ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2010, том 48, № 4, с. 1–4

РУБРИКА
РУБРИКА

УДК 541.12.01.34

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ДЕЙТРОНОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ПАЛЛАДИЯ, НАСЫЩЕННОГО ДЕЙТЕРИЕМ

© 2010 г. И. П. Чернов, В. В. Ларионов, А. Г. Липсон, Ю. И. Тюрин

Томский политехнический университет

Поступила в редакцию 26.08.2009 г.

Рассмотрен способ получения дейтронов высоких энергий (до 4 эВ и выше) в процессе десорбции тяжелого водорода из гетероструктуры палладия Pd : PdO_y при ее облучении электронами. При этом десорбция дейтерия под внешним воздействием сопровождается реакцией DD-синтеза. Показано, что поглощение энергии внешнего воздействия, а также реакция синтеза зависят не только от микрофизических параметров элементов системы, но и от ее структуры, что может быть определяющим при оценке процессов, сопровождающих десорбцию дейтерия. Обсуждается механизм увеличения энергии дейтронов. Увеличение энергии обеспечивается рассеянием возмущения в виде плазмонов и осцилляций электронной плотности, распространяющихся по всей среде при внешнем воздействии.

PACS:

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] установлено, что при поглощении энергии водородной подсистемой палладиевой мишени, насыщенной изотопами водорода, атомы водорода интенсивно перемещаются по объему мишени и выходят за его пределы. Очень важно, что выход водорода по всему объему наблюдается даже тогда, когда энергетическое воздействие осуществляется локально тонким электронным лучом. Это означает, что взаимодействие внешнего излучения с водородной подсистемой носит коллективный характер, т.е. электронная подсистема палладия [3], обогащенного водородом, приобретает способность поглощать энергию внешнего воздействия и сохранять ее в течение более длительного времени, чем в чистом металле. Также выявлено, что, если поверхность палладия покрыта пленкой окиси, которая легко пропускает электромагнитное излучение, но задерживает десорбцию водорода (дейтерия), выходящие из мишени атомы дейтерия приобретают энергию до 4 эВ, что на два порядка выше средней энергии дейтронов при $T = 300$ K. Это может быть объяснено тем, что электроны, входя в палладий, насыщенный дейтерием, возбуждают (генерируют) плазменные колебания (плазмоны) в кристаллической решетке, локализованные преимущественно в окрестности атомов водорода. Процесс осцилляции электронной плотности вызывает появление сильных электрических полей ($E = 10^8$ В/см) как в объеме, так и на поверхности гидрида в масштабах, соизмеримых с параметром решетки 0.3–0.4 нм. Такое ускорение в решетке, наряду с высоким значением электронного потенциала экранирования в металлах из-за высокой подвижности дейтерия, в свою очередь приводит к осуществлению DD-реакции при малой энергии возбуждения дейтерида, что подтверждено регистрацией протонов с энергией до 3 МэВ [1].

Задача заключается в создании оптимальных конструкций мишени, выяснении условий внешнего воздействия на мишень, уточнении механизма обнаруженных эффектов, увеличения выхода реакции синтеза и управления этим процессом, что и является целью настоящей работы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОНЯТИЯ

Плазменные колебания электронного газа твердых тел активно изучаются с середины прошлого века. Плазмонами называют кванты этих плазменных колебаний или, точнее, кванты связанного с ними электромагнитного поля. К настоящему времени установлено, что они ответственны за многие наблюдаемые эффекты, широко используемые на практике. В качестве примеров можно привести гигантское комбинационное рассеяние света [4], микроскоп на поверхностных плазмонах и т.д. В работе [5] предложена модель возбуждения атомов, движущихся вблизи металла, поверхностными плазмонами. В этом случае осциллирующие дипольный и мультипольные моменты атомов дейтерия сильно связаны с коллективными поверхностными осцилляциями (КПО) электронов твердого тела [6].

