УДК 531.3: 531.66

© 1999 р. В.Н. Балазюк

Чернівецький державний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці

АКУСТИЧНІ ТА РЕНТГЕН-ДИФРАКТОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АНГАРМОНІЙНИХ ЕФЕКТІВ У КРИСТАЛАХ НИЗЬКОЇ СИМЕТРІЇ

Експериментально досліджено вплив ангармонізму теплових коливань гратки на термопружні властивості низькосиметричних монокристалів. Показано, що аналіз анізотропії ангармонійності дозволяє передбачити аномальну поведінку деяких пружних модулів C_{ij} при всесторонньому стиску. Виходячи із відхилень від співвідношень Коші g_{kk}, обговорені питання про анізотропію пружності, пластичності і характер хімічних зв'язків у досліджуваних кристалах.

The influence of thermal lattice fluctuation anharmonizm on thermoelastic properties of low-symmetric single crystals is experimentally investigated in work. Is shown, that the analysis of anharmonizm anisotropy permits to anticipate abnormal behavior of some elastic modules C_{ij} at comprehensive compression. Proceeding from deviations from Cauchy-relation g_{kk}, questions about anisotropy of elasticity, plasticity and chemical connection character in researched crystals are shortly discussed.

Ангармонізм теплових коливань кристалічних граток, незалежно від типу хімічного зв'язку, впливає на всі, без винятку, фундаментальні фізичні властивості твердих тіл. Вивчення ангармонійних ефектів різними фізичними методами ініційовані українськими фізиками М.А. Кривоглазом, Є.А.Тихоновим, Я.Й.Дутчаком. Зокрема, дослідження акустичним і рентген-дифрактометричним методами на кафедрі ФТТ ЧДУ започатковані професором В.П.Михальченком і доцентами Є.І.Гешко і Б.М. Шарлаєм, в основному, для високосиметричних кристалів.

У роботі наведено результати досліджень ангармонійних ефектів у монокристалах ромбічної (йод, галій, антмонід кадмію та цинку), моноклінної (діарсенід цинку) та триклінної (мідний купорос) сингоній. Зокрема, CdSb, ZnSb, $ZnAs_2$ як перспективні напівпровідникові матеріали, а I_2, Ga й $CuSO_4\,5H_2O$ - модельні кристали з різним характером хімічного зв'язку.

Встановлено, що експериментальні залежності відносних інтегральних інтенсивностей рентгенівських інтерференцій $\ln\frac{I_T}{I_0}\frac{\lambda^2}{\sin^2\theta}=f(T)$ в області 78-300 К - спадаючі функції температури [1-6]. Відмінність у кутових коефіцієнтах свідчить про залежність рентгенівських характеристичних температур Θp_i від індексів відбиваючих площин внаслідок анізотропії теплових коливань гратки. Значення величин Θp_i та середньоквадратичних зміщень атомів $<U_i^2>$ (при кімнатній температурі) наведені у таблиці 1.

Порівнюючи Θp_i та $<U_i^2>$ з відповідними коефіцієнтами термічного розширення α_i, навединими у [1-6], можна побачити, що анізотропія вказаних величин визначається однозначно і добре погоджується зі структурою досліджуваних речовин. Максимальна жорсткість зв'язку $f=<m>\Theta_{p_i}^2$ відповідає напрямкам з мінімальним значенням α_i.

Вимірювання швидкостей поширення пружних хвиль υ_i (i=1÷18) різної поляризації та їх температурних залежностей здійснювались ультразвуковим методом з дискретною затримкою на частоті 10 МГц. Значення пружних параметрів досліджуваних кристалів наведені у [7-13,28]. Температурні залежності пружних модулів $C_{ij}(T)$ у межах точності експерименту – лінійні. У таблиці 2 наведені логарифмічні по-

Таблиця 1. Динамічні параметри. В кристалофізичній системі координат i=1 відповідає напрямку вздовж осі Ox_1.

