

Взаимодействие быстрых ионов H_1^+ с поверхностью металлов в сверхвысоком вакууме

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

УДК 532.6:533.9

Приведены результаты исследования взаимодействия быстрых ионов водорода H_1^+ с металлами (никель и нержавеющая сталь), образующими с водородом слабые химические связи, и с металлами (тантал и титан), образующими с водородом прочные химические связи. В условиях сверхвысокого вакуума методом взвешивания определен коэффициент распыления α нержавеющей стали ионами H_1^+ с энергией 35 кэВ и коэффициент внедрения η ионов H_1^+ в нержавеющую сталь ($\alpha = 9 \cdot 10^{-3}$, $\eta = 0,5$ в области значений концентрации внедренного водорода, значительно превышающих 10^{19} атом/см²). Методом изменяющегося давления исследована зависимость η от плотности внедренного водорода и температуры металлов. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности применения металлов типа титана для связывания быстрых атомов водорода в магнитных ловушках.

Столкновения быстрых частиц с поверхностями металлов сопровождаются тремя основными процессами: десорбцией абсорбированных газов, распылением металлов, внедрением быстрых частиц в металлы. В магнитных ловушках десорбция абсорбированных газов и распыление металлов приводят к загрязнению плазмы, а внедрение быстрых частиц играет положительную роль, так как в определенных условиях может снизить требования, предъявляемые к насосам.

В настоящее время известно много работ по исследованию распыления металлов, однако измерения коэффициента распыления металлов в условиях ультравысокого вакуума еще никем не проводились.

Внедрение ионов водорода H_1^+ и D_1^+ исследовалось в работах [1, 2], причем полученные результаты не согласуются между собой. Различие заключается в следующем. Коэффициент внедрения ионов D_1^+ , полученный в работе [1], равен 0,2—0,35 при энергии бомбардирующих ионов 7—25 кэВ. Для нержавеющей стали при

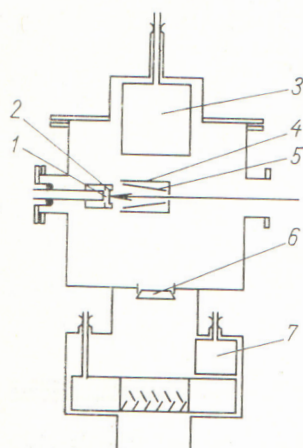
концентрации внедренного водорода $3 \cdot 10^{17}$ см⁻² наступает насыщение, определяемое авторами как равенство потоков ионов водорода на мишень и из мишени. Коэффициент внедрения ионов H_1^+ , полученный в работе [2], равен 0,9, причем при концентрации до $2 \cdot 10^{19}$ см⁻² насыщение не обнаружено.

Так как число внедренных атомов водорода, по данным работы [2], может превышать 10^{19} см⁻², возникает возможность определить коэффициент внедрения ионов водорода в металл методом взвешивания. В настоящей работе этим методом были измерены коэффициент распыления α нержавеющей стали ионами H_1^+ с энергией 35 кэВ и коэффициент внедрения η ионов H_1^+ в нержавеющую сталь, а также исследована зависимость коэффициента внедрения ионов H_1^+ в титан, тантал, никель и нержавеющую сталь от температуры бомбардируемой мишени и плотности внедренного водорода.

Определение α и η методом взвешивания

Установка, на которой проводились исследования, состоит из системы водородных и гелиевых конденсационных насосов (ВКН и ГКН соответственно), высокочастотного ионного источника и камеры измерений. Прогреваемая камера измерений собрана на медных уплотнениях. Подробное описание установки приведено в работе [2].

На рис. 1 показана схема камеры измерений. Камера обезгаживалась прогреванием примерно до 600° К в течение 3 ч. Мишень 2 из нержавеющей стали весом около 1,5 г, которую предварительно механически полировали, промывали в бензине, затем в спирте, закреплялась в держателе 1. Держатель мишени был изолирован от камеры измерений при помощи



Р и с. 1. Схема камеры измерений:

1 — держатель мишени; 2 — мишень; 3, 7 — водородные конденсационные насосы; 4 — экран; 5 — коллектор; 6 — металлический клапан.