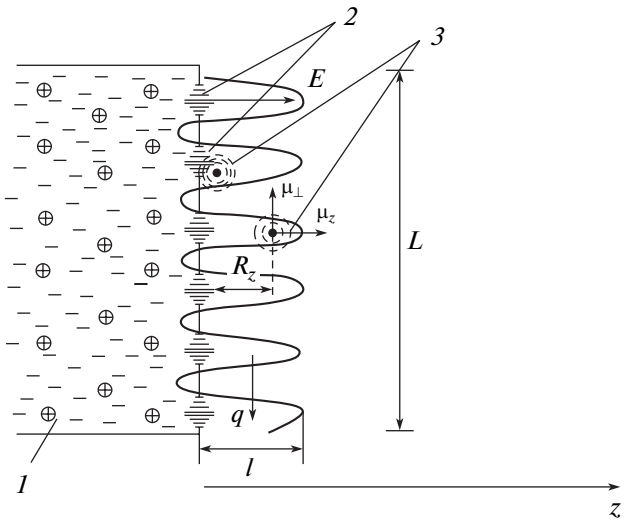

Рис. 1. Упрощенная схема взаимодействия атомных частиц с электромагнитной волной, связанной с КПО электронов металла: *1* – металл; *2* – КПО электронов; *3* – десорбируемые атомы с дипольными моментами $\mu_\perp$, μ_z; **E** и **q** – электрический и волновой векторы электромагнитной волны, связанной с КПО электронов; R_z – расстояние атома от поверхности; L и l – размеры полости, занимаемой электромагнитной волной.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Поверхностные плазмоны образуются при отражении электронов с энергиями 0.5–30 кэВ от поверхностей и прохождении ими пленок. Если вероятность поглощения плазмонов велика, то задача заключается в технической реализации условий, обеспечивающих создание наибольшей концентрации плазмонов и увеличение вероятности их рассеяния и поглощения в объеме. Вероятность перехода объемных плазмонов в поверхностные определяется состоянием совместной электронной системы палладий–дейтерий, которая зависит от вероятности возбуждения. Именно возбуждения электронной системы обеспечивают передачу и поглощение энергии первичного пучка электронов колебательным степеням свободы внутренней D-содержащей структуре кристалла. Атомарный дейтерий имеет в металлах исключительно высокую подвижность, примерно на 10–15 порядков выше, чем подвижность тяжелых примесей при тех же температурах. В условиях внешнего облучения находящаяся в твердом теле водородная компонента переходит в неравновесное колебательное состояние. Это связано с тем, что локальные частоты D-содержащих связей лежат вне фононного спектра кристаллов и в процессе релаксации эта компонента вынуждена генерировать три–пять фононов либо передать энергию по механизму диполь (квадруполь)–заряд электронной подсистеме твердого тела. Скорость таких процессов велика и до релаксации возбуждения D-содержащая связь способна совершить 10^5–10^6 колебаний. Неравновесное состояние внутренней водородной компоненты создает благоприятные условия для колебательно-поступательного обмена (V–T-обмена), неравновесного перераспределения и выхода дейтерида из металла при облучении. В этом случае смещение дейтерия из мест локализации становится термически неравновесным и стимулируется не энергией тепловых колебаний kT в фононной подсистеме кристаллов, а энергией долгоживущих неравновесных колебательных возбуждений $\hbar\omega$ в водородной подсистеме кристалла. Кроме того, в отличие от электронной, водородная подсистема способна сохранять подведенную энергию в течение времени, достаточного для реализации процессов ускоренной диффузии. Время 10^{-10}–10^{-11} с, на которое водородная подсистема способна запасать подводимую энергию, значительно превышает время однофононной и электронной релаксации в металлах 10^{-13}–10^{-14} с. В совокупности эти эффекты и приводят к образованию дейтронов высоких энергий.

Вероятность возбуждения атома, пересекающего поле поверхностного плазмона за время взаимодействия τ, можно рассчитать по формуле [5]

$$P_\partial = \frac{\pi E_0 \omega_p^4 (|\boldsymbol{\mu}_\perp \mathbf{q}|^2 + \mu_z^2) l}{2\hbar^2 \omega_0^2 \Delta\omega (\omega_p^2 + 2\omega_0^2) v \cos\alpha} \times$$
$$\times [1 - \exp(-2ql)]\Omega_0.$$

Здесь E_0 – амплитуда электрического поля электромагнитной волны, связанной с коллективными осцилляциями (КПО) электронов палладия (благодаря связи атомов дейтерия с КПО дейтерий поглощает плазмон); ω_0 – частота поля поверхностного плазмона или электромагнитной волны, связанной с поверхностными плазмонами; ω_p – частота максимума распределения электронов; $\boldsymbol{\mu}_\perp$ и $\boldsymbol{\mu}_z$ – дипольные моменты атома (перпендикулярно и параллельно поверхности металла); l – размер полости, занимаемой электромагнитной волной; **q** – волновой вектор; v – скорость движения атома дейтерия от поверхности палладия (рис. 1).