Речовина	Θp_i,К			$<U_i^2>$, 10^{-17} м^2		
	i=1	2	3	i=1	2	3
I_2	81	92	108	-	-	-
Ga	310	280	298	6,45	7,85	7,02
CdSb	280	204	215	11,72	9,1	8,2
ZnSb	223	271	283	22,9	17,3	13,8
$ZnAs_2$	238	256	262	1,11	0,92	0,88

Таблиця 2. Експериментальні значення $d(\ln C_{ij})/dT$ та g_{kk} (в $10^{-3}\cdot K^{-1}$).

ij	$d(\ln Cij)/dT$			
	Ga	CdSb	ZnSb	$ZnAs_2$
11	-0,425	-0,316	-0,310	-0,128
22	-0,523	-0,396	-0,385	-0,138
33	-0,346	-0,221	-0,194	-0,119
44	-0,654	-0,481	-0,416	-0,162
55	-0,394	-0,510	-0,629	-0,123
66	-0,654	-0,742	-0,399	-0,131
12	0,041	0,305	-0,277	0,029
13	0,049	2,313	0,263	0,021
15	–	–	–	-0,135
23	–	–	–	0,434
25	–	–	–	-0,245
35	–	–	–	0,319
46	–	–	–	-0,135
$g_{11}=C_{23}-C_{44}$	-7,142	-0,184	-0,176	-2,045
$g_{22}=C_{13}-C_{55}$	-4,915	-2,123	-4,462	-1,731
$g_{33}=C_{12}-C_{66}$	-5,084	-3,236	-3,651	0,692
$g_{44}=C_{25}-C_{46}$	–	–	–	-2,083

хідні по температурі пружних модулів, а також відхилень від співвідношень Коші g_{kk}.

Аналіз даних таблиці 2 свідчить про посилення сил зв'язку у головних кристалографічних напряках, оскільки відповідні похідні від'ємні. Максимальне зростання жорсткості зв'язку спостерігається для Ga, а мінімальне – для $ZnAs_2$. Найбільш ізотропним кристалом виявився діарсенід цинку. Поясненням цього є той факт, що відношення: $\frac{d\ln C_{11}}{dT}:\frac{d\ln C_{22}}{dT}:\frac{d\ln C_{33}}{dT}=1{,}07:1{,}16:1$ близьке до одиниці.

Аномальна поведінка деяких $C_{ij}(T)$, що задовільняють умову $d(\ln C_{ij})/dT>0$, у загальному випадку не суперечить теорії температурної залежності модулів пружності [14]. Вона свідчить про те, що зі зниженням температури у гратках відповідних матеріалів має місце розм'якшення деяких акустичних мод коливань атомів.

З іншого боку, відхилення від співвідношень Коші g_{kk} – від'ємні, що свідчить про підсилення ковалентних зв'язків, особливо у Ga [15]. Останнє підтверджується низкою експериментальних робіт [16-17], в яких досліджувались процеси ковзання у галії та інших матеріапах у широкій області температур.

Порівнюючи значення α_i та Θ_i, $<U_i^2>$ і $d(\ln C_{ij})/dT$, наведених у таблицях 1,2, легко побачити їх узгодженість між собою. Відсутність наочної кореляції пружних властивостей і термічного розширення для галію, антмонідів кадмію та цинку не є несподіваноюДля складних структур, які володіють параметричними гратками, не існує явних співвідношень, які б зв'язували ці величини.

У таблиці 3 подана оцінка ангармонійності теплових коливань граток при кімнатній температурі, виходячи з узальненої міри ангармонійності $\gamma\beta$ (в одиницях $10^6\cdot K^{-1}$ [18] і баричного коефіцієнта інтенсивностей рентгенівських інтерференцій δ (10^2 кбар$^{-1}$) [19], що встановлюється співвідншенням: $\delta=\frac{\chi_V\gamma}{m\overline{\theta}_p^2V^{2/3}}$, де $\gamma=(\gamma_1+\gamma_2+\gamma_3)/3$ – середнє значення постійної Грюнайзена, β - коефіцієнт об'ємного термічного розширення, α_i, γ_i - компоненти тензора термічного розширення та тензора Грюнайзена, χ_V - об'ємна стискуванність, m - маса молекули, $\overline{\theta}_p^2$ - середнє значення рентгенівської характеристичної температури, V- молекулярний об'єм. У таблиці 3 також наведені пронормовані значення $\gamma\beta$ та δ досліджуваних матеріалів до відповідних значеннь діарсеніду цинку $\gamma\beta_0$ та δ_0.

