

0,0012%, небольшое содержание воды (точка росы равна  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

В табл. 1 сравниваются наши опытные данные с результатами работ [3, 5]. Из таблицы следует, что расхождение  $\delta$  не превышает 0,15%, за исключением одной точки.

Экспериментальные значения удельного объема и коэффициенты сжимаемости гелия, полученные в данной работе, приведены в табл. 2. Там же дано сравнение экспериментальных значений коэффициента сжимаемости гелия со значениями, рассчитанными по уравнению, взятому из работы [14], рекомендованному до  $p = 200 \text{ кгс/см}^2$ . Как видно из сравнения, даже при давлениях до  $400 \text{ кгс/см}^2$  расхождение не превышает указанного [14] допуска 0,2%.

Поступила в Редакцию 24/XI 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. L. Holborn, J. Otto. Z. Phys., Bd. 33, 1 (1925).
2. C. Gibby, C. Tanner, E. Masson. Proc. Royal Soc., 122, 283 (1929).

3. R. Wiebe, V. Gaddy, C. Heins. J. Amer. Chem. Soc., 53, 1721 (1931).
4. W. Keesom, J. Van-Santen. Amsterdam p. of the Section of Sciences, 36, 813 (1933).
5. A. Michels, U. Wouters. Physica, 8, 923 (1941).
6. W. Schneider. Canad. J. Res., 27, 4 (1949).
7. W. Schneider, Duffie. J. Chem. Phys., 17, 751 (1949).
8. J. Yntema, W. Schneider. J. Chem. Phys., 18, 641 (1950).
9. В. Н. Попов, В. И. Чернышов. Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1966—1967 годы. М., Изд. МЭИ, 1967, стр. 81.
10. В. Н. Попов, В. И. Чернышов. «Энергетика и транспорт», № 4, 148 (1968).
11. М. П. Вукалович, В. В. Алтуни. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М., Атомиздат, 1965.
12. Е. Е. Тоцкий. «Теплофизика высоких температур», 2, 205 (1964).
13. Справочник по свойствам сталей, применяемых в котлотурбостроении. Книга 32. М., Машгиз, 1958.
14. Н. В. Цедерберг, В. Н. Попов, Н. А. Морозова. Теплофизические свойства гелия. М., Госэнергоиздат, 1961.

## Исследование радиационных нарушений монокристалла вольфрама, облученного дейтронами с энергией 12 Мэв, при помощи ионного проектора

В. А. КУЗНЕЦОВ, Г. М. КУКАВАДЗЕ, Б. М. СТАСЕВИЧ, А. Л. СУВОРОВ

УДК 621.039.531:537.534.5:669.27

Возможность применения ионного проектора для наблюдения на атомарном уровне дефектов, возникающих при облучении кристаллической решетки твердого тела, была показана ранее [1—8]. Однако до сих пор не исследовались дефекты кристаллических структур, вызванные бомбардировкой заряженными частицами с энергией несколько мегаэлектронвольт. Изучение характера нарушений при таком облучении и явилось целью настоящей работы.

**Методика эксперимента.** Эксперименты по облучению вольфрама дейтронами с энергией 12 Мэв проводились в гелиевом ионном проекторе (рис. 1)\*, конструкция которого позволяла быстро менять исследуемые образцы и использовать для охлаждения образцов жидкий азот, водород, гелий и твердый азот. В данной работе образцы охлаждались жидким ( $78^{\circ}\text{K}$ ) и твердым ( $53\text{—}63^{\circ}\text{K}$ ) азотом. Исследовались монокристаллические вольфрамовые образцы в виде острия, приготовленные путем электрохимического травления из промышленной проволоки

диаметром 0,05 мм, предварительно отожженной в вакууме при температуре  $2400^{\circ}\text{K}$ . Средний радиус закругления получаемого острия составлял 400—500 Å. Образцы облучались потоком дейтронов с энергией 12 Мэв, направленным перпендикулярно к центральной оси [011], при комнатной температуре на специальной экспериментальной мишени в ионопроводе циклотрона Института теоретической и экспериментальной физики. В каждый образец попадало от 10 до 25 дейтронов. Все острия до облучения просматривались в проекторе. Типичное ионное изображение необлученного острия приведено на рис. 2.

В качестве рабочего газа использовался гелий при давлении  $10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ . Перед напуском газа вакуумная система откачивалась до давления  $10^{-7} \text{ мм рт. ст.}$ , причем ее не прогревали во избежание отжига возникших при облучении дефектов. Отжиг точечных дефектов при комнатной температуре незначителен [9]. Исследование образцов в проекторе заключалось

\* См. рисунки на вклейке.