стеклянного перехода, что позволяло измерять ток ионов непрерывно во время бомбардировки мишени. Мишень прогревалась одновременно с камерой измерений примерно до 600°K . Коллектор 5, изготовленный из алюминиевой фольги, защищался от рассеянного пучка ионов экраном 4 и прогревался за счет теплового излучения стенок камеры примерно до 500°K . Вес коллектора был равен $\sim 0,5$ г. Откачка камеры измерений во время обезгаживания осуществлялась ВКН-2. Вакуум к концу прогрева достигал $\sim 1 \cdot 10^{-7}$ торр. После прогрева в гелиевые конденсационные насосы заливали жидкий гелий, а в ВКН-1 — жидкий водород, затем камеру измерений отсоединяли от ВКН-2 при помощи прогреваемого металлического клапана 6. В результате такой подготовки вакуум в камере измерений составлял $5 \cdot 10^{-10}$ торр.

Пучок ионов H_1^+ с энергией 35 кэВ регистрировался электрическим способом с применением запирающего потенциала, подаваемого на коллектор 5. Ток пучка ионов обычно равнялся 100—150 мкА. Распыляемый металл мишени собирался коллектором.

Мишень и коллектор взвешивались на микроаналитических весах. Опыты показали, что в результате первого прогрева в вакууме $1 \cdot 10^{-7}$ торр до температуры 600°K вес свежеприготовленной мишени уменьшался незначительно. Вес коллектора уменьшался в большей степени, по-видимому, вследствие большей площади поверхности. При дальнейшем прогреве вес мишени и коллектора оставался постоянным в пределах ошиб-

ки взвешивания: для мишени $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ г, для коллектора $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ г. Влияния влажности атмосферы в пределах ошибки взвешивания не замечено, вес мишени и коллектора оставался практически постоянным в промежутке времени, во много раз превышающем время, необходимое для многократного взвешивания.

Значения α и η рассчитывались по формулам

$$\alpha = \frac{\Delta p_K}{9,3 \cdot 10^{-23} \frac{i}{q} t}; \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\Delta p_K + \Delta p_M}{1,67 \cdot 10^{-24} \frac{i}{q} t}; \quad (2)$$

где Δp_K — изменение веса коллектора, г; Δp_M — изменение веса мишени, г; i — ток пучка ионов, а; q — заряд электрона, κ ; t — время бомбардировки мишени, сек; $9,3 \cdot 10^{-23}$ — вес атома железа, г; $1,67 \cdot 10^{-24}$ — вес атома водорода, г.

Результаты измерения α и η приведены в таблице.

Как видно из таблицы, суммарное изменение веса на порядок превышает погрешность измерения. Полученный взвешиванием коэффициент распыления нержавеющей стали ионами H_1^+ с энергией 35 кэВ равен $9 \cdot 10^{-3}$, а η составляет 0,5, что существенно меньше значения коэффициента внедрения, определенного в работе [2].

При расчете α и η абсорбция фоновых газов распыленным металлом и десорбция газов из мишени, вызванная ионной бомбардировкой, не учитывались. Что касается абсорбции фоновых газов распыленным металлом, то при давлениях фоновых газов $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ торр она вряд ли существенна. Для определения количества газа, десорбированного из мишени во время ее бомбардировки, были проведены дополнительные опыты. Методика опытов заключалась в следующем. Газ, десорбированный из мишени ионами H_1^+ , адсорбировался на поверх-

Значение коэффициентов η и α

N_0	Δp_M	Δp_K	N_1	η	α
$3,8 \cdot 10^{19}$	$+2 \cdot 10^{-6}$	$+3 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{19}$	0,49	$9 \cdot 10^{-3}$
$2,1 \cdot 10^{19}$	$+2 \cdot 10^{-6}$	$+1,6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{19}$	0,48	$8,5 \cdot 10^{-3}$
$3,4 \cdot 10^{19}$	$+1 \cdot 10^{-6}$	$+2,7 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{19}$	0,5	$9 \cdot 10^{-3}$

Пр и м е ч а н и е. N_0 — число ионов, столкнувшихся с мишенью; N_1 — число ионов, внедрившихся в мишень.

ности ВКН. Так как его скорость откачки для фоновых газов в 100 раз больше скорости откачки гелиевым конденсационным насосом через отверстие в камере мишени, то можно считать, что практически все фоновые газы откачиваются ВКН. По истечении определенного времени бомбардировки мишени жидкий водород выливался из водородного конденсационного насоса \mathcal{Z} и одновременно прекращалась бомбардировка мишени. Так как каждый газ имеет свою температуру десорбции, то при нагревании ВКН-1 вакуум в камере мишени изменялся в зависимости от рода и количества десорбированного газа. Полное количество тяжелых газов, десорбированных из мишени, оказалось равным $1-1,5 \text{ см}^3 \cdot \text{торр}$, что не может существенно изменить величину η .

