

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЕРДОГО РАСТВОРА NaCl—NaBr

А. В. ШАРКО, А. А. БОТАКИ

(Рекомендована к печати кафедрой общей физики ТПИ)

Импульсным ультразвуковым методом в интервале температур 80—300 К произведены измерения констант упругости монокристаллов твердого раствора NaCl—NaBr разных концентраций. Установлены закономерности их изменения на исследованном интервале температур.

В настоящей работе импульсным ультразвуковым методом на частоте 2,5 МГц по методике [1—4] произведены измерения упругих свойств монокристаллов твердого раствора NaCl—NaBr разных концентраций в интервале температур 80—300 К. Концентрация твердого раствора измерялась по методу потенциометрического титрования на пробах, взятых из разных частей образца. За концентрацию твердого раствора данного состава принималось среднее значение по трем измерениям. Необходимая для определения упругих констант плотность образцов рассчитывалась по измеренным значениям плотности при комнатной температуре и температурному коэффициенту линейного расширения [5].

Результаты измерений постоянных  $C_{ik}$  и коэффициентов упругости  $S_{ik}$ , а также вычисленные по ним значения фактора анизотропии  $A = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}}$  и коэффициента  $B = \frac{C_{44}}{C_{12}}$ , характеризующего отклонение от соотношения Коши для разных концентраций твердого раствора NaCl—NaBr и для его чистых компонентов NaCl и NaBr помещены в табл. I—VII. Концентрация твердых растворов NaCl—NaBr в таблицах выражена в молярных процентах.

Для оценки точности измерений линейные температурные зависимости  $C_{11}$ ,  $C_{44}$  и  $\frac{C_{11} - C_{12}}{2}$  были обработаны по методу наименьших квадратов и дали следующие максимальные значения коэффициентов вариации: 0,6 % для  $C_{11}$ ; 1,4 % для  $C_{44}$ ; и 2,4 % для  $\frac{C_{11} - C_{12}}{2}$ .

Анализируя данные измерений, можно сделать следующие выводы:  
1. Постоянные упругости  $C_{11}$  и  $C_{44}$  твердых растворов NaCl—NaBr на исследованном интервале температур линейно возрастают с понижением температуры.

2. При понижении температуры вещества значения  $C_{11}$  и  $C_{44}$  возрастают тем быстрее, чем больше концентрация NaCl в твердом растворе.

3. Температурные зависимости  $C_{11}$ ,  $C_{44}$ ,  $\frac{C_{11}-C_{12}}{2}$  твердого раство-

ра NaCl—NaBr разных концентраций занимают промежуточное положение между чистыми компонентами.

4. Зависимость постоянных  $C_{ik}$  от концентрации компонентов твердого раствора, выраженной в молярных процентах, имеет явно выраженную отрицательную неаддитивность.

5. Монокристаллы твердого раствора для всех исследованных концентраций с повышением температуры от 80 до 300 К монотонно стремятся к изотропному состоянию, однако полной изотропии  $A=1$  на исследованном интервале температур ни один кристалл твердого раствора не достигает.

6. Коэффициент  $B = \frac{C_{44}}{C_{12}}$ , характеризующий отклонение от соотношения Коши, с понижением температуры от 300 до 80 К монотонно