Среднее число плазмонов, взаимодействующих с атомом дейтерия, равно $\bar{n} \cong \frac{AE_0^2}{2\hbar\omega_0}\Omega_0$, где A – размер полости, содержащей поверхностные плазмоны $A = L^2 l$, Ω_0 – диэлектрическая проницаемость в гидродинамическом приближении электронного газа. Расчеты дают значение величины P_∂, близкое к единице.

Вследствие коллективного характера возбуждения и его распространения по всему объему происходит объемное возбуждение осцилляций плотности электронов дейтерида палладия. По-

вышение концентрации дейтронов как центров поглощения и рассеяния энергии плазмонов сопровождается увеличением энергии дейтронов, которое может быть вызвано двумя причинами: 1) увеличением количества рассеивающих (поглощающих) центров; 2) возрастанием интенсивности многократного рассеяния излучения в теле палладия, покрытого пленкой окисла. Оба механизма являются сонаправленными, т.е. их действие приводит к росту энергии дейтронов. При увеличении концентрации атомов дейтерия, поглощающих энергию внешнего воздействия, относительное поглощение возрастает. Это вызвано тем, что до некоторого значения концентрации все добавляемые атомы поглощают, при этом наблюдается зависимость интегрального выхода энергии от интенсивности падающего излучения. При концентрации больше некоторой пороговой часть атомов не принимает участия в процессах поглощения и переизлучения. Одновременно с повышением концентрации происходит увеличение коэффициента рассеяния вследствие образования непоглощающих частиц. В свою очередь, это вызывает уменьшение поглощения плазмонов, что и соответствует относительному уменьшению поглощения в среде. Таким образом, следует учитывать: 1) этап образования плазмонов, 2) условия рассеяния и поглощения плазмонов.

Для характеристики способности системы поглощать электромагнитное излучение рассчитана мнимая часть диэлектрической функции $\varepsilon(\omega)$ для систем PdH_x, а также для чистого палладия (рис. 2). Значения диэлектрической функции $\varepsilon(\omega)$ соединений PdH_x больше, чем у чистого палладия, в диапазоне энергий от 1 до 15 эВ. Таким образом, электронные системы палладия, обогащенные водородом, приобретают новые свойства, а именно, увеличивается способность поглощать энергию внешнего электромагнитного воздействия и сохранять ее в течение более длительного времени, чем в чистом металле. Существенно изменяется характер поведения соединений PdH_x в поле ионизирующего излучения. Эти два фактора способствуют неравновесной миграции атомов водорода и накоплению ими энергии. Аналогичная ситуация имеет место и для PdD_x.

Если задержать выход дейтерия из металла, уменьшив (исключив) диссипацию накопленной энергии, то возникает вероятность увеличения этой энергии настолько, что ее становится достаточно для осуществления реакции DD-синтеза. Этот механизм, связанный с наличием возбужденной водородной подсистемы, не является единственным. Другой причиной ускоренного или медленного выхода водорода является уменьшение или увеличение поверхностного потенциального барьера. Такой барьер препятствует выходу дейтронов (протонов) из объема металла. Для проверки данного механизма выполнены эксперименты по стимуляции (задержке) выхода дейтерия (водорода) из металлов при уменьшении (увеличении) поверхностного потенциального барьера. С этой целью палладий, насыщенный дейтерием и водородом, приводился в механический контакт с ненасыщенным и отожженным в сверхвысоком вакууме (до прекращения газовыделения) вторым образцом палладия. Через эти образцы пропускали постоянный электрический ток плотностью 5 А/см^2. Первоначально было обнаружено, что при положительной полярности на насыщенном дейтерием и водородом образце и отрицательной на ненасыщенном наблюдается более интенсивный (на порядок) переход дейтерия и водорода в ненасыщенный палладий, чем при обратной полярности. Найдено, что скорость перехода определяется не столько направлением и величиной протекающего тока через контакт насыщенного и ненасыщенного палладия, сколько величиной и знаком поверхностного потенциального барьера и может происходить вообще без протекания тока через контактирующие металлы. Если поверхность ненасыщенного дейтерием и водородом палладия окислена, то переход дейтерия и водорода в ненасыщенный палладий не наблюдается как в отсутствие тока, так и при прохождении тока любой направленности через контакт PdD–Pd. Но если восстановить поверхность насыщенного Pd, то наблюдается эффективный переход дейтерия и водорода в ненасыщенный образец. Полученные данные свидетельствуют о большой роли слоя окисла палладия в накоплении энергии атомами дейтерия.

