

реактора и допустимым перепадом температуры от образца к образцу. Во время исследований в канале атомного реактора СМ-2 температуру образцов поддерживали в пределах 50—680° С пропуская гелия, нагретого в индукционных печах до соответствующей температуры. При перепаде 30—50° С оказалось возможным одновременно испытывать 3—4 образца.

Установка прошла всесторонние длительные испытания на специальном стенде и затем непосредственно в канале атомного реактора СМ-2.

В таблице приведены данные по результатам исследований длительной прочности сплава Ti — 2% Al —

3% Zr в необлученном состоянии и при облучении потоком нейтронов в канале атомного реактора СМ-2. Плотность потока быстрых нейтронов с энергией  $> 1$  Мэв составляет  $(1,1 \div 1,7) \cdot 10^{14}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек.

В заключение выражаем благодарность И. А. Разову за интерес к работе и помощь на всех этапах работы, сотрудникам НИИАР за помощь по отладке установки ДПРГ при внутриканальных испытаниях.

Поступило в Редакцию 7/III 1973 г.  
В окончательной редакции 28/XII 1973 г.

## Прохождение быстрых электронов через протяженные неоднородности в веществе

БОЙКО В. И., ЕВСТИГНЕЕВ В. В., ПЛОТНИКОВ А. Л.

УДК 539.124.17

Прохождение быстрых моноэнергетических электронов через вещество сопровождается изменением их спектрального и углового распределения в результате взаимодействия с атомами среды. Рассеяние и величина пробега  $R_0$  определяются энергией электронов  $E_0$ , плотностью среды  $\rho$  и ее атомным номером  $Z$  [1]. Деформация среды различными неоднородностями может вызвать значительные изменения характеристик электронного потока. Наличие в веществе протяженных неоднородностей типа каналов приводит к захвату рассеянных электронов в такую полость и эффективному их движению вдоль границы раздела, даже если она ориентирована под большим углом к направлению первоначального потока электронов. При этом в направлении ориентации канала в несколько раз увеличивается пробег электронов в веществе и их интенсивность и, следовательно, изменяется распределение поглощенной веществом энергии в отличие от недеформированной среды. Наблюдаемое явление названо макроканализацией быстрых электронов [2, 3].

Эффект макроканализации в большой степени зависит от угла ориентации канала  $\alpha$ , его диаметра  $d$  и длины  $l$ . Влияние эффекта макроканализации на пространственное и энергетическое распределение электронов изучено экспериментально на образцах алюминия и меди, в которых имитированы плоские сквозные каналы с углом наклона 0; 15; 30; 45; 60° по отношению к нормали поверхности образца. Поверхности стенок каналов обрабатывались по 5-му классу чистоты. Диаметры каналов составляли 100; 150; 200 мкм. Образцы устанавливались перпендикулярно к моноэнергетическому потоку электронов бетатрона, энергия которых равна 2 Мэв.

В качестве регистрирующего прибора при исследовании пространственного распределения использован практически нечувствительный к фону тормозного излучения электронный интроскоп [4], позволяющий преобразовать электронное изображение канала в направлении раскрытия  $x$  в видимое и усилить его по яркости. Это изображение фотографировалось, а фотопленка обрабатывалась на микрофотометре МФ-4.

Форма кривых пространственного распределения электронов макроканализации аналогична для алюминия и меди. Наблюдаемая деформация распределений

характеризуется появлением протяженного плато и уменьшением интенсивности электронов в максимуме кривой с ростом угла наклона канала (рис. 1). При этом ширина плато, обусловленного, очевидно, электронами натекания, т. е. электронами, рассеянными из канала в слой вещества и выпедными из образца, увеличивается. Для каналов с  $d = 100$  мкм эффект в достаточной степени проявляется до угла 60°. С увеличением атомного номера вещества снижается интенсивность электронов макроканализации вследствие уменьшения вероятности рассеяния электронов на малые углы.