Таким образом, результаты взвешивания показали, что коэффициент распыления нержавеющей стали ионами H_1^+ с энергией 35 кэВ равен $9 \cdot 10^{-3}$, коэффициент внедрения ионов H_1^+ составляет 0,5. Эта величина хотя и достаточно высокая, однако она существенно ниже значения, полученного ранее методом изменяющегося давления [2]. Плотность внедренного в нержавеющую сталь водорода (по методу взвешивания) значительно превышает $10^{19} \text{ атом/см}^2$, что хорошо согласуется с данными, полученными методом изменяющегося давления.

Попытки согласовать данные о величине η , полученные методом взвешивания, с данными работы [2] за счет учета десорбции газов из мишени во время ее бомбардировки не привели к успеху. В последующих исследованиях, результаты которых будут изложены в следующей работе, было выяснено, что водород в камере мишени находится преимущественно в молекулярном состоянии, а не в атомарном, как предполагалось в работе [2]. Учет этого обстоятельства изменяет расчетную формулу, увеличивая в два раза расчетное количество внедренного водорода, и соответственно приводит к значению η , равному $\sim 0,8$. Ясно, что для согласования результатов этого недостаточно. В связи с этим было высказано предположение, что при калибровке ионизационного манометра типа Байярда — Альперта, изготовленного на основе ионизационного манометра ЛМ-2, была допущена ошибка. Исследование этой возможности рассматривается ниже.

Измерение η методом изменяющегося давления

Как указывалось выше, при измерении величины η методом изменяющегося давления была

допущена ошибка в расчете, связанная с тем, что водород, выделяющийся из мишени во время ее бомбардировки, находится в молекулярном состоянии, а не в атомарном, как предполагалось в работе [2]. В соответствии с этим расчетная формула для коэффициента внедрения будет иметь вид

$$\eta = 1 - \frac{2n(p-p_0)w}{760i/q}, \quad (3)$$

где n — число молекул H_2 в 1 дм^3 при нормальных условиях; p_0 — начальное давление, *торр*; p — рабочее давление, *торр*; w — скорость откачки водорода из камеры, $\text{дм}^3/\text{сек}$; i — ток пучка ионов H_1^+ , *а*; q — заряд электрона, *к*; 760 — атмосферное давление, *торр*. Коэффициент 2 учитывает выделение H_2 из мишени.

Для выяснения возможной ошибки в определении давлений p_0 и p был измерен коэффициент внедрения с использованием стандартного ионизационного манометра ИМ-12Ф, предназначенного специально для измерения давления в прогретаемых системах. Так как чувствительность ионизационных манометров по водороду в два раза хуже, чем по азоту [4], показания ионизационного манометра ИМ-12Ф соответственно пересчитывались. Оказалось, что при больших концентрациях внедренного водорода ($> 10^{19} \text{ атом/см}^2$) величина η , рассчитанная по формуле (3), соответствует значению коэффициента внедрения, определенному взвешиванием, т. е. 0,5, а не 0,9. Зависимость η от концентрации внедренного водорода показана на рис. 2 (кривая 2). Кроме того, были проведены опыты по проверке характеристики ионизационного манометра, применявшегося в работе [2]. Этот манометр был изготовлен на основе стандартного ионизационного манометра ЛМ-2, предназначенного для измерения давления в области $10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-8} \text{ торр}$. Его первоначально определенная чувствительность бы-

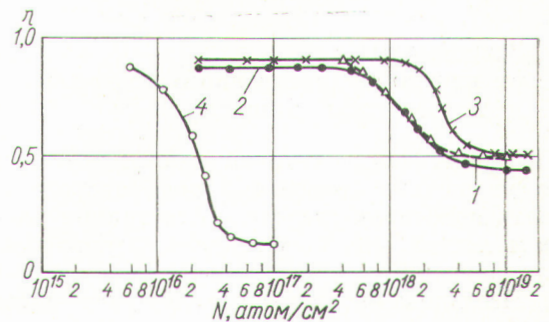


Рис. 2. Зависимость η от плотности внедренного водорода для нержавеющей стали.