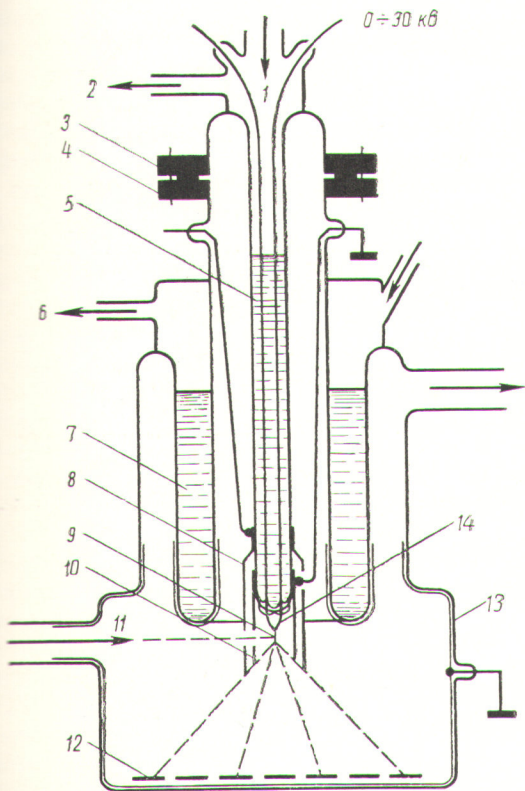


Рис. 1. Схема разборного пинного проектора для исследования радиационных нарушений:

1 — заливка жидкого азота; 2, 6 — отвод испаряющегося азота; 3, 4 — фланцевое уплотнение; 5 — охлаждаемая ножка; 7 — внешняя охлаждаемая рубашка; 8 — защитный металлический экран; 9 — монокристаллический образец-острие; 10 — измерительный экран; 11 — поток облучающих частиц; 12 — флуоресцирующий экран; 13 — прозрачное проводящее покрытие ( $\text{SnCl}_2$ ); 14 — вольфрамовая дужка для крепления образца.

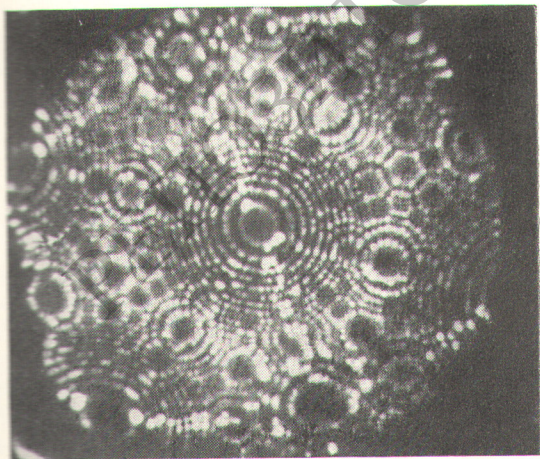


Рис. 2. Типичное гелиевое пинное изображение необлученного вольфрамового острия.

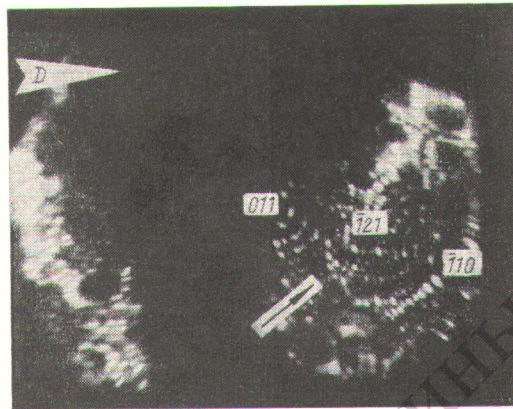


Рис. 3. Гелиевое пинное изображение облученного дейтронами вольфрамового острия. Стрелкой показана краевая дислокация у грани (121). Средний радиус острия 570 Å.

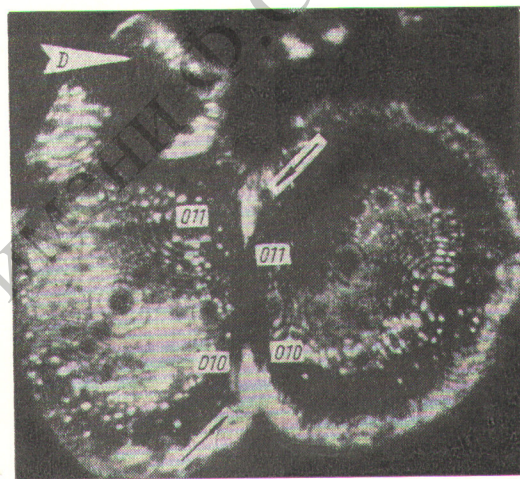


Рис. 4. Поверхность острия после его испарения полем до среднего радиуса 700 Å. Наблюдается некоторое искажение решетки и большая концентрация смещенных атомов в двух областях около поверхности сдвига (смещенные атомы указаны стрелкой).



