

УДК 539.4.019; 621.039.531

Мишени для получения дейтронов высоких энергий

И. П. Чернов, В. В. Ларионов, Д. Н. Краснов, Е. В. Лисичко, Н. В. Чистякова

Рассмотрена методика изготовления таблеток на основе палладия и титана, насыщенного дейтерием. Таблетки, облученные встречными пучками электронов, являются источником дейтронов высоких энергий, значительно превышающих тепловые значения.

PACS: 61.80.Jh, 79.20.Rf

Ключевые слова: таблетки, титан, палладий, облучение, облучение электронами, ядерные реакции.

Введение

Известно [1—4], что при наводороживании металлы образуют водородную подсистему, обладающую особым свойством накапливать энергию. Основными характеристиками водородной подсистемы являются ее энергия, особое состояние электронов, обнаруженное при изучении электронных спектров металлов [2] и десорбции водорода из них [3]. При исследовании десорбции дейтронов из комбинированной системы в виде Pd/PdO, насыщенной дейтерием с образованием Pd/PdO:D_x, в процессе облучения электронами выявлено, что энергия дейтронов увеличивается более чем на два порядка по сравнению с тепловой [4]. Дальнейшее изучение данного явления привело к необходимости разработки и создания устройств в виде таблеток, конструкция которых позволила бы увеличить энергию дейтронов, одновременно осуществляя их получение в управляемом режиме. Отметим, что энергия дейтронов может быть достаточной для получения нейтронного выхода при коллапсе пузырька дейтерия в жидкости с пренебрежимо малым давлением насыщенных паров [5].

В данной работе представлены результаты исследования конструкционных особенностей таблеток из титана и палладия, предназначенных для увеличения энергии дейтронов.

Постановка задачи

Ранее исследовались таблетки с односторонним слоем окисла на поверхности [4] дейтерированного палладия. Толщина пленки окисла составляла 20 нм (см. таблицу). В предлагаемом варианте поверхностный слой окиси палладия наносят одновременно с обеих сторон палладиевой пластины, насыщают окисленную пластину дейтерием, а облучение таблетки производят электронным пучком одновременно с двух противоположных сторон.

Увеличение энергии и числа дейтронов происходит по следующей причине. В предыдущей работе [4] таблетку снабжали слоем окиси палладия с одной стороны. Ее возбуждение электронным пучком с одной стороны оказалось не совсем эффективно, так как не происходит осцилляция электронной плотности дейтериевой подсистемы металла в полном объеме.

Параметры палладиевых таблеток

Параметры таблетки в опыте	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Площадь таблетки, S, мм ²	200	50	300	100	300	300
Площадь пучка электронов, мм ²	7,0	28	60	60	76	48
Скорость десорбции, D/(с·см ²)	1,8·10 ¹⁴	1,3·10 ¹⁴	2,3·10 ¹⁴	2,3·10 ¹⁴	2,4·10 ¹⁴	4,8·10 ¹⁵
Энергия электронов, кэВ	50	6	30	50	30	30
Средняя энергия дейтронов, эВ	0,26	0,20	0,28	0,40	3,6	5,2
Толщина слоя окиси PdO _x , мкм	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02
Степень насыщения таблетки дейтерием	0,6	0,6	0,6	0,6	0,73	0,73
Энергия встречного пучка электронов, кэВ	нет	нет	нет	нет	нет	30

Чернов Иван Петрович, зав. кафедрой.

Ларионов Виталий Васильевич, профессор.

Краснов Дмитрий Николаевич, аспирант.

Лисичко Елена Владимировна, доцент.

Чистякова Надежда Владимировна, ассистент.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, 634050, Томск-50, пр. Ленина, 30.

Тел. 3822-563-440. E-mail: chernov@tpu.ru

Статья получена 25 мая 2011 г.