Таблица 1

100% NaCl

T°K	Постоянные упругости $\times 10^{-11}$ дн/см <sup>2</sup>			Коэффициенты упругости $\times 10^{11}$ см <sup>2</sup> /дн			A	B
	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{44}$	$S_{11}$	$-S_{12}$	$S_{44}$		
300	4,769	1,314	1,273	0,2380	0,0514	0,7855	0,737	0,969
290	4,801	1,306	1,274	0,2357	0,0504	0,7849	0,729	0,976
280	4,834	1,298	1,276	0,2334	0,0491	0,7837	0,722	0,983
270	4,868	1,291	1,277	0,2306	0,0484	0,7831	0,714	0,989
260	4,908	1,282	1,279	0,2284	0,0473	0,7819	0,706	0,997
250	4,948	1,271	1,280	0,2263	0,0464	0,7812	0,696	1,007
240	4,994	1,260	1,282	0,2238	0,0452	0,7800	0,687	1,018
230	5,025	1,252	1,283	0,2212	0,0443	0,7794	0,680	1,024
220	5,052	1,244	1,285	0,2192	0,0433	0,7782	0,675	1,033
210	5,091	1,233	1,286	0,2169	0,0423	0,7776	0,667	1,043
200	5,134	1,218	1,287	0,2148	0,0414	0,7770	0,657	1,057
190	5,178	1,202	1,289	0,2127	0,0402	0,7756	0,648	1,073
180	5,200	1,194	1,290	0,2105	0,0393	0,7752	0,644	1,081
170	5,224	1,185	1,292	0,2088	0,0386	0,7740	0,640	1,091
160	5,258	1,169	1,294	0,2068	0,0376	0,7726	0,633	1,107
150	5,294	1,155	1,295	0,2049	0,0367	0,7722	0,626	1,121
140	5,323	1,145	1,297	0,2032	0,0360	0,7710	0,621	1,132
130	5,359	1,128	1,298	0,2012	0,0350	0,7702	0,614	1,150
120	5,399	1,111	1,299	0,1992	0,0340	0,7698	0,606	1,169

приближается к единице. Значение  $B = 1$  на исследованном интервале температур выполняется только для составов, содержащих более 45 мол% NaCl.

Таблица 2  
88,5% NaCl

T°K	Постоянные упругости $\times 10^{-11}$ дн/см <sup>2</sup>			Коэффициенты упругости $\times 10^{11}$ см <sup>2</sup> /дн			A	B
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>44</sub>	S <sub>11</sub>	-S <sub>12</sub>	S <sub>44</sub>		
300	4,665	1,299	1,239	0,2439	0,0531	0,807	0,736	0,954
290	4,708	1,284	1,240	0,2405	0,0515	0,806	0,724	0,966
280	4,746	1,280	1,242	0,2380	0,0505	0,805	0,717	0,970
270	4,775	1,275	1,244	0,2359	0,0497	0,804	0,711	0,976
260	4,810	1,260	1,245	0,2316	0,0481	0,803	0,701	0,988
250	4,845	1,253	1,247	0,2310	0,0475	0,802	0,693	0,995
240	4,880	1,240	1,248	0,2297	0,0465	0,801	0,686	1,006
230	4,896	1,228	1,249	0,2265	0,0454	0,800	0,676	1,017
220	4,940	1,216	1,251	0,2243	0,0443	0,799	0,672	1,029
210	4,988	1,208	1,252	0,2213	0,0432	0,799	0,662	1,036
200	5,026	1,196	1,253	0,2190	0,0421	0,798	0,654	1,048
190	5,046	1,186	1,255	0,2177	0,0414	0,797	0,650	1,058
180	5,075	1,171	1,257	0,2157	0,0404	0,796	0,644	1,073
170	5,101	1,155	1,258	0,2139	0,0395	0,795	0,633	1,089
160	5,144	1,142	1,260	0,2115	0,0384	0,794	0,630	1,103
150	5,177	1,129	1,262	0,2095	0,0375	0,792	0,623	1,118
140	5,212	1,120	1,263	0,2076	0,0367	0,791	0,617	1,128
130	5,246	1,108	1,265	0,2057	0,0359	0,790	0,611	1,142
120	5,275	1,091	1,266	0,2040	0,0350	0,789	0,605	1,160
110	5,320	1,080	1,268	0,2018	0,0341	0,788	0,598	1,174
100	5,346	1,068	1,270	0,2004	0,0334	0,787	0,594	1,189
90	5,374	1,052	1,272	0,1988	0,0325	0,786	0,589	1,209
80	5,394	1,046	1,274	0,1978	0,0321	0,785	0,586	1,218