ла в два раза хуже чувствительности ЛМ-2, а линейная область характеристики, пересчитанная в соответствии с чувствительностью и уменьшением фототока на коллектор, составляла $5 \cdot 10^{-10}$ торр. При сравнении характеристики этого манометра с характеристиками стандартных ионизационных манометров ИМ-12Ф и ЛМ-2 было выяснено, что его чувствительность в три раза хуже чувствительности, определенной ранее, а линейная область характеристики находится в более узком пределе измеряемых давлений.

Результаты работы [2], пересчитанные с учетом поправки на чувствительность и нелинейность характеристики ионизационного манометра в области высокого вакуума, показаны на рис. 2 (кривая 1). Видно, что пересчитанные результаты достаточно хорошо совпадают с результатами, полученными с применением ИМ-12Ф (см. кривую 2). Так как с уменьшением величины η увеличивается количество внедренного водорода, величина поправки на откачку водорода водородным конденсационным насосом в области концентраций внедренного водорода $> 4 \cdot 10^{17}$ см⁻² существенно уменьшается. Этим, а также нелинейностью характеристики ионизационного манометра в области высокого вакуума объясняется непропорциональное снижение кривой зависимости η от N (см⁻²) после ее пересчета в области малых и больших концентраций внедренного водорода.

В дальнейшем оказалось возможным практически полностью исключить необходимость учета скорости откачки водорода водородным конденсационным насосом. Процедура измерений при этом сводилась к следующему. Непосредственно перед началом измерений пучок ионов H_1^+ дефокусировался и за счет рассеянного в камере водорода насыщался водородный конденсационный насос, качающая площадь поверхности которого была значительно сокращена.

Зависимость η от плотности внедренного водорода и температуры мишени

Знание температурной зависимости захвата и удержание быстрых ионов водорода может дать некоторые сведения о состоянии водорода в металлах, что представляет интерес для ряда приложений.

Исследования зависимости η от плотности внедренного водорода и температуры мишени проводились методом изменяющегося давления,

для расчетов использовалась формула (3). Давление измерялось манометром ИМ-12Ф, предназначенным для измерения вакуума в прогреваемых системах. Манометр помещался внутри камеры мишени. Перед измерениями, как и прежде, камера и мишень прогревались в течение 3 ч до температуры $\sim 600^\circ$ К. Пучок ионов водорода H_1^+ с энергией 35 кэВ регистрировался электрическим способом с применением запирающего потенциала, подаваемого на ВКН, окружающий мишень. Площадь поверхности мишени, бомбардируемой ионами, определялась визуально по следам эрозии поверхности мишени. Следы эрозии хорошо видны на всех исследованных металлах в интервале температур примерно от 300° К и ниже. При температуре мишени выше 300° К следы эрозии незаметны. В связи с этим при температуре выше 300° К площадь бомбардируемой поверхности принималась равной площади, измеренной в том же режиме работы ионного источника и фокусирующего устройства при бомбардировке мишени, охлажденной до низкой температуры.

Для изучения взаимодействия ионов водорода с металлами были выбраны два типа металлов: химически слабо связывающие водород (никель и нержавеющая сталь) и образующие с водородом прочные химические связи (титан и тантал). Внедрение ионов водорода в нержавеющую сталь при нормальных и низких температурах исследовалось на мишенях, представляющих собою полую коробочку, сваренную аргоно-дуговой сваркой. Толщина стенок мишени 1 мм. Мишень изолировалась от камеры стеклянными переходами, так что ток пучка ионов регистрировался непрерывно. Во время эксперимента обратная сторона мишени охлаждалась проточной водой или жидким азотом, продуваемым через полость коробочки. Мишень механически полировалась, промывалась в бензине и спирте. Электролитическая полировка мишеней, проводимая после механической полировки с последующей промывкой в дистиллированной воде, на результатах измерений практически не отражалась.

Приведенная на рис. 2 кривая 2 получена для мишени из нержавеющей стали, охлаждаемой проточной водой до температуры 300° К, кривая 3 получена для мишени, охлаждаемой жидким азотом до температуры 78° К. Кроме того, были проведены измерения η при охлаждении мишени жидким водородом, в связи с этим конструкция мишени была несколько изменена. Результаты измерений в области температур $24-78^\circ$ К практически одинаковы.

Как видно из кривых, результаты, полученные при нормальной температуре мишени, отличаются от результатов, полученных при низких температурах, как величиной η , так и плотностью внедренного водорода, при которой начинается снижение η .