Рис. 5. Гелиевое пинное изображение облученного дейтронами вольфрамового острия. Область острия, соответствующая верхней части изображения, не проявляется. У грани (211) видны небольшие группы атомов, вклинившихся в междоузлия. Средний радиус острия 590 Å.



в последовательном фотографировании и испарении полем многих атомных слоев, что позволяло изучать объемное распределение полученных дефектов. Фотографирование предпринималось только после удаления полем нескольких поверхностных атомных слоев, «загрязненных» адсорбированными газами.

**Обсуждения результатов эксперимента.** Как показывает анализ ионных изображений облученных образцов, дейтроны с энергией 12 Мэв производят значительные разрушения в кристаллической решетке вольфрама. При облучении вольфрамовых образцов нейтральными атомами гелия и ртути подобного рода дефекты не наблюдались [5], что объясняется более эффективным взаимодействием заряженных частиц с атомами решетки. На рис. 3 показана поверхность одного из образцов сразу же после облучения на циклотроне. Как видно, в центре изображения располагается большая область, лишенная атомов, причем кристаллическая структура острия по краям почти не изменилась. При взаимодействии дейтрона с поверхностью острия происходит кратковременный термический нагрев локализованной области решетки, который приводит к частичному испарению материала острия. Этот процесс, по-видимому, в чем-то аналогичен катодному распылению металлов [10—12].

Последовательное испарение материала острия полем позволило установить, что дейтроны, теряя при столкновении значительную часть своей энергии, двигаются дальше, вызывая многочисленные точечные дефекты решетки и большое число дислокаций (например, краевая дислокация у грани (121) на рис. 3). В результате длительного испарения полем создается атомная поверхность, на которой исчезает граница между правой и левой частями разрушенного острия (рис. 4). Глубина удаленной впадины порядка 400 Å. Как видно из рис. 3, произошел значительный сдвиг большой области острия, соответствующей правой части изображения. Поверхность сдвига представляет собой часть поверхности многогранника, образованной пересекающимися плоскостями многих «малых» сдвигов, происшедших в результате движения дислокаций. У поверхности сдвига (см. рис. 4) образовались две области с высокой концентрацией смещенных атомов. Эти области содержат по  $10^5$ — $10^6$  атомов. Предположение о том, что поверхность сдвига является границей между двумя монокристаллами поликристаллической воль-

фрямовой проволоки, из которой изготовлено острие, при рассмотрении ионного изображения, полученного после дальнейшего испарения полем, не подтвердилось. Сечение поверхности сдвига на последующих изображениях постепенно исчезло и проявилась довольно совершенная структура.

Процесс смещения атомов в направлениях, близких к направлению движения дейтрона, имеет, по-видимому, нарастающий характер, что приводит к выбиванию целых атомных областей в районе выхода дейтрона из острия. Облучение дейтронами в данном случае привело к искажению области острия, содержащей примерно  $10^8$ — $10^9$  атомов.

На рис. 5 приведено одно из первых изображений, полученное для другого образца, облученного в тех же условиях. Значительная область острия, соответствующая верхней части фотографии, на изображении не проявляется. В месте столкновения дейтронов с поверхностью острия, как и в предыдущем случае, обнаруживается замороженный термический беспорядок. У краев плоских сеток грани (211) видны вклинившиеся в междоузлия по два — четыре атома. Наблюдается также удаление большой области в районе выхода дейтронов. Последующее испарение острия полем привело к сильному разрушению кристаллической структуры под ранее хорошо проявлявшимися гранями [см. грани (211), (111), (233) на рис. 5]. Это, по-видимому, вызвано тем, что кончик острия не испытывал дейтронных ударов. В результате последовательного испарения образца полем было установлено, что в области прохождения дейтронов возникло большое число дислокаций, которые привели к значительному сдвигу в решетке вольфрама. В разрушенной области острия наблюдается большая концентрация смещенных атомов и целые скопления вакантных мест, представляющих собой, по-видимому, так называемые дисперсионные кластеры (по терминологии работы [13]). Наблюдалась также зона смещения атомов [14], имеющая длину порядка 200 Å и содержащая около  $10^4$  атомов.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Столкновение дейтрона с энергией 12 Мэв с монокристаллом вольфрама приводит к кратковременному термическому нагреву локализованной области, которая частично испаряется. В оставшейся части происходит замораживание термического беспорядка.