Таблица 3

74% NaCl

T°K	Постоянные упругости $\times 10^{-11}$ дн/см <sup>2</sup>			Коэффициенты упругости $\times 10^{11}$ см/дн			A	B
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>44</sub>	S <sub>11</sub>	-S <sub>12</sub>	S <sub>44</sub>		
300	4,525	1,267	1,195	0,2518	0,0551	0,837	0,734	0,943
290	4,550	1,262	1,197	0,2499	0,0542	0,835	0,728	0,948
280	4,581	1,253	1,199	0,2474	0,0531	0,834	0,721	0,957
270	4,630	1,248	1,201	0,2439	0,0518	0,833	0,712	0,962
260	4,668	1,236	1,202	0,2410	0,0504	0,832	0,702	0,972
250	4,702	1,232	1,204	0,2385	0,0495	0,831	0,694	0,977
240	4,734	1,222	1,206	0,2362	0,0485	0,830	0,687	0,987
230	4,762	1,212	1,208	0,2342	0,0475	0,828	0,681	0,997
220	4,786	1,204	1,211	0,2324	0,0467	0,826	0,676	1,006
210	4,825	1,197	1,213	0,2299	0,0457	0,824	0,669	1,013
200	4,873	1,189	1,215	0,2270	0,0445	0,823	0,660	1,022
190	4,907	1,181	1,217	0,2248	0,0436	0,822	0,653	1,030
180	4,940	1,170	1,218	0,2226	0,0426	0,821	0,646	1,041
170	4,975	1,165	1,220	0,2206	0,0419	0,820	0,640	1,047
160	4,993	1,153	1,222	0,2192	0,0411	0,818	0,636	1,060
150	5,037	1,147	1,224	0,2169	0,0402	0,817	0,629	1,067
140	5,072	1,140	1,225	0,2149	0,0394	0,816	0,623	1,075
130	5,103	1,131	1,227	0,2131	0,0387	0,815	0,618	1,085
120	5,122	1,122	1,229	0,2119	0,0381	0,814	0,614	1,095
110	5,162	1,112	1,231	0,2097	0,0372	0,813	0,608	1,107
100	5,206	1,108	1,232	0,2078	0,0365	0,812	0,601	1,112
90	5,235	1,095	1,234	0,2059	0,0356	0,810	0,596	1,127
80	5,346	1,080	1,236	0,2051	0,0350	0,809	0,539	1,114

Таблица 4  
49,5% NaCl

T °K	Постоянные упругости $\times 10^{-11}$ дн/см <sup>2</sup>			Коэффициенты упругости $\times 10^{11}$ см <sup>2</sup> /дн			A	B
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>44</sub>	S <sub>11</sub>	-S <sub>12</sub>	S <sub>44</sub>		
300	4,326	1,228	1,130	0,2647	0,0585	0,885	0,729	0,920
290	4,341	1,225	1,132	0,2630	0,0579	0,883	0,726	0,924
280	4,374	1,222	1,134	0,2604	0,0569	0,882	0,720	0,928
270	4,412	1,220	1,137	0,2575	0,0558	0,880	0,712	0,932
260	4,439	1,219	1,139	0,2548	0,0549	0,878	0,705	0,934
250	4,483	1,217	1,141	0,2523	0,0539	0,876	0,699	0,938
240	4,521	1,213	1,143	0,2495	0,0528	0,875	0,691	0,942
230	4,561	1,211	1,146	0,2468	0,0518	0,873	0,684	0,946
220	4,596	1,208	1,148	0,2442	0,0508	0,871	0,678	0,950
210	4,628	1,206	1,150	0,2422	0,0501	0,870	0,672	0,954
200	4,652	1,202	1,151	0,2405	0,0494	0,869	0,667	0,957
190	4,683	1,197	1,154	0,2383	0,0485	0,867	0,662	0,964
180	4,714	1,194	1,156	0,2363	0,0478	0,865	0,657	0,968
170	4,748	1,192	1,159	0,2343	0,0470	0,863	0,652	0,972
160	4,786	1,190	1,162	0,2319	0,0462	0,861	0,646	0,976
150	4,829	1,189	1,163	0,2295	0,0453	0,860	0,639	0,978
140	4,861	1,185	1,165	0,2275	0,0446	0,858	0,634	0,983
130	4,895	1,179	1,168	0,2253	0,0437	0,856	0,629	0,991
120	4,930	1,176	1,170	0,2234	0,0430	0,855	0,623	0,994
110	4,965	1,173	1,171	0,2214	0,0423	0,854	0,617	0,998
100	4,989	1,165	1,175	0,2198	0,0416	0,851	0,614	1,008
90	5,020	1,160	1,176	0,2181	0,0409	0,850	0,609	1,014
80	5,046	1,158	1,178	0,2168	0,0405	0,849	0,606	1,017

