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. С. Боровик, Н. П. Катрич, Г. Т. Николаев. «Атомная энергия», 21, 339 (1966).
2. Е. С. Боровик, Н. П. Катрич, Г. Т. Николаев. «Атомная энергия», 18, 291 (1965).
3. А. А. Абрикосов. «Астрономический журнал», 31, № 2 (1954).
4. М. П. Малков и др. Выделение дейтерия из водорода методом глубокого охлаждения. М., Госатомиздат, 1961.