Аналіз результатів показує, що ангармонізм теплових коливань граток кристалів суттєво відрізняється. Так, максимальна ангармонійність спостерігається у молекулярному кристалі I_2, а мінімальна – у кристалах з ковалентним характером зв'язку. Як бачимо, анізотропія ангармонійності теплових коливань гратки визначається однозначно і добре погоджується з відповідними значеннями Θp_i або $<U_i^2>$, а також із температурними залежностями пружних параметрів. Метали займають проміжне положення. Результати оцінки ангармонійності, проведені двома незалежними методами, добре погоджуються між собою. Повний збіг малоімовірний, оскільки

Таблиця 3. Числові дані оцінки ангармонійності теплових коливань граток.

	I_2	Ga	CdSb	ZnSb	$ZnAs_2$
$\gamma\beta$	429,97	97,74	34,02	39,32	15,36
$\gamma_1\alpha_1$	271,26	11,61	26,06	21,32	4,83
$\gamma_2\alpha_2$	115,50	51,38	9,99	14,30	4,51
$\gamma_3\alpha_3$	33,48	31,50	2,32	2,11	6,14
δ	0,412	0,151	0,041	0,032	0,011
$\gamma\beta/\gamma\beta_0$	28,6	15,4	2,2	2,60	1,0
δ/δ_0	37,4	13,7	3,73	2,91	1,0
$\mu\gamma$	0,70	0,41	0,30	0,25	0,17

завжди є відмінність між відповідними значеннями компонент тензора γ_i, визначених із даних термопружності та із результатів гідростатичних вимірів [20]. У випадку кристалів некубічних сингоній може виявитися суттєвим характер зміни періодів гратки a, b, c або їх відношень c/a, b/a, c/b при всесторонньому стискуванні або термічному розширенні. Для досліджуваних кристалів рівняння $\Delta(c/b)$ - ефектів має вигляд [21]:

$$\frac{d\ln(c/b)}{d\ln V}=\left(\frac{\partial\ln(c/b)}{\partial\ln V}\right)_p=\frac{\alpha_3-\alpha_2}{\beta}=A_{32},$$

$$\frac{d\ln(c/b)}{d\ln V}=\left(\frac{\partial\ln(c/b)}{\partial\ln V}\right)_T=\frac{\chi_3-\chi_2}{\beta}=\mathrm{X}_{32}.$$

Аналогічно можна записати рівняння для A_{31} і X_{31}, A_{21} і X_{21}, числові величини яких наведені у таблиці 4.

Деякі значення A_{ij} та X_{ij} мають різні знаки, що свідчить про можливу аномальну залежність відповідного модуля зсуву від тиску Наприклад, для галію та діарсеніду цинку це C_{55}, для антимонідів кадмию та цинку – C_{44}.

З метою перевірки цих передбачень у лабораторії високих тисків Інституту фізики твердого тіла СРСР нами досліджувались залежності пружних модулів антимоніду кадмию від тиску в області 0÷15 кбар ультразвуковим імпульсно-фазовим методом [11]. Результати досліджень однозначно підтвердили наше передбачення про аномальну поведінку C_{44} з тиском, оскільки $dC_{44}/dP>0$. Одночасно показано, що з ростом тиску стійкість вихідної гратки CdSb знижується. У загальному характер залежності пружних властивостей CdSb від тиску не відрізняється від характеру поведінки інших сполук [22], в яких під тиском відбува-ються поліморфні перетворення без розпаду на компоненти.

З іншого боку, для монокристалів можна очікувати кореляції ангармонійності теплових коливань з пластичністю. До даного часу пластичні властивості твердих тіл в основному описуються емпіричними залежностями. Представляє інтерес оцінювати пластичність кристалів з допомогою фізичних параметрів, які володіють певною універсальністю і не дуже сильно міняються у широких інтервалах температур та тисків. Френкелем, Канторовою та незалежно Джонсоном [24] було запропоновано прийняти добуток коефіцієнта Пуасона μ на параметр Грюнайзена γ за міру впливу ангармонізму коливань гратки на пластичність монокристалів. Кожний з множників представляє своєрідний "деформаційний ефект": γ - зміна частоти коливань гратки з деформацією, μ - відносне звуження кристалу при розтязі. Числові значення добутку наведені у таблиці 3. Як і варто було очікувати, найбільша пластичність проявляється у молекулярних кристалах, а найменша – у ковалентних.