Таблица 5

37% NaCl

T °K	Постоянные упругости $\times 10^{-11}$ дн/см <sup>2</sup>			Коэффициенты упругости $\times 10^{11}$ см <sup>2</sup> /дн			A	B
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>44</sub>	S <sub>11</sub>	-S <sub>12</sub>	S <sub>44</sub>		
300	4,208	1,206	1,094	0,2720	0,0607	0,914	0,728	0,907
290	4,244	1,206	1,096	0,2695	0,0596	0,913	0,721	0,909
280	4,277	1,205	1,099	0,2669	0,0587	0,910	0,715	0,912
270	4,321	1,205	1,101	0,2635	0,0574	0,908	0,707	0,914
260	4,338	1,204	1,103	0,2621	0,0570	0,906	0,704	0,916
250	4,363	1,204	1,105	0,2594	0,0561	0,905	0,697	0,918
240	4,420	1,204	1,107	0,2561	0,0548	0,903	0,688	0,920
230	4,453	1,203	1,109	0,2538	0,0540	0,902	0,682	0,922
220	4,497	1,203	1,112	0,2506	0,0529	0,899	0,675	0,924
210	4,530	1,202	1,115	0,2484	0,0521	0,897	0,670	0,927
200	4,564	1,202	1,118	0,2461	0,0513	0,894	0,665	0,930
190	4,589	1,201	1,120	0,2444	0,0507	0,893	0,661	0,932
180	4,624	1,200	1,121	0,2422	0,0499	0,892	0,655	0,934
170	4,662	1,198	1,123	0,2397	0,0490	0,890	0,648	0,937
160	4,689	1,195	1,126	0,2379	0,0483	0,888	0,644	0,942
150	4,714	1,192	1,128	0,2362	0,0477	0,886	0,641	0,946
140	4,758	1,188	1,130	0,2334	0,0466	0,885	0,633	0,951
130	4,789	1,185	1,133	0,2319	0,0460	0,883	0,629	0,956
120	4,820	1,182	1,135	0,2297	0,0452	0,881	0,624	0,960
110	4,850	1,178	1,138	0,2278	0,0445	0,879	0,620	0,966
100	4,875	1,175	1,139	0,2263	0,0439	0,878	0,616	0,969
90	4,900	1,172	1,142	0,2248	0,0434	0,876	0,613	0,974
80	4,928	1,168	1,144	0,2232	0,0428	0,874	0,608	0,979

