

Фиг. 3. Осциллограмма переменного давления на выходе цилиндрического пьезопреобразователя (а) и на выходе стержневого пьезопреобразователя (б); осциллограмма возбуждающего напряжения на электродах цилиндрического преобразователя (в) и на электродах стержневого преобразователя (г)

излучателя. Рабочей средой была вода. Временной масштаб осциллограмм — 0,25 мкс/дел, амплитудный масштаб на фиг. 3, а в два раза больше, чем на фиг. 3, б. Форма преобразователей и расположение электродов соответствовало чертежам на фиг. 1 и 2 при  $l_1=6$  мм,  $l_2=5$  мм, преобразователи изготавливались из керамики ЦТС-19. Заметим, что для широкополосных пьезопреобразователей с неоднородным электрическим полем можно использовать и другие пьезоэлектрические материалы, в том числе монокристаллические.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. M. Redwood. Transient performance of a piezoelectric transducer. J. Acoust. Soc. Amer., 1961, 33, 4, 527–537.
2. R. F. Mitchell, M. Redwood. The generation of sound by nonuniform piezoelectric materials. Ultrasonics, 1969, 7, 2, 123–125.
3. К. Н. Баранский. Возбуждение в кварце колебаний гиперзвуковых частот. Докл. АН СССР, 1957, 114, 3, 517–519.
4. J. L. Stewart, E. S. Stewart. Analysis and design of a 3 Gc/sec quartz-cavity resonator as a hypersonic source for liquids. J. Acoust. Soc. Amer., 1963, 35, 6, 913–922.
5. E. H. Jacobsen. Sources of sound in piezoelectric crystals. J. Acoust. Soc. Amer., 1960, 32, 8, 949–953.

Каунасский политехнический институт  
им. Антанаса Снечкуса

Поступила  
14 января 1975 г.  
После исправления  
27 июня 1975 г.

УДК 539.32

### ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ СИСТЕМЫ НИОБИЙ — МОЛИБДЕН

Т. С. Катаев, И. И. Новиков, В. Б. Проскурин

Исследование распространения высокочастотных волн деформаций в твердых телах является эффективным методом в физике твердого тела. Соответственные измерения позволяют изучать связь скорости звука с различными свойствами твердого тела, относящимися в основном к его решетке.

Нами было проведено исследование поведения модулей упругости в монокристаллах Nb—Mo при концентрации молибдена до 15,33 ат.%. Опыты были выполнены импульсно-фазовым методом на частотах 15—20 Мгц при 293° К. Монокристаллы чистого ниобия и четырех сплавов системы ниобий — молибден выращивались методом электронно-лучевой зонной направленной кристаллизации в вакууме. Состав сплавов, чистота и совершенство кристаллической структуры контролировались химическим и спектральным анализами и рентгеновским методом Лауэ.



Содержание Мо, ат. %	Скорость звука, м/сек			Плотность, г/см <sup>3</sup> , ρ	Модули упругости · 10 <sup>-11</sup> , н/м <sup>2</sup>		
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>		C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>44</sub>
0	5040	1815	2573	8,593	2,4686	1,3309	0,2830
2,04	5054	1816	2585	8,615	2,4919	1,3406	0,2842
5,09	5073	1821	2612	8,659	2,5320	1,3505	0,2871
7,13	5089	1825	2635	8,701	2,5677	1,3595	0,2897
15,33	5150	1855	2730	8,859	2,7050	1,3845	0,3048

Исследуемые образцы отрезались на электроискровом станке, а затем для обеспечения плоскостности и плоскопараллельности противоположных граней они шлифовывались вручную в специальной кассете на стеклянных плитах алмазными пастами. При этом достигалась плоскопараллельность противоположных граней образцов диаметром 12—14 мм и высотой 14 мм не хуже 10 сек. Отклонение оси образцов от направления [110] не превышало 3°.

Для каждого образца проводились три измерения скорости звука: одно измерение на продольной волне и два — на поперечных. Поляризация поперечной волны устанавливалась с учетом кристаллографических направлений и контролировалась акустически. Основным критерием правильности установки пьезопреобразователя являлось возбуждение только одной квазипоперечной моды. Точность в определении скорости звука была не хуже 0,05%.