2. В облученной решетке присутствуют смещенные атомы, единичные вакансии и группы вакансий, зоны смещения. В разрушенной области решетки находятся дисперсионные кластеры.

3. Облучение монокристалла вызывает образование большого числа подвижных дислокаций, перемещение которых приводит к сдвигам.

4. В месте выхода дейтрона из остряя всегда наблюдается выбивание значительной части вещества, что обусловлено, по-видимому, процессом смещения атомов, носящим в направлении движения дейтронов нарастающий характер.

Авторы благодарны профессору Б. М. Цареву за проявленный интерес к работе.

Поступила в Редакцию 28/VII 1967 г.  
В окончательной редакции 22/V 1968 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E. Müller, B. Wacławski. *J. Appl. Phys.*, **32**, 8 (1961).

2. E. Müller. *Structure and properties of thin Films*. New York, 1959, p. 475.

3. Э. В. Мюллер. «Успехи физ. наук», **77**, 546 (1962).

4. D. Brandon, M. Wald. *Disc. Faraday Soc.*, **31**, 73 (1961).

5. M. Sinha, E. Müller. *J. Appl. Phys.*, **4**, 35 (1964).

6. H. Bowkitt. *Third European Regional Conf. Electron Microscopy*. Prague, 1964, Vol. A, p. 191.

7. M. Attardo, J. Galligan. *Phys. Stat. Sol.*, **16**, 449 (1966).

8. M. Attardo, J. Galligan. *Phys. Rev.*, **17**, 191 (1966).

9. А. Дамаск, Дж. Динс. Точечные дефекты в металлах. М., «Мир», 1966, стр. 84.

10. Р. Н. Гарбер, А. И. Федоренко. «Успехи физ. наук», **83**, 385 (1964).

11. Н. Д. Моргулис. «Успехи физ. наук», **28**, 202 (1946).

12. Л. Н. Добрецов, М. В. Гомоюнова. Эмиссионная электроника. М., «Наука», 1966, стр. 521.

13. B. Ralph, M. Fortes. *Philos. Mag.*, **14**, 189 (1966).

14. J. Brinkman. *J. Appl. Phys.*, **25**, 961 (1954).

## Об энергетической зависимости светового выхода люминофоров ZnS(Ag)

М. И. АРСАЕВ, О. Х. БЕЛОВ

УДК 539.1.074.3

Несмотря на широкое применение сцинтилляционных счетчиков с люминофором ZnS(Ag) для регистрации ионизирующих излучений, работ, посвященных одной из важных характеристик люминофоров — энергетической зависимости конверсионной эффективности от энергии излучения, относительно немного [1—6].

В настоящей работе изучалась энергетическая зависимость относительной конверсионной эффективности люминофоров ZnS(Ag) при возбуждении их рентгеновскими лучами в диапазоне эффективных энергий 10—125 кэв, а также определялось отношение конверсионных эффективностей для  $\alpha$ - и  $\gamma$ -излучений  $G_\alpha/G_\gamma$  в этой области энергий  $\gamma$ -квантов.

Исследовались выпускаемые промышленностью два типа люминофоров ZnS(Ag) — марки ФС-4 и К-430.

Для изучения характера энергетической зависимости конверсионной эффективности люминофора ZnS(Ag) в качестве источников рентгеновского излучения были использованы рентгеновские аппараты РУМ-7 (в диапазоне эффективных энергий 10—30 кэв) и РУП-200 (30—123 кэв).

Поток энергии рентгеновского излучения, падающего на сцинтиллятор, определялся по нормальным камерам, рассчитанным для измерений рентгеновского излучения до 30 и 125 кэв [7].

Регистрация рентгеновского излучения сцинтилляционным счетчиком осуществлялась путем измерения средней величины постоянного тока на выходе фотоумножителя ФЭУ-13. При этом использовался метод замещения, когда в пучок рентгеновских лучей последовательно вводились нормальная камера и сцинтилляционный счетчик. Необходимая мощность дозы при данной эффективной энергии рентгеновского излучения при облучении люминофора ZnS(Ag) устанавливалась каждый раз с помощью дополнительной камеры-свидетеля проходного типа. Исследуемые сцинтилляторы представляли собой тонкие слои поликристаллического люминофора ZnS(Ag), нанесенные методом осаждения в водяной воронке на подложку из оргстекла диаметром 40 мм, высотой 2 мм и закрепленные лаком толщиной 1 мг/см<sup>2</sup>. Толщины люминофора ZnS(Ag) составляли 7,9—8,25 мг/см<sup>2</sup> для марки ФС-4 и 10—12 мг/см<sup>2</sup> для марки К-430 и были опти-