Изучена зависимость выхода электронов от толщины образца при изменении ее от 1 до 5  $R_0$ . Так, в алюминии

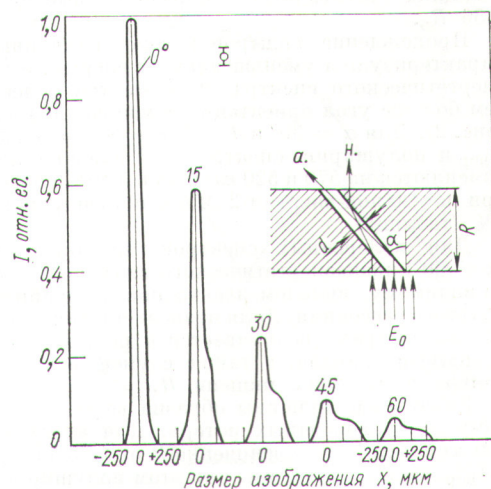
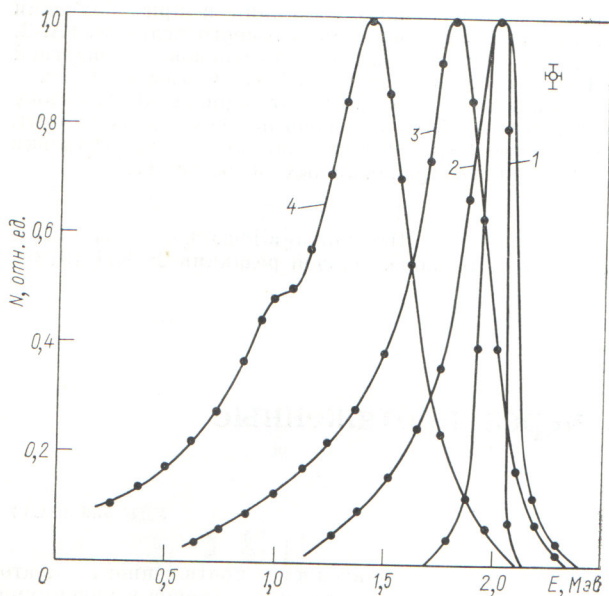


Рис. 1. Пространственное распределение электронов, прошедших каналы с  $\alpha = 100$  мкм и  $d = 0; 15; 30; 45; 60^\circ$  в алюминиевых образцах толщиной  $R = 1 R_0$  при  $E_0 = 2$  Мэв [альbedo ( $\alpha$ ) и натекание ( $n$ ) — компоненты, обусловленные электронами, многократно отраженными от стенок канала и прошедшими часть пути через слой вещества соответственно].



Р и с. 2. Энергетические спектры электронов, прошедших каналы с  $d = 100$  мкм в алюминиевых образцах толщиной  $R = 1,56R_0$  при  $E_0 = 2$  Мэв:

1 — нулевой спектр; 2 —  $\alpha = 0^\circ$ ; 3 —  $\alpha = 45^\circ$ ; 4 —  $\alpha = 30^\circ$ .

для канала с  $d = 100$  мкм при  $\alpha = 30^\circ$  интенсивность электронов за образец толщиной  $R = 5R_0$  составляет 10% интенсивности, соответствующей толщине  $1R_0$ .

Спектральный состав электронов макроканалирования исследован с помощью безжелезного  $\beta$ -спектрометра с поперечным однородным магнитным полем [5]. Толщина исследуемых образцов выбрана равной  $1,56R_0$ .

Прохождение электронов через наклонные каналы характеризуется уменьшением их энергии и уширением энергетического спектра, которые тем более заметны, чем больше угол ориентации и меньше диаметр канала (рис. 2). Для  $\alpha = 30^\circ$  и  $d = 100$  мкм вероятная энергия  $E_{вер}$  и полуширина спектра  $\Delta E/E$  для алюминия и меди изменяются на 570 и 520 кэв и 43,6 и 45% соответственно при начальной энергии 2 Мэв с полушириной спектра 5% (таблица).

Для измеренных спектров характерно появление ( $\alpha = 30^\circ$ ) низкоэнергетического плато, обусловленного, по-видимому, вкладом электронов натекания и многократного рассеяния. Доля низкоэнергетических электронов в спектрах увеличивается с ростом угла наклона и диаметра канала, а также с уменьшением атомного номера и толщины мишени R.