Исследования при высокой температуре проводились на тонких мишенях (0,1—0,02 мм), тщательно обезгаженных омическим нагревом при температурах, близких к температуре плавления. Температура мишени рассчитывалась по формуле для теплового излучения. Обезгаживание при этих температурах прекращалось, когда выделение газа из мишени становилось незначительным. После этого температура мишени снижалась примерно до 1100—1200° К, в ВКН-1 заливался жидкий водород и начиналось обезгаживание мишени ионной бомбардировкой. Необходимость этого диктовалась тем, что, несмотря на многочасовую непрерывную процедуру обезгаживания нагревом при температурах, близких к температуре плавления, не удавалось полностью обезгазить ни один из исследованных металлов. Об этом свидетельствует то, что в результате бомбардировки мишени, проводимой после обезгаживания нагревом, наблюдается снижение коэффициента газоотдачи с ростом числа ионов, столкнувшихся с мишенью. Коэффициент газоотдачи достигает постоянного значения, после того как плотность ионов, столкнувшихся с мишенью, превысит $(1 \div 5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Анализ газов, десорбируемых ионной бомбардировкой, при этих температурах не проводился. Однако на основании того, что они регистрируются ионизационным манометром, несмотря на окружающий мишень водородный конденсационный насос, можно предположить, что это — газы, плохо конденсирующиеся или совсем не конденсирующиеся при 20,4° К. Скорее всего, это водород. Обращает на себя внимание то, что полное количество газов, выделяющихся из нержавеющей стали и никеля в результате такой процедуры, больше указанного в работе [4]. После обезгаживания ионной бомбардировкой проводилось повторное кратковременное обезгаживание при температуре, близкой к температуре плавления. После такой подготовки мишени измерялась зависимость η от плотности внедренного водорода. Результаты для нержавеющей стали при температуре мишени около 1100° К показаны на рис. 2 (кривая 4). Измерения при более высоких температурах встречаются некоторые, пока еще не устраненные трудности.

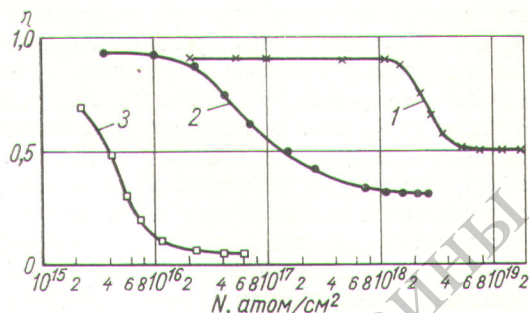


Рис. 3. Зависимость η от плотности внедренного водорода для никеля.

На рис. 3 приведены результаты измерений для никеля. Кривые 1, 2 получены на мишенях, охлажденных жидким азотом (до температуры 78° К) и проточной водой (до 300° К) соответственно. Видно, что при нормальной температуре мишени из никеля кривая лежит значительно ниже соответствующей кривой для нержавеющей стали (см. рис. 2). При низких температурах кривые для никеля и нержавеющей стали практически одинаковы. Кривая 3 на рис. 3 получена на тонкой мишени (0,025 мм) при температуре около 1100° К.

Измерения зависимости η от плотности внедренного водорода в титане при нормальных и низких температурах проводились, как и для нержавеющей стали, на мишенях в виде коробки специальной конструкции, охлаждаемой проточной водой или жидким азотом. Кроме того, были проведены измерения на мишени, охлаждаемой посредством механического контакта с ВКН. В данном случае температура мишени по оценке была близка к 200° К. Кривая 2 на рис. 4 получена при охлаждении титановой мишени жидким азотом до $t = 78^\circ \text{ К}$. Кривая при 200° К практически не отличается от этой кривой, поэтому она на рисунке не приводится. Следует отметить,

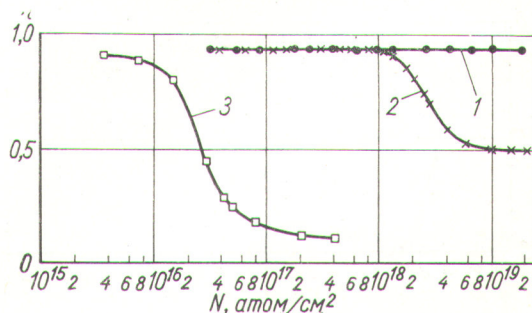


Рис. 4. Зависимость η от плотности внедренного водорода для титана.