Таблиця 4. Величини аксіальних ефектів.

	I_2	Ga	CdSb	ZnSb	$ZnAs_2$
A_{31}	-0,534	0,144	-0,531	-0,537	0,068
X_{31}	0,201	-0,11	-0,072	-0,017	-0,076
A_{32}	-0,261	-0,258	-0,142	-0,225	0,066
X_{32}	-0,214	-0,186	0,046	0,093	-0,09
A_{21}	-0,272	0,402	-0,388	-0,312	0,001
X_{31}	-0,013	0,076	-0,119	-0,11	0,013

Подальший розгляд стосується досліджень компонентів тензора пружних модулів низькосиметричних кристалів, як найменш вивчених. Пружні властивості триклінних кристалів описуються тензором четвертого рангу, який містить 21 незалежну компоненту C_{ij}. Для довільної декартової системи координат закон Гука може бути записаний:

$$T_{ij}=C_{ijkl}S_{kl}, \qquad (1)$$

де T_{ij} - однорідна напруга, S_{ij} - однорідна деформація. У позначеннях Фойгта [24] (1) перепишеться:

$$T_i=C_{ij}S_j. \qquad (2)$$

При такій системі позначень (2) включає 36 компонент тензора пружних модулів C_{ijkl}. З них 21 – незалежна, завдяки тому, що термодинамічний потенціал та пружня енергія мусять бути додатні, як необхідна умова збереження стабільності гратки.

Нами розроблена методика знаходження компонент тензора пружних модулів триклінних кристалів по експериментальним значенням швидкостей поширення пружних хвиль у різних кристалофізичних напрямках з використанням методу послідовних наближень [25].

Монокристали мідного купоросу належать до триклінної сингонії і вирощені з водного розчину. Досконаліть кристалів установлювалась рентгентопографічними й оптичними методами. Густина $CuSO_4\ 5H_2O$ визначена методом гідростатичного зважування і дорівнює 2,28 10^3 кг/м^3, що добре погоджується з літературними даними [26].

Для спрощення розрахунків незалежних компонент тензора C_{ij} виміри швидкостей поширен-

ня ультразвуку у кристалах υ_i (i=1÷20) здійснювались у кристалофізичних напрямках: [100], [010], [001], [110], [011], [101], [111]. Числові значення швидкостей, напрямки поширення, поляризація та мода коливань наведені у таблиці 5 (*QL*, *QS* – квазіпоздовжня і квазіпоперечна моди коливань).

Зауважимо, що внаслідок високої хімічної активності монокристалів мідного купоросу, використання кварцових датчиків зі срібним покриттям виявилось неефективним. Тому на кварцові пластинки пульверизаційним методом при температурі 700 К наносився напівпровідниковий шар SnO, який виявися досить стійким по відношенню до вищезгаданих кристалів і може успішно використовуватись для акустичних досліджень хімічно активних кристалів. Крім того, зразки мідного купоросу покривались тонким шаром колоїдального графіту, що забезпечувало поверхневу провідність.

У таблиці 6 наведені числові значення розрахованих нами незалежних компонент тензора пружних модулів при C_{ij} при кімнатній температурі.

Порівняльний аналіз значень C_{ij}, (таблиця 6) з відповідними значеннями у [26] виявляє добру узгодженість. Одночасно спостерігається чітко

Таблиця 5. Швидкості пружних хвиль υ_i.