Увеличение толщины образца ведет к незначительному росту вероятных потерь. Для алюминия с  $d = 200$  мкм и  $\alpha = 30^\circ$  увеличение R от 1,56 до  $R_0$  изменяет  $\Delta E_{вер}$  от 425 до 595 кэв, при этом полуширина спектра увеличивается до 44,8%.

Из экспериментальных данных по исследованию основных характеристик макроканалирования электронов следует, что основной причиной эффекта является сильное рассеяние электронов в веществе, в результате которого они могут попасть в имеющуюся полость. Рассеяние электронов на границах раздела в направле-

Зависимость полуширины энергетических спектров и вероятных потерь энергии электронов макроканалирования от  $\alpha, d, Z$

$\alpha, \text{град}$	$d, \text{мкм}$	$\Delta E/E, \%$		$\Delta E_{вер}, \text{Мэв}$	
		Al	Cu	Al	Cu
0	100	13,8	11,5	0	0
	150	13,0	10,8	0	0
	200	12,1	10,3	0	0
15	100	24,3	23,2	0,2	0,15
	150	24,0	22,7	0,15	0,125
	200	23,7	22,4	0,125	0,09
30	100	43,6	45,0	0,575	0,525
	150	42,4	43,8	0,5	0,45
	200	41,3	42,8	0,425	0,375

нии ориентации канала в угол  $\sim \frac{d}{l} = \frac{d}{R \cdot (\cos \alpha)^{-1}}$

приводит к захвату их в режим макроканалирования, в котором они удерживаются благодаря многократным скользящим отражениям от границ раздела, т. е. отражениям, обусловленным большим сечением рассеяния на малые углы. Увеличение угла наклона канала уменьшает дифференциальное сечение рассеяния на малый относительно поверхности раздела угол и, следовательно, вызывает уменьшение потока электронов макроканалирования. Однако эффект имеет место, даже если  $\alpha = 60^\circ$ .

Изучение эффекта макроканалирования электронов позволяет наметить области возможного его применения. Используя закономерности макроканалирования, можно более точно определить чувствительность метода электронной дефектоскопии. Например, оптимальная чувствительность метода электронной интроскопии, полученная с помощью проволочных дефектометров (ГОСТ 7512—69), составляет 1,5% для энергии электронов  $E_0 = 6$  Мэв [4]. В то же время с помощью электронного интроскопа выявляются протяженные дефекты типа микротрещин шириной раскрытия 100 мкм и углом ориентации среднего направления дефекта до  $60^\circ$ , т. е. чувствительность метода в данном случае увеличивается до 1%. Полученные результаты необходимо учитывать для точного определения углового и энергетического распределения электронных потоков после различного рода коллиматоров и диафрагм, используемых в эксперименте. Можно более точно рассчитывать дозные поля, возникающие в веществе при облучении его электронами.

Целесообразно принимать во внимание макроканалирование электронов при расчете и конструировании биологической защиты электронных ускорителей и установок.

Поступило в Редакцию 19/IV 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононов Б. А. и др. «Атомная энергия», 1970, т. 29, вып. 3, с. 204.
2. Бойко В. И., Евстигнеев В. В., Кононов Б. А. Макроканалирование быстрых электронов.— Тезисы докл. Всесоюз. конференции «Разработка и практическое применение электронных ускорителей». Томск, изд. Томск. у-та, 1972, с. 163.
3. Бойко В. И., Евстигнеев В. В., Плотников А. Л. Электронные спектры макроканалирования. —

- Программа и тезисы докл. XXIII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л., «Наука», 1973, с. 315.
4. Бойко В. И. и др. Бетаатронный электронный интроскоп. — «Дефектоскопия», 1973, № 6.
5. Бойко В. И. и др. Исследование низкоэнергетической компоненты спектра поля электронного излучения вблизи экстраполированного пробега. — В сб.: Дозиметрия и радиационные процессы в дозиметрических системах. Ташкент, «Фан», 1972, с. 54.

Теплопроводность расплавленных смесей тетрахлорида урана с хлоридами натрия и калия

БЫСТРАЙ Г. П., ДЕСЯТНИК В. Н., ЗЛОКАЗОВ В. А.