что снижение коэффициента внедрения ионов H_1^+ в титане начинается при несколько меньших концентрациях внедренного водорода по сравнению с нержавеющей сталью или никелем. Кривая 1 на рис. 4 получена при охлаждении мишени проточной водой до $t = 300^\circ K$. Интересно, что в исследованной области концентраций внедренного водорода величина η не изменяется. Такие же результаты получены при температуре мишени около $400^\circ K$. С дальнейшим ростом температуры наблюдается снижение величины η . Кривая 3 получена на тонкой мишени (0,025 мм), нагретой примерно до $1100^\circ K$.

На рис. 5 приведены результаты измерений для тантала. Кривая 1 получена при температуре $\sim 400^\circ K$. Кривая 2 получена при температуре около $1200^\circ K$ на тонкой мишени толщиной 0,025 мм. Измерения при низких температурах не проводились.

Из рис. 2—4 следует, что при низких температурах кривые для всех исследованных металлов практически одинаковы. Различие между металлами, образующими с водородом слабые и прочные химические связи, заключается в том, что при низких температурах для металлов, прочно химически связывающих водород, величина η снижается при несколько меньших концентрациях внедренного водорода. Вероятно, это связано с наличием в этих металлах большего количества растворенных газов. При нормальных температурах снижение η для титана и тантала в исследованной области концентраций не наблюдается, тогда как для металлов, слабо связывающих водород, при концентрациях внедренного водорода около $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ значение η для нержавеющей стали уменьшается в два раза, для никеля — в три раза. При высоких температурах и малых концентрациях внедренного водорода величина η резко снижается (до 0—0,15) для

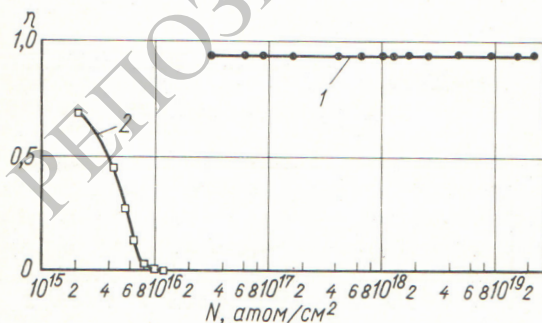


Рис. 5. Зависимость η от плотности внедренного водорода для тантала.

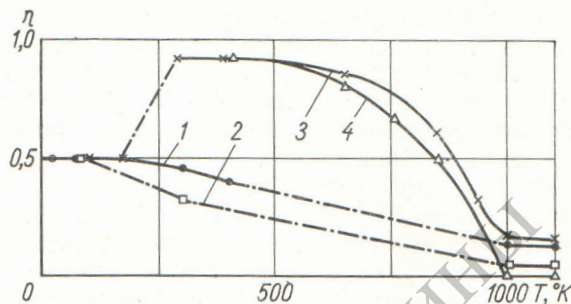


Рис. 6. Зависимость η от температуры металла.

всех исследованных металлов. Как видно из рисунков, полное насыщение мишени водородом при высоких температурах получено только для тантала. Из кривых следует, что зависимость коэффициента внедрения от температуры для разных концентраций внедренного водорода различна. В связи с этим на рис. 6 приведены кривые 1, 2, 3, 4 зависимости η от T ($^\circ K$) для нержавеющей стали, никеля, титана и тантала соответственно в области больших концентраций внедренного водорода после снижения величины η . Штрих-пунктирные линии показывают область неисследованных температур. Следует отметить, что исследования титана и тантала в области $400 < T < 1000^\circ K$ проводились на тщательно обезгаженных тонких мишенях ($\sim 0,025 \text{ мм}$) без омического нагрева мишени в процессе измерений. Мишень нагревалась только за счет тепла, подводимого бомбардирующими ионами. Процедура подготовки мишени к измерениям описана выше, ее температура рассчитывалась по формуле для теплового излучения.

