

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ МИШЕНЕЙ В ПУЧКАХ ИОНОВ

Э.А.Коптелов, С.Г.Лебедев, В.Н.Панченко

Институт ядерных исследований АН СССР, Москва

1. Введение

Основным недостатком всех твердотельных перезарядных мишеней является их ограниченный срок службы. Однако за последние годы произошел существенный сдвиг в увеличении времени жизни графитовых перезарядных мишеней из-за улучшения технологии их изготовления^{/1/} и отработки нового метода получения углеродных фольг — крекингом этилена в тлеющем разряде. Мишени, изготовленные по этой технологии, имеют примерно в 10 раз больший срок службы, чем стандартные мишени, полученные испарением в дуговом разряде. Несмотря на большое количество экспериментальных данных по временам жизни графитовых фольг в пучках ионов, до сих пор еще нет ясного представления о механизме их разрушения. В данной работе предлагается физическая модель процесса разрушения углеродных фольг в пучках ионов, проводится сравнение экспериментальных и расчетных данных на основе этой модели и обсуждается возможность использования полученных в настоящей работе результатов для прогнозирования времени жизни перезарядных графитовых пленок в пучках ионов.

2. Модель разрушения

Известно, что при работе конструкционного графита в радиационных полях происходит изменение его линейных размеров, величина и знак которых определяются флюэнсом и плотностью повреждающего потока, температурой облучения, анизотропией графита, степенью его совершенства и др.^{/2/} Подобные изменения размеров приводят к возникновению напряжений в образцах и, в конечном счете, к их разрушению. В работах^{/3,4/} на основе рентгенографического анализа пленок, полученных по различным технологиям, сделан вывод о том, что под действием облучения в пленках происходит графитизация и они приобретают структуру, близкую к структуре графита. Поэтому для изучения процессов, происходящих в пленках, можно в качестве первого шага применить теоретические представления, используемые при изучении изменения под действием облучения физических свойств графитовых материалов. В результате облучения графита происходит накопление радиационных дефектов и, как следствие, искажение кристаллической решетки. При низких температурах облучения в материалах с несовершенной кристаллической структурой происходит всестороннее сжатие кристаллической решетки. Это объясняется избытком неподвижных вакансий. Деформация вызывает внутренние напряжения в образцах. Если эти напряжения превышают предел прочности материала, то происходит разрушение образца. Основную роль в изменении параметров решетки играют точечные дефекты и их небольшие скопления^{/5/}. Для объяснения изменения физических свойств углеродных фольг от дозы и температуры облучения может быть использована модель кинетики радиационных дефектов, предложенная в работе^{/6/}. Вакансии и межузельные атомы, как предполагается, генерируются гомогенно под облучением. В работе^{/6/} показано, что если температура облучения мала, так что за время облучения диффузия избыточных вакансий не проявляет себя, то процесс образования межузельных комплексов не имеет насыщения. Этот вывод согласуется с данными наблюдений^{/7/}. Тогда концентрации дефектов определяются выражениями^{/8/}:

$$n_v = 3t^{2/3} G^{5/6} (2\sigma)^{-1/6} N, \quad (1)$$

$$n_i = 2/n_v, \quad (2)$$

где $G = \sigma_d / n_d N \varphi = K_d N$, σ_d — эффективное сечение образования дефектов, n_d — число де-

фектов, образованных первично выбитым атомом /9/, φ - плотность потока ионов, G - скорость генерации дефектов в единице объема, в единицу времени, T - абсолютная температура мишени, определяемая по закону Стефана-Больцмана, ν - частота колебаний атомов решетки, $v = a \exp(-E_m/kT)$ - скорость перемещения межузлий в решетке, E_m - энергия активации движения межузлий, t - время облучения мишени, σ - сечение взаимодействия, N - число атомов мишени в единице объема, n_i - концентрация межузлий. В работе /10/ показано, что изменение параметров решетки, вызываемое накоплением дефектов, можно выразить так:

$$\Delta c/c = 0,2 n_i + 3 n_v, \quad (3)$$

$$\Delta a/a = -0,14 (n_i + n_v). \quad (4)$$

Тогда изменение линейных размеров материала можно определить по модели /11/:

$$(\Delta l/l)_{||} = K_1 \Delta c/c + K_2 \Delta a/a, \quad (5)$$

$$(\Delta l/l)_{\perp} = K_3 \Delta c/c + K_4 \Delta a/a, \quad (6)$$

Таблица I

Результаты расчета времен жизни углеродных перезарядных мишеней и сравнение с экспериментальными данными