УДК 536.2 : 661.879.1

Методом малой перемычки, ранее использованным для определения теплопроводности металлов и полупроводников [1—3], а также расплавленных солей [4], измерена теплопроводность смесей тетрахлорида урана с хлоридами натрия и калия. Теория метода основана на перегреве солевой перемычки между массивными объемами соли. В качестве перемычки служило отверстие в кварцевом тигле с параметром  $(b/a) = 0,08 \div 0,05$ , где  $a$  — диаметр отверстия,  $b$  — толщина стенки тигля. В качестве электродов использовали платиновый тигель и платиновую проволоку в виде спирали. Падение напряжения измеряли вольтметром ВК7-10А/1. Особое внимание обращали на чистоту исходных компонентов, которые готовились по методикам, приведенным в работах [5, 6]. Значения электропроводности взяты из работы [7].

Максимальная погрешность эксперимента  $\pm 10\%$ , данные по теплопроводности хлоридов натрия и калия удовлетворительно согласуются с приведенными в работах [8, 9].

Теплопроводность чистых компонентов и их смесей линейно изменяется с температурой и описывается уравнением

$$\lambda = a + bT \pm \Delta\lambda$$

с положительным температурным коэффициентом, что характерно для высокоассоциированных расплавов. Экспериментальные значения теплопроводности ( $вт/м \cdot град$ ), каждое из которых находили усреднением результатов 8—15 измерений, обрабатывали методом наименьших квадратов (значения коэффициентов уравнения приведены в табл. 1 и 2).

Теплопроводность системы NaCl—UCl<sub>4</sub> Таблица 1

UCl <sub>4</sub> , мол. %	a	b · 10 <sup>3</sup>	n	Δλ	Температура, °К
0	-0,995	2,10	14	0,032	1080—1187
32	-0,735	1,95	5	0,017	771—847
45	-1,116	2,36	5	0,004	790—865
51	-1,279	2,49	7	0,008	798—845
61	-1,316	2,43	9	0,014	790—861
81	-0,748	1,55	5	0,007	833—864
100	-2,672	3,50	9	0,003	864—907

Теплопроводность системы KCl—UCl<sub>4</sub> Таблица 2

UCl <sub>4</sub> , мол. %	a	b · 10 <sup>3</sup>	n	Δλ	Температура, °К
0	-1,449	2,30	12	0,029	1053—1151
43	-0,935	2,16	6	0,008	799—882
57	-1,142	2,23	5	0,008	838—913
74	-1,095	2,08	6	0,006	788—860
80	-1,333	2,29	5	0,005	830—873
83	-1,773	2,76	4	0,003	844—876

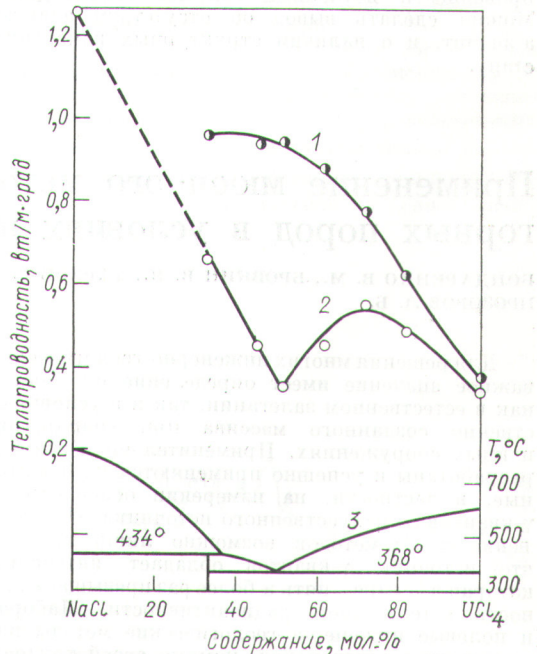


Рис. 1. Теплопроводность системы NaCl — UCl<sub>4</sub>: 1 — изотерма для 600 °С; 2 — теплопроводность на линии ликвидуса; 3 — диаграмма плавкости.