υ_i	Напрямок розповсюдження	Поляризація	Мода коливань	Швидкість, 10^3 м/с
υ_1	[100]	[100]	*QL*	5,0132
υ_2	[100]	[010]	*QS*	2,2989
υ_3	[100]	[001]	*QS*	2,5762
υ_4	[010]	[010]	*QL*	3,9651
υ_5	[010]	[100]	*QS*	2,3102
υ_6	[010]	[001]	*QS*	2,6221
υ_7	[001]	[001]	*QL*	5,1033
υ_8	[001]	[100]	*QS*	2,5698
υ_9	[001]	[010]	*QS*	2,6882
υ_{10}	[101]	[101]	*QL*	4,4710
υ_{11}	[101]	[010]	*QS*	2,2380
υ_{12}	[101]	$[10\bar{1}]$	*QS*	2,2292
υ_{13}	[110]	[110]	*QL*	4,5248
υ_{14}	[110]	[001]	*QS*	2,3052
υ_{15}	[110]	$[1\bar{1}0]$	*QS*	2,3443
υ_{16}	[011]	[011]	*QL*	4,2338
υ_{17}	[011]	[100]	*QS*	2,5643
υ_{18}	[011]	$[01\bar{1}]$	*QS*	2,4482
υ_{19}	[111]	[111]	*QL*	4,6478
υ_{20}	[111]	[111]	*QS*	2,3228

Таблиця 6. Пружні модулі мідного купоросу.

ij	C_{ij}, ГПа	*ij*	C_{ij}, ГПа
11	5,729	15	-0,032
22	3,584	16	-0,232
33	5,937	24	-0,272
44	1,650	25	-0,016
55	1,509	26	-0,068
66	1,211	34	-0,084
12	2,046	35	-0,295
23	2,312	36	-0,082
13	3,214	45	-0.180
14	-0,401	46	0,124
		56	-0,348

виражена анізотропія пружності у монокристалах $CuSO_4 \cdot 5H_2O$. Максимальна жорсткість зв'язку проявляється у напрямку [001], а мінімальна – у [010], оскільки $\upsilon_3 > \upsilon_1 > \upsilon_2$ і, відповідно, $C_{33} > C_{11} > C_{22}$.

Числові значення відхилень від співвідношень Коші g_{kk} для кристалів мідного купоросу (в ГПа) такі:

$g_{11}=C_{23}-C_{44}=0{,}794$; $g_{44}=C_{14}-C_{56}=-0{,}052$;
$g_{22}=C_{13}-C_{55}=0{,}705$; $g_{55}=C_{25}-C_{46}=-0{,}040$;
$g_{33}=C_{12}-C_{66}=0{,}835$; $g_{66}=C_{45}-C_{36}=-0{,}098$.

Отже деякі g_{kk} – відмінні від нуля, а максимальне значення відповідає напрямку [001]. У напрямках, розміщених під кутом 45°, можна очікувати ковалентні зв'язки, оскільки $g_{44}, g_{55}, g_{66}<0$.

На завершення відзначимо, що значення величин C_{ij} дозволяє оцінити не тільки анізотропію пружності, але й зв'язок її зі структурою кристала (див., наприклад, [27]). Повноцінний аналіз дисперсійних співвідношень для акустичних фононів за даними нейтронної спектроскопії досить важко провести без залучення пружних модулів внаслідок низької роздільної здатності сучасних спектрометрів в області довгохвильових коливань гратки, де закон "дисперсії" по суті визначають C_{ij}. З огляду на це, виміряні нами значення швидкостей поширення пружних хвиль фактично містять незалежну інформацію, яка доповнює відповідні дані по розсіюванню теплових нейтронів

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Гешко Є.І., Михальченко В.П., Чорней С.О.* Про тем-пературну залежність інтенсивностей рентгенівських інтерференцій I_2 // УФЖ. - 1975. - **20**. - С.859-861.
2. *Гешко Е.И., Михальченко В.П., Шарлай Б.М.* Об анизотропии некоторых параметров динамики решетки Ga // УФЖ. - 1974. **19**. - С.106-111.