Таблица 6

21,5% NaCl

T °K	Постоянные упругости $\times 10^{-11}$ дн/см <sup>2</sup>			Коэффициенты упругости $\times 10^{11}$ см <sup>2</sup> /дн			A	B
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>44</sub>	S <sub>11</sub>	-S <sub>12</sub>	S <sub>44</sub>		
300	4,092	1,164	1,052	0,2796	0,0619	0,951	0,719	0,894
290	4,118	1,166	1,053	0,2777	0,0613	0,950	0,713	0,895
280	4,159	1,169	1,056	0,2742	0,0602	0,947	0,706	0,897
270	4,206	1,170	1,059	0,2706	0,0589	0,944	0,698	0,898
260	4,243	1,175	1,061	0,2682	0,0582	0,942	0,692	0,900
250	4,277	1,177	1,063	0,2653	0,0572	0,941	0,686	0,901
240	4,308	1,180	1,065	0,2631	0,0566	0,939	0,681	0,902
230	4,331	1,181	1,067	0,2615	0,0560	0,937	0,677	0,903
220	4,369	1,184	1,070	0,2588	0,0552	0,935	0,672	0,904
210	4,405	1,185	1,073	0,2566	0,0544	0,933	0,666	0,905
200	4,443	1,187	1,075	0,2536	0,0535	0,930	0,660	0,906
190	4,486	1,188	1,077	0,2507	0,0525	0,928	0,653	0,907
180	4,519	1,189	1,081	0,2485	0,0517	0,925	0,649	0,909
170	5,545	1,189	1,083	0,2468	0,0512	0,923	0,645	0,911
160	4,574	1,190	1,085	0,2450	0,0506	0,921	0,641	0,912
150	4,620	1,190	1,088	0,2420	0,0496	0,919	0,634	0,914
140	4,651	1,191	1,090	0,2401	0,0490	0,917	0,630	0,915
130	4,683	1,191	1,093	0,2381	0,0483	0,915	0,626	0,918
120	4,706	1,192	1,095	0,2370	0,0479	0,913	0,623	0,919
110	4,744	1,192	1,098	0,2345	0,0471	0,911	0,618	0,921
100	4,787	1,193	1,101	0,2320	0,0463	0,908	0,613	0,923
90	4,824	1,194	1,103	0,2299	0,0456	0,907	0,608	0,924
80	4,850	1,194	1,105	0,2284	0,0451	0,905	0,605	0,925

Таблица 7  
100% NaBr

T° К	Постоянные упругости $\times 10^{-11}$ дн/см <sup>2</sup>			Коэффициенты упругости $\times 10^{11}$ см <sup>2</sup> /дн			A	B
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>44</sub>	S <sub>11</sub>	-S <sub>12</sub>	S <sub>44</sub>		
300	3,965	1,129	0,995	0,2886	0,0639	1,005	0,702	0,881
290	4,002	1,148	0,998	0,2866	0,0638	1,002	0,699	0,872
280	4,035	1,151	1,002	0,2839	0,0632	0,998	0,695	0,870
270	4,042	1,156	1,004	0,2834	0,0630	0,996	0,694	0,869
260	4,073	1,159	1,006	0,2809	0,0623	0,994	0,690	0,867
250	4,100	1,163	1,007	0,2789	0,0616	0,993	0,686	0,866
240	4,132	1,165	1,010	0,2763	0,0608	0,990	0,681	0,866
230	4,191	1,170	1,013	0,2718	0,0592	0,987	0,670	0,865
220	4,223	1,175	1,015	0,2694	0,0587	0,985	0,666	0,864
210	4,231	1,177	1,017	0,2689	0,0585	0,983	0,665	0,864
200	4,268	1,183	1,020	0,2662	0,0578	0,980	0,661	0,862
190	4,300	1,189	1,022	0,2642	0,0572	0,978	0,657	0,859
180	4,365	1,196	1,025	0,2598	0,0559	0,976	0,647	0,857
170	4,368	1,198	1,026	0,2596	0,0558	0,975	0,646	0,856
160	4,432	1,206	1,028	0,2553	0,0546	0,973	0,638	0,853
150	4,438	1,209	1,031	0,2550	0,0545	0,970	0,637	0,852
140	4,472	1,212	1,036	0,2528	0,0539	0,965	0,636	0,852
130	4,500	1,219	1,038	0,2504	0,0534	0,960	0,633	0,851
120	4,538	1,221	1,040	0,2487	0,0527	0,961	0,627	0,851
110	4,571	1,225	1,043	0,2468	0,0522	0,959	0,623	0,851
100	4,637	1,223	1,045	0,2426	0,0508	0,957	0,613	0,850
90	4,652	1,231	1,046	0,2416	0,0505	0,956	0,611	0,849
80	4,708	1,243	1,048	0,2387	0,0499	0,954	0,605	0,843

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Шарко, А. А. Ботаки. Изв. вузов АН. «Физика». 6, 22, 1970.
2. А. В. Шарко, А. А. Ботаки. ФТТ, 5, 1559, 1970.
3. А. В. Шарко, А. А. Ботаки. ФТТ, 8, 2247, 1970.
4. А. В. Шарко, А. А. Ботаки. ФТТ, 9, 2701, 1970.
5. М. С. Иванкина. Диссертация. Томск, 1959.