© Чернов И. П., Ларионов В. В., Краснов Д. Н., Лисичко Е. В., Чистякова Н. В., 2011

Экспериментальные исследования

По гипотезе [2—4], основная роль в наблюдаемых процессах принадлежит эффекту резонансного образования плазмонов, с помощью которых происходит накачка энергией дейтронов. Под плазмонами понимают образование в среде (например металле) усиленных осцилляций электронной плотности. В том случае, если слои окиси палладия создаются с двух сторон, а таблетку облучают встречными пучками, то возникает эффект много-

кратного и интерференционного усиления осцилляций электронной плотности дейтериевой подсистемы таблетки. Другими словами, происходит образование плазмонов в большем количестве, чем в таблетке с односторонним слоем окисла. В результате встречного неупругого столкновения внутренняя энергия дейтронов теоретически может увеличиться в четыре раза. Предлагаемый способ позволяет получать дейтроны в большем количестве и с энергией, превышающей энергию при одностороннем слое окисла.

Приведем конкретный пример изготовления таблетки. Ее вырезают из пластинки палладия толщиной 50 мкм в виде образца площадью 300 мм². Затем таблетку нагревают на воздухе или в кислородной среде до температуры 1200 °С. В результате нагрева при свободном доступе кислорода с обеих сторон таблетка окисляется с образованием окисла PdO_x. Толщина слоя окисла составляет от 0,02 до 0,05 мкм и зависит от режима окисления и времени. После окисления таблетку помещают в электролизер, снабженный двумя платиновыми анодами и заполненный раствором LiOD. Два платиновых анода позволяют равномерно и идентично насытить таблетку дейтерием с двух сторон. Время насыщения выбирают так, чтобы объемная концентрация дейтерия в палладии составила 73—78 % . После насыщения дейтерием таблетку облучают встречными и идентичными по свойствам электронными пучками.

На рис. 1 изображена схема облучения, где представлены детекторы 1 и 2 для измерения энергии дейтронов, палладиевая таблетка 3, слой 4 окиси палладия, штанга 5 для фиксации таблетки и ее передвижения, электронные пучки 6, основа установки 7. Поперечное сечение пучков равно 48 мм². Энергия электронов в пучках составляет 30 кэВ. В ходе облучения таблетки электронами ток пучка положительно заряженных дейтронов с поверхности таблетки составляет 0,73 мА/см², что превышает ток при одностороннем облучении примерно в 1,5 раза. При этом количество возбужденных атомов дейтерия превышает количество, получаемое простым увеличением (удвоением) площади таблетки (см. таблицу).

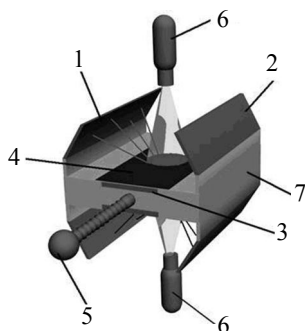


Рис. 1. Схема облучения таблетки

В таблице в столбцах 1—4 приведены параметры различного вида разработанных таблеток. В столбце 5 приведены параметры таблетки с увеличенной площадью облучения. Этими данными доказывается, что новый эффект не определяется количественным увеличением площади таблетки. Столбец 6 — параметры таблетки, описываемой в качестве технического решения. Как видно из столбца 6, энергия дейтронов при встречном облучении превышает на 40—45 % их энергию в таблетке с односторонним облучением, причем при меньшей площади таблетки. Это свидетельствует о качественно и количественно новом положительном эффекте. Кроме того, способ изготовления новой таблетки и ее использование приводит к увеличению скорости и числа десорбируемых дейтронов, что является важным фактором ее применения, например, в реакторе ITER для синтеза ядер и получения дополнительной энергии.

При изготовлении таблеток из титана использовали данные работ [6, 7].

Обсуждение результатов

Обработка результатов для палладиевых и титановых таблеток позволяет отметить, что при увеличении слоя окисла на поверхности металла до 100 нм существенно изменяется процесс газовой выделения дейтерия из металла. Наблюдается ступенчатое изменение скорости выхода дейтерия, что приводит к предварительному выводу либо об участии дейтерия в образовании кластеров на дислокациях [1], либо об аномальных коллективных процессах возбуждения внутренней водородной атмосферы металлов электронным пучком.

На рис. 2 и 3 приведены сравнительные изображения поверхностей таблеток после облучения. После насыщения мишени дейтерием и облучения электронами на ее поверхности образуются многочисленные поры диаметром 100—2000 нм. Также на поверхности обнаружены кратеры диаметром 1—20 нм.