Обсуждение результатов

Исследования взаимодействия ионов H_1^+ с металлами показали, что коэффициент внедрения существенно зависит от плотности внедренного водорода, температуры и рода металла. Наибольшее значение η имеют металлы, образующие с водородом прочные химические связи. Хотя предельная газоемкость по внедренному водороду не получена ни для одного из исследованных металлов (за исключением высоких температур), экспериментальные данные о величине η показали, что металлы, образующие с водородом прочные химические связи, обладают и наибольшей газоемкостью по внедренному водороду. Необычайно высокая концентрация внедренного водорода ($\sim 2 \cdot 10^{19} \text{ атом/см}^2$), естественно, не может быть объяснена на основа-

нии представления о механизме внедрения как о простом накоплении внедренных атомов в слое металла толщиной, равной длине пробега быстрых частиц. Как известно [3], длина пробега протонов с энергией 35 кэв в металлах составляет $\sim 10^{-5}$ см. Нетрудно рассчитать, что при концентрациях внедренного водорода 10^{19} атом/см² его объемная концентрация составила бы 10^{24} атом/см³, т. е. в 10 раз превысила бы концентрацию атомов металла. Ясно, что такая концентрация невозможна даже для металлов, образующих с водородом прочные химические связи [4]. При температурах $> 300^\circ$ К это явление можно объяснить обычной диффузией внедренного водорода в глубь металла. Действительно, если предположить, что в процессе бомбардировки в металле на глубине, равной длине пробега ионов H_1^+ , в слое $dx = 10^{-6}$ см создается концентрация внедренного водорода $\sim 10^{15}$ атом/см² (что, по-видимому, приемлемо), то поток водорода через плоскость на расстоянии $d = 10^{-3}$ см от слоя dx можно определить по формуле

$$q = DC \frac{1}{d}, \quad (4)$$

где D — коэффициент диффузии атомов водорода; C — концентрация атомов водорода. При концентрации $\sim 10^{15}$ атом/см² объемная концентрация будет равна $\sim 10^{21}$ атом/см³. Коэффициент диффузии для нержавеющей стали можно принять равным 10^{-9} см²/сек [5], тогда $q = 10^{15}$ атом/сек, что примерно равно потоку ионов на мишень.

Если в области температур выше 300° К полученные результаты можно объяснить обычной диффузией внедренного водорода в глубь металла, то при низких температурах такое объяснение неприемлемо. По современным представлениям о диффузии газов в металлах имеет место экспоненциальная зависимость коэффициента диффузии от температуры $D \sim e^{-E/RT}$, и, следовательно, при низких температурах диффузия газов в металлах практически должна быть ничтожно малой. В связи с этим ожидалось, что при внедрении ионов H_1^+ в металлы

в области низких температур за сравнительно короткое время облучения в поверхностном слое будет получена такая концентрация внедренного водорода, при которой коэффициент внедрения будет равен нулю. При высоких температурах коэффициент внедрения при некоторых концентрациях также должен быть равен нулю, однако уже из-за большой скорости диффузии водорода. При высоких температурах ожидаемые результаты действительно были получены. При низких температурах данные экспериментов противоречат обычным представлениям о диффузии водорода в металлах. Причина этого расхождения пока не ясна. Для выяснения физико-химической природы захвата и удержания ионов водорода в металлах была исследована зависимость скорости десорбции внедренного водорода от времени. Результаты этих исследований будут изложены в следующей работе.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Наибольшим коэффициентом внедрения и наибольшей газоемкостью обладают металлы, образующие с водородом прочные химические связи. Эти металлы целесообразно применять для связывания быстрых частиц в магнитных ловушках.

2. Для всех исследованных металлов число отраженных атомов, вероятно, не превышает несколько процентов, на что указывает величина η при малых концентрациях внедренного водорода.

Поступила в Редакцию 1/V 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Симонов. Ядерный синтез. Ч. 1. Вена, МАГАТЭ, 1962, стр. 325.
2. Е. С. Боровик, Н. П. Катрич, Г. Т. Николаев. «Атомная энергия», 18, 91 (1965).
3. Э. Сегре. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
4. С. Дешман. Научные основы вакуумной техники. М., «Мир», 1964.
5. Р. Бэррер. Диффузия в твердых телах. М., Изд-во иностр. лит., 1948.

Методика расчета интенсивности обратно рассеянного γ -излучения

Б. П. БУЛАТОВ

УДК 539.122:539.121.72:621.039.58

Приводятся формулы и графики, позволяющие рассчитывать плотность потока энергии обратно рассеянного γ -излучения некоторых, широко исполь-

зующихся в практике изотопов (Co^{60} , Cs^{137} , Au^{198} , Sr^{90}) для нескольких типичных случаев, например: узкого и широкого пучков γ -квантов, падающих под