Е, МэВ	ион	I, μA	S , mm^2	M , $\frac{M}{cm^2}$	T, К	K_d , cm/s	способ пригот.	$t_{ж}$ эксперим.	$t_{ж}^g$ расчет	$t_{ж}^H$ расчет	ссылка
1,2	Az^+	0,7	10	5	476	,0117	кэ	38 ± 7 мин.	34 мин.	15 мин.	/3/
1,2	Az^+	0,7	10	30	720	,0117	кэ	80 ± 10 мин.	63 мин.	25 мин.	/3/
10	Cl^-	I	2,5	5	941	,011	кэ	90 ± 18 мин.	90 мин.	36 мин.	/3/
II	I^+	I	1,8	10	1226	,27	кэ	$8,5 \pm 3,5$ мин.	2 мин.	1 мин.	/3/
4,8	Az^+	0,7	10	20	784	,0042	кэ	400 мин.	248 мин.	100 мин.	/12/
13	He^+	9,6	100	2	395	$53 \cdot 10^{-7}$	др	>48 часов	300 часов	124 часа	/17/
13	O^-	9,6	100	20	785	$26 \cdot 10^{-5}$	др	6 часов	13 часов	5 часов	/17/
13	S^-	9,6	100	15	848	$17 \cdot 10^{-4}$	др	1 час	1,4 часа	0,5 часа	/17/
13	B^-	4,8	100	15	755	$73 \cdot 10^{-4}$	др	15 минут	12 минут	5 минут	/17/
0,6	Ge^+	2	100	4	356	,0156	др	16 секунд	78 секунд	30 секунд	/18/
0,6	Ne^+	2	100	4	348	,0012	др	3,3 минут	30 минут	12 минут	/18/
48	Ni^{5+}	,15	2	14	937	,00212	др	4 часа	1,2 часа	0,5 часа	/19/
600	P^+	500	32	200	1480	,001	кэ	-	27 часов	10 часов	

Примечание к таблице I. В последней строке таблицы приведена оценка срока службы перезарядной мишени накопителя Московской мезонной фабрики, кэ - крекинг этилена в тлеющем разряде, др - дуговой разряд.

где $(\Delta e/e)_{||}$, $(\Delta e/e)_{\perp}$ — относительное изменение размеров в направлении, параллельном плоскости осаждения пленки и в перпендикулярном направлении соответственно, K_1 – K_4 — текстурные коэффициенты, вычисленные по методике, изложенной в [2] с использованием дифракционной картины для долгоживущих фольг^{3/}. При рассматриваемых временах $\eta_i \ll \eta_v$ и из соотношений (1)–(6) при $K_1=0,236$ и $K_2=0,764$ получим $(\Delta e/e)_{||} = -0,06 \eta_v$. В случае "жесткого" закрепления пленки на оправке эти приращения вызывают в плоскости осаждения возникновение деформаций $\varepsilon = -(\Delta e/e)_{||}$ и растягивающих напряжений

$$\sigma = 0,06 \eta_v E \quad (7)$$

где E — модуль Юнга. При достижении напряжениями предела прочности материала фольги σ_p наступает ее разрушение. Промежуток времени от начала облучения до момента разрушения можно рассматривать как время жизни фольги. Используя соотношения (1), (7), получаем оценку времени жизни фольги:

$$t_{ж} = \left(\frac{N \sigma_p}{q I E} \right)^{3/2} (\alpha a \nu)^{1/4} \exp \left(- \frac{E_m}{4 k T} \right) / G^{5/4} \quad (8)$$

3. Результаты

На основании предложенной выше методики были проанализированы экспериментальные данные по временам жизни углеродных перезарядных мишеней в пучках ионов. Значение предела прочности существенно зависит от используемой технологии. Предел прочности для долгоживущих фольг, приведенный в [12], составляет 27 МПа, верхнее значение предела прочности пленок, приведенное в [13], равно 51 МПа. Были проведены расчеты с использованием этих двух значений пределов прочности. Результаты расчетов и сравнение с экспериментальными данными приведены в таблице I. При вычислениях использовались следующие значения параметров: $a = 1,6 \cdot 10^{-8}$ см, $\nu = 5 \cdot 10^{13}$ с⁻¹, $E_m = 0,3$ эВ, $\alpha = 2 \cdot 10^{-15}$ см². При расчетах времен жизни фольг, полученных испарением углерода в дуговом разряде, экспериментальные значения времен жизни увеличивались в 10 раз.

В заключение авторы благодарят Ю.Я.Стависского за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. K.R.S.Tait, D.W.L.Tolfree.—Nucl. Instr. and Meth., v.167, p.21, 1979.
2. Действие облучения на графит ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1978.
3. K.R.S.Tait.—Nucl. Instr. and Meth., v.184, p.203, 1981.
4. D.W.L.Tolfree.—Nucl. Instr. and Meth., v.200, p.13, 1982.
5. Т.Н.Щуршакова и др.—Атомная энергия, т.40, вып.5, стр. 399, 1976.
6. Е.А.Коптелов.—Rad.Eff., v.45, p.163, 1980.
7. D.J.Norris.—Phil. Mag., v.22, p.1273, 1970.
8. L.M.Brown e.a.—Phil. Mag., v.19, p.721, 1969.
9. М.А.Кумахов, Ф.Ф.Комаров. Энергетические потери и пробеги ионов в твердых телах. Издательство БГУ, Минск, 1979.
10. B.Gray e.a.—Proc. IAEA Symp. Radiat. damage in reactor mater., v.11, 1969.
11. Proc. 3 conf. on carbon, p.559, 1959.
12. K.R.S.Tait e.a.—Nucl. Instr. and Meth., v.163, p.1, 1979.
13. T.Call e.a.—Nucl. Instr. and Meth., v.167, p.33, 1979.
14. J.Yntema.—Nucl. Instr. and Meth., v. 98, p.379, 1972.
15. F.Rickel.—Nucl. Instr. and Meth., v.195, p.457, 1982.
16. T.R.Ophes.—Nucl. Instr. and Meth., v.122, p.115, 1974.
17. H.K.Andrews e.a.—Nucl. Instr. and Meth., v.122, p.147, 1974.
18. P.Dobberstein e.a.—Nucl. Instr. and Meth., v.119, p.611, 1974.
19. E.Baron e.a.—Rev. Phys. Appl., v.12, p.1225, 1977.