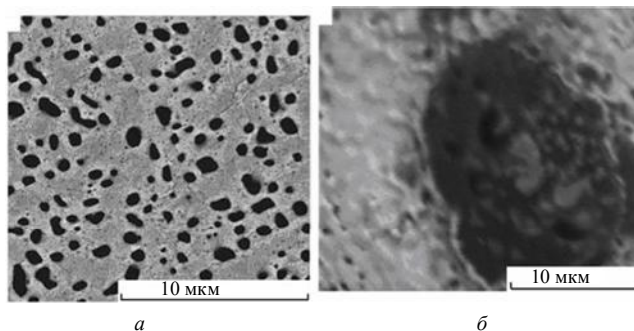


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения поверхностей образцов Pd/PdO:D_x:

а — поверхность Pd/PdO:D_x после облучения электронами; б — кратер на поверхности Pd/PdO:D_x

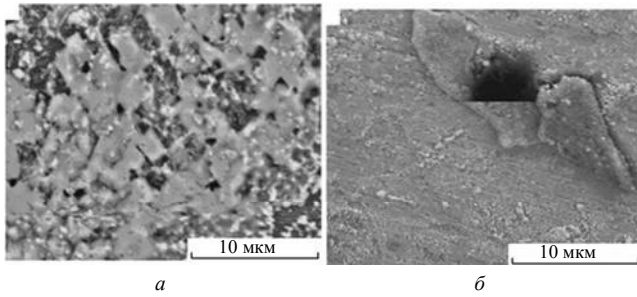


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения поверхностей образцов $Ti/TiO:D_x$:
 а — поверхность $Ti/TiO:D_x$ после облучения электронами;
 б — кратер на поверхности $Ti/TiO:D_x$

В ряде экспериментов палладий заменен титаном. В отличие от палладиевой мишени, у титановой поры не образуются, однако также характерно появление кратеров аналогичного диаметра.

Присутствие тонкого оксидного слоя на поверхности палладиевой мишени играет двоякую роль. Слой задерживает "преждевременное" удаление дейтерия и увеличивает вероятность многократного рассеяния плазмонов [8]. В то же время присутствие тонкого оксидного слоя не обеспечивает значительного ускорения атомов дейтерия, поскольку окись палладия — это полуметалл с большой проводимостью с отсутствием поляризации. Наличие большого количества пор (длиной около 50 нм) позволяет увеличить энергию атомов дейтерия за счет каналирования. У титановой мишени слой окисла достигает 150 нм [6, 7]. Образование кратеров на поверхности мишеней свидетельствует о высокой концентрации энергии в этих областях.

Энергетические оценки

Для оценки энергии дейтронов в мишенях $Pd/PdO:D_x$ под действием электронного пучка использовали упрощенную модель, в которой поток дейтерия, мигрирующий к поверхности, рассматривается как низкоэнергетический "пучок" дейтронов, а сама дейтерированная поверхность $Pd/PdO:D_x$ образца — как "мишень". Тогда ток пучка дейтронов (равный десорбируемому из образца потоку) есть $J_d = 0,5 \text{ mA/cm}^2$, а средняя относительная концентрация дейтерия в мишени $\langle x \rangle \sim 0,15$ или $N_d = 1,1 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$.

Если энергия дейтронов превышает 4—5 эВ, то возможна DD-реакция. Для расчета выхода реакции из толстой мишени применили выражение, модифицированное в [6] для низкоэнергетических приложений:

$$Y_{DD} = J_d N_{eff}(T) \cdot \int_0^{E_d} f(E) \sigma_{DD}(E) (dx/dE) dE, \quad (1)$$

где J_d — ток дейтронов на мишень; $N_{eff}(T)$ — температурозависимое значение концентрации дейте-