Для расчета модулей упругости  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{44}$  использовались известные [1] для кристаллов кубической симметрии соотношения:

$$(1) \quad 2\rho a_1^2 = C_{11} + C_{12} + 2C_{44}, \quad \rho a_2^2 = C_{44}, \\ 2\rho a_3^2 = C_{11} - C_{12},$$

где  $a_1$  — скорость распространения продольной волны в направлении [110],  $a_2$ ,  $a_3$  — скорости распространения двух поперечных волн в направлении [110] с поляризацией [100] и [110],  $\rho$  — плотность.

Плотность каждого образца определялась методом гидростатического взвешивания с погрешностью 0,005%. Результаты измерений и расчетов представлены в таблице. На фиг. 1 приведена зависимость поведения модулей упругости от концентрации Мо.

Как известно, модули упругости зависят от величины межатомных сил. В работе [2] приведены результаты исследования модулей упругости в монокристаллах системы Nb—Mo для концентраций 0; 16,8; 23,2; 33,9; 51,6; 75,2; 92,1; 100 ат.% Мо. В этих исследованиях показано, что в монокристаллах, богатых ниобием, модули упругости, а значит, и силы межатомного взаимодействия, слабо изменяются. Нами изучены эти же сплавы при еще меньших концентрациях молибдена. Как видно из фиг. 1, характер изменения модулей в зависимости от концентрации молибдена совпадает.

Качественно такое поведение модулей можно объяснить, используя модель центральных сил. Следуя [3], можно установить связь модулей упругости с силовыми. Так как электронная структура в общем случае неизвестна, эта связь имеет скорее качественный характер. Рассматривая центральные силы, действующие между ближайшими и вторыми соседями в решетке, можно показать, что

$$(2) \quad V_z \frac{C_{11} + 2C_{12}}{3} = \frac{4}{9}W_1''l^2 - \frac{8}{9}W_1'l + \frac{1}{3}W_2''l^2 - \frac{2}{3}W_2'l + B_F'V_z, \\ V_z \frac{C_{11} - C_{12}}{2} = \frac{4}{3}W_1'l + \frac{1}{2}W_2''l^2 + \frac{1}{2}W_2'l - 0,043 \frac{e^2}{l}, \\ V_z C_{44} = \frac{4}{9}W_1''l^2 + \frac{8}{9}W_1'l + W_2'l - 0,32 \frac{e^2}{l}.$$

В полученных соотношениях учтены ионные и электростатические вклады в сдвиговые модули, а также вклад в объемный модуль  $B_F' = C_{12} - C_{44}$  [4] из-за зависимости энергии Ферми от объема. Здесь  $V_z = \frac{4}{3}\sqrt{3}l^3$  — объем элементарной ячейки решетки,  $W_1(r)$  и  $W_2(r)$  — энергия взаимодействия ближайших и вторых соседей в случае центральных сил:  $W' = \partial W / \partial r$ ,  $W'' = \partial^2 W / \partial r^2$ .



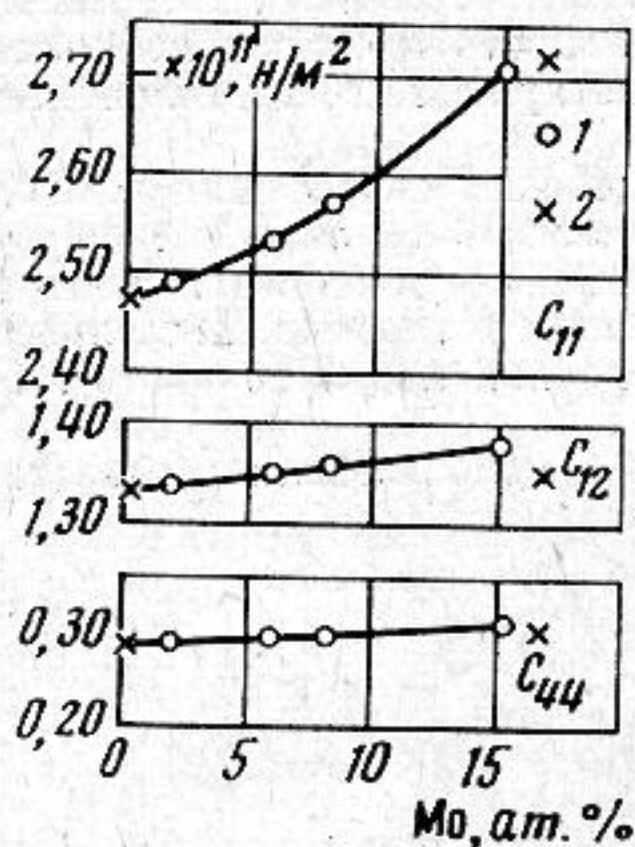
Принимая из условия равновесия  $W_2' = 0$ , получим