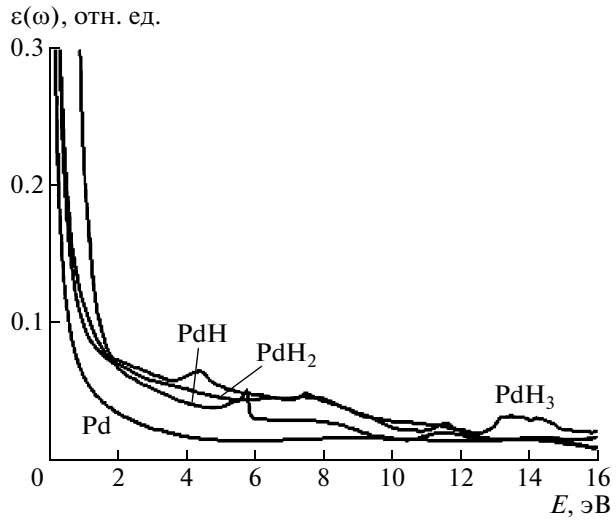

Рис. 2. Энергетическая зависимость диэлектрической функции $\varepsilon(\omega)$ для палладия и соединений PdH_x

В таблице приведены данные экспериментального исследования выхода дейтронов в зависимости от параметров мишени. Методика и техника

Влияние параметров мишени на энергию дейтронов

Площадь мишени, мм^2	200	50	300	100	300	300
Энергия электронов, кэВ	50	6	30	50	30	30
Толщина слоя PdO_y, мкм	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03
Толщина слоя палладия, мкм	50	100	100	150	100	150
Средняя энергия дейтронов, эВ	0.20	0.26	0.26	0.40	3.6	4.2

эксперимента аналогичны тем, что описаны в работе [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, поглощение энергии внешнего воздействия, а также энергия дейтронов при их десорбции из палладия, обогащенного водородом, зависит от микрофизических параметров элементов системы, ее размеров и структуры, что является определяющим при реализации процессов, сопровождающих десорбцию дейтерия. Увеличение энергии обеспечивается многократным рассеянием возмущения в виде плазмонов и осцилляций электронной плотности, распространяющихся по всей среде при внешнем воздействии электронами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Липсон А.Г., Чернов И.П., Русецкий А.С. и др.* Десорбция “горячих” атомов дейтерия из гетероструктуры Pd/PdO : D_x при возбуждении ее водородной подсистемы // Докл. РАН. 2009. Т. 425. № 5. С. 1.
2. *Tyurin Yu.I., Chernov I.P.* Non-Equilibrium Release of Atomic Hydrogen from Metal under Irradiation // Int. J. Hydrogen Energy. 2002. V. 27. P. 829.
3. *Чернов И.П., Коротеев В.М., Гимранова О.М., Тюрин Ю.И.* Роль водорода в процессах поглощения энергии ионизирующего излучения системой металл–водород // Поверхность. 2007. № 4. С. 16.
4. *Емельянов В.И., Коротеев Н.И.* Эффект гигантского комбинационного рассеяния света молекулами, адсорбированными на поверхности металла // УФН. 1981. Т. 135. Вып. 2. С. 345.
5. *Никитенков Н.Н., Тюрин Ю.И., Колоколов Д.Ю., Шигалугов С.Х.* Модель возбуждения вторичных атомов поверхностными плазмонами // Изв. Томского политехн. ун-та. 2005. Т. 308. № 6. С. 18.
6. *Жиляков Л.А., Костановский А.В., Похил Г.П.* Условия формирования 2D кулоновского потенциала на поверхности диэлектрика // ТВТ. 2008. Т. 46. № 5. С. 786.