рия в мишени; $\sigma_{DD}(E)$ — стандартное или "чистое" (без учета усиления) сечение DD-реакции, отвечающее энергии дейтрона E в лабораторной системе и dE/dx — тормозная способность дейтронов в мишени (PdO); $f(E)$ — фактор усиления DD-реакции:

$$f(E) = Y_{exp}(E)/Y_b(E) = \exp[\pi\eta(E)U_e/E]. \quad (2)$$

В (2) $Y_{exp}(E)$ — экспериментальный выход DD-реакции, отвечающий энергии E (взятой в системе центра масс), $Y_b(E)$ — стандартный выход, полученный с помощью аппроксимации Боша и Галле сечения DD-реакции [9] или "чистый" выход (без учета электронного экранирования в мишени); $2\pi\eta(E) = 31,29 Z^2(\mu/E)^{1/2}$ — параметр Зоммерфельда (Z — заряд частицы, μ — приведенная масса) и U_e — потенциал экранирования дейтронов мишени. Учитывая полуэмпирическое выражение для U_e в [9] (где установлено, что U_e логарифмически зависит от подвижности дейтронов в мишени), следует, что для $Pd/PdO:D_x$ в условиях нашего эксперимента $U_e = 750 \pm 50$ эВ. Полученное значение близко к значениям U_e , измеренными в экспериментах для мишеней из Pd (800 эВ [1]) и PdO (600 эВ [9]).

Экстраполяция значений "чистого" выхода DD-реакции $I(E)$ и фактора усиления $f(E)$ (отвечающего в формуле (2) $U_e \sim 750$ эВ) к низким энергиям дейтронов показывает, что измеренная скорость DD-реакции $N_p \sim 0,01 \text{ p/(c}\cdot\text{cm}^2)$ в телесный угол 4π [1] достигается при средней кинетической энергии десорбируемых атомов дейтерия $\bar{\epsilon} \sim 4\text{—}5$ эВ. Существенно, что если бы средняя кинетическая энергия атомов дейтерия на поверхности образца составляла $\bar{\epsilon} \sim k_B T$, то значение скорости DD-реакции было бы на 5 порядков величины меньше наблюдаемого экспериментально. "Разогрев" атомов дейтерия до энергии $\sim 4\text{—}5$ эВ на поверхности $Pd/PdO:D_x$ мишени в процессе их десорбции под действием электронного пучка соответствует модели электронно-стимулированной десорбции [10] и плазмонного механизма их отрыва от поверхности [11].

Концепция генерации "горячих" атомов водорода (дейтерия) плазмонами при возбуждении водородной подсистемы гидридов рассмотрена в [2, 12]. Проведенные в этих работах *ab-initio* расчеты показали, что возбуждение водородной подсистемы (приводящее к десорбции H, D) при электронной бомбардировке обусловлено генерацией плазменных колебаний (плазмонов) в кристаллической решетке, локализованных преимущественно в окрестности атомов водорода. Данный процесс приводит к осцилляции электронной плотности и появлению сильных электрических полей ($E \approx 3 \cdot 10^7 \text{ В/см}$) как в объеме, так и на поверхности

гидрида в масштабах, соизмеримых с величиной параметра решетки a ($a \sim 0,3\text{—}0,4$ нм). В результате, среднее значение энергии $\bar{\varepsilon}$ атомов H (или D), десорбируемых с поверхности гидрида, эффективно возрастает на несколько эВ ($\bar{\varepsilon} \approx F \cdot a \sim 4\text{—}5$ эВ) по сравнению с их средней энергией при $T = 300$ К. В случае дейтерия такое ускорение ионов D^+ в решетке, сопряженное с высоким значением электронного потенциала экранирования в металлах с высокой подвижностью дейтерия [1, 13, 14, 15], приводит к выходу DD-реакции.

Эффективная энергия дополнительного ускорения в условиях многократного рассеяния может быть оценена также как

$$W_D^{eff} = \bar{\varepsilon} + eE(\text{TiO}_2)h(\text{TiO}_2),$$

где $\bar{\varepsilon} = 3$ эВ — средняя первичная энергия иона D^+ в мишени, вызванная генерацией плазмонов;

$E(\text{TiO}_2) \approx 3 \cdot 10^7$ В/см — напряженность электрического поля в теле мишени;

$h(\text{TiO}_2) = 1,5 \cdot 10^{-5}$ см — толщина слоя окисла на поверхности мишени.