$$(3) \quad \frac{W_1'}{l^2} = -0,25 \frac{e^2}{l^4},$$

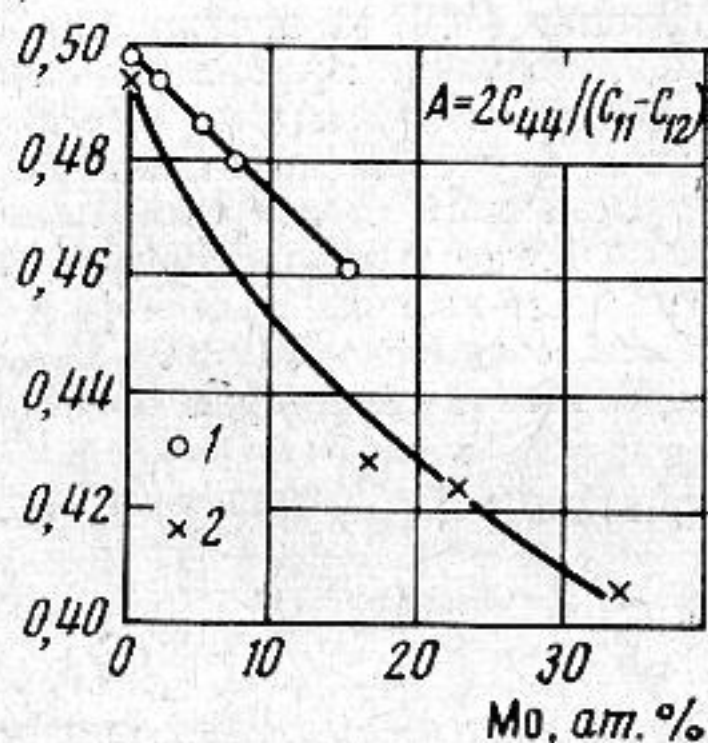
$$\frac{W_1''}{l} = 1,73C_{44} - 0,46 \frac{e^2}{l^4},$$

$$\frac{W_2''}{l} = 0,77(C_{11} - C_{12}) + 0,27 \frac{e^2}{l^4}.$$

Соотношения (3) позволяют объяснить поведение силовых констант по экспериментальным данным для модулей упругости. Так как  $W_1''$  и  $W_2''$  практически полностью определяются сдвиговыми модулями  $C_{44}$  и  $(C_{11} - C_{12})/2$ , то величина фак-



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Модули упругости  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{44}$  монокристаллов Nb — Mo при  $T=293^\circ \text{K}$   
1 — экспериментальные данные, 2 — данные из работы [2]

Фиг. 2. Влияние состава на фактор анизотропии  $A$ . 1 — из наших данных, 2 — данные из работы [2]

тора анизотропии  $A$  определяет характер сил связи между ближайшими соседями в решетке и более дальними.

На фиг. 2 приведена зависимость величины фактора анизотропии  $A$  от концентрации молибдена в сплаве, отсюда следует, что с введением в сплав молибдена взаимодействие в решетке с ближними соседями практически не меняется, в то время как роль вторых соседей возрастает.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. Ультразвуковые методы в физике твердого тела, М., «Мир», 1972.
2. W. C. Hubbel, F. R. Brotzen. Elastic constants of niobium — molybdenum alloys in the temperature range  $-190$  to  $+100^\circ \text{C}$ . J. Appl. Phys., 1972, 43, 8, 3306—3312.
3. Г. Лейбфрид. Микроскопическая теория механических и тепловых свойств кристаллов. М.—Л., Физматгиз, 1963.
4. J. de Launay. Lattice dynamics of body-centered and face-centered cubic metallic elements. J. Chem. Phys., 1953, 21, 11, 1975—1986.

Институт металлургии  
им. А. А. Байкова  
Академии наук СССР

Поступила  
15 июля 1975 г.