Оценка дает максимальную энергию ускорения дейтронов $W_D^{eff} \approx 500$ эВ.

Заключение

Получение высокоэнергетических атомов водорода (дейтерия) при возбуждении водородной подсистемы при электронной бомбардировке обусловлено генерацией плазменных колебаний (плазмонов) в кристаллической решетке, локализованных преимущественно в окрестности атомов водорода. Данный процесс приводит к осцилляции электронной плотности и появлению сильных электрических полей ($E \approx 3 \cdot 10^7$ В/см) как в объеме, так и на поверхности гидрида. В результате, среднее значение энергии $\bar{\varepsilon}$ атомов H(D), десорбируемых с поверхности гидрида, эффективно возрастает до нескольких эВ ($\bar{\varepsilon} \approx 4\text{—}5$ эВ) по сравнению с их средней энергией при $T = 300$ К.

Задача дальнейших исследований по-прежнему состоит в разработке конструкций таблеток, в которых усиливается многократное рассеяние плазмонов, возбуждающих водородную подсистему металлов, что и приводит к увеличению энергии дейтронов. Перспективность использования мишеней для целей энергетики зависит в значительной степени от успехов в разработке конструкций мишеней, в уточнении характера и степени их возбуждения, приводящих к увеличению числа высокоэнергетических дейтронов.

Литература

1. Липсон А. Г., Русецкий А. С., Карабут А. Б., Майли Д. // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. № 6. С. 1334.
2. Tyurin Yu., Chernov I. P. // Intern. J. Hydrogen Energy. 2002. V. 57. P. 829.
3. Aliotta M., Raiola F., Gyurky G., Formicola A. et al. // Nucl. Phys. A. 2001. V. 690. No. 4. P. 790.
4. Чернов И. П., Липсон А. Г., Тюрин Ю. И., Ларионов В. В. // Инженерная физика. 2009. № 8. С. 15.
5. Галютдинов А. Р., Галютдинов Р. Т., Кашипов Н. Ф. // Прикладная физика. 2007. № 6. С. 108.
6. Green J. P., Lee H. Y., Becker Hans-Werner D. // Nuclear Instruments and methods in Physics Research A. 2010. V. 613. No. 3. P. 462.
7. Смородов Е. А., Галиахметов Р. Н. // Прикладная физика. 2007. № 4. С. 61.
8. Горячев Б. В., Ларионов В. В., Могильницкий С. Б., Склярова Е. А., Чернов И. П. // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 312. № 2. С. 93.
9. Липсон А. Г., Русецкий А. С., Ляхов Б. Ф. и др. // Химия высоких энергий. 2008. Т. 42. № 4. С. 361.
10. Раховская О. В. Особенности процесса электронно-стимулированной десорбции поверхности ионных кристаллов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М.: МГУ, 1988. — 112 с.
11. Никитенков Н. Н. Процессы при ионном распылении поверхности твердых тел и энергомасс-спектрометрия вторичных ионов. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. 01.04.04. — М.: МГУ, 2007.
12. Чернов И. П., Коротеев Ю. М., Силкин В. М., Тюрин Ю. И. // ДАН. 2008. Т. 420. № 6. С. 1.
13. Yuki H., Kasagi J., Lipson A. G. et al. // JETP Lett. 1998. V. 68. No. 11. P. 785.
14. Raiola F., Gang L., Bonomo C. et al. // Europhys. J. 2004. V. F19. P. 283.

Method of preparation of targets for high-energy deuterons

I. P. Chernov, V. V. Larionov, D. N. Krasnov, E. V. Lisichko, N. V. Chistyakova

National Research Tomsk Polytechnic University,

30 Lenin str., 634050, Tomsk, Russia

E-mail: chernov@tpu.ru

The method of fabrication technique of targets is based on palladium saturated with deuterium. The target irradiated by colliding beams of electrons are a source of deuterons of high energies, which are much higher than thermal ones.

PACS: 61.80.Jh, 79.20.Rf

Keywords: targets, palladium, titanium, irradiation, electron, nuclear reaction.

Bibliography — 14 references.

Received May 25, 2011