3. *Гешко Е.И., Михальченко В.П., Шарлай Б.М.* Анизотропия фактора Дебая-Валлера сурьмянистого кадмия // УФЖ. - 1971. - **15**. - С.2066-2067.
4. *Балазюк В.Н.,Гешко Е.И.,Грицюк Б.Н.,Раренко И.М Чорней С.А*. Влияние условий формирования монокристаллов антимонидов кадмия и цинка на совершенство структуры и термические свойства // Неорганические материалы. - 1988. - **24**. - С.1595-1596.
5. *Балазюк В.Н., Гешко Е.И., Михальченко В.П., Шарлай Б.М*. О температурной зависимости рентгеновских интерференций сурьмянистого цинка // УФЖ. - 1976. - **21** .- С.1739-1740.
6. *Балазюк В.Н., Богачев Г.Ю., Гешко Е.И., Маренкин С.Ф., Михальченко В.П. и др.* О температурной зависимости рентгеновских интерференций монокристаллов диарсенида цинка // ФТТ. - 1993. - **35**. - С.2845-2847.
7. *Балазюк В.Н., Михальченко В.П., Чорней С.О., Шарлай Б.М.* Пружні модулі I_2 // УФЖ. - 1975. - **20**. - С.772-775.
8. *Михальченко В.П., Раренко І.М., Шарлай Б.М.* Пружні модулі галію // УФЖ. - 1972. - **17**. - С.1191-1192.
9. *Балазюк В.Н., Гешко Е.И., Михальченко В.П., Шарлай Б.М.* Температурная зависимость модулей упругости галлия // ФММ. - 1978. - **42**. - С.854-859.
10. *Балазюк В.Н., Михальченко В.П., Раренко И.М., Шарлай Б.М*. Температурная зависимость упругих модулей CdSb // ФТТ. - 1976. - **18**. - С.2843-2845.
11. *Балазюк В.Н., Пересада Г.И., Раренко И.М.* О зависимости констант упругости CdSb от гидростатического давления // ФТТ. - 1978. - **20**. - С.2224-2225.
12. *Балазюк В.Н., Гешко Е.И., Грицюк Б.Н., Михальченко В.П., Шарлай Б.М.* Температурная зависимость компонент тензора упругих модулей ZnSb // Респ. межвед. Научно-технический сборник. Физическая електроника. - №19. - Львов: 1979. - С.34-41.
13. *Балазюк В.Н., Богачев Г.Ю., Курячий В.Я., Михальченко В.П. и др*. Упругие модули диарсенида цинка // ФТТ. - 1995. - **33**. - С.2777-2779.
14. *Лейбфрид Г., Людвиг В.* Теория ангармонических эффектов в кристаллах // М.: Иностранная литература, 1963.
15. *Haussuhl S.* Die Abweichungen von den Cauchy-Relation // Phis. Rondens. Mater. - 1967. - **6**. - S.181-192.
16. *Spooner F.J., Wilson C.G.* Twins in gallium // Nature.- 1963. - **198**. - P.1052-1053.
17. *Михальченко В.П., Кушта Г.П.* Визначення сталої Грюнайзена 12 %-го хромистого фериту рентгенографічним методом // УФЖ.- 1963. - **8**. - С.779-785.
18. *Михальченко В.П.* Про оцінку ангармонійності коливань гратки по баричному коефіцієнту інтенсивностей рентгенівських інтерференцій // УФЖ. - 1972. - **17**. - С.828-832.
19. *Hiki Y., Thomas J.F., Granato A.V.* Anharmoniciti in Noble Menals: Some Thermal properties // Phis. Rev. - 1967. - **153**. - P.764-771.
20. *Михальченко В.П., Шарлай Б.М.* Об анизотропии ангармоничности колебаний решетки CdSb // УФЖ. - 1973. - **18**. - С.677-679.
21. *Михальченко В.П.* Рентгендифрактометрические исследования некоторых ангармонических эффектов в кристаллах: Дис. ... док. физ.-мат. наук. – Черновцы, 1976.
22. *Peresada G.I., Ponyattovckii E.G.* Pressure dependence of the elastic constants of PbS // Phys. Stat. Sol. (A). - 1976. - **35**. - P.177-180.
23. *Канторова Т.А., Зонштайн Е.М.* О влияниии ангармоничности на процессы пластической деформации // Проблемы прочности. - 1975.- №6.-С255-261.
24. *Voigt W.* Lehrbuch der Kristallphysik. – Leipzig: B. Teubner, 1910, 1929, 1966 (Nachdruck).
25. *Neighbours J.R., Schacher G.E.* Determination of elastic constants from sound- velositi measurements in crystals of general symmetry // J. Appl. Physics. - 1967. - **38**. - P.5366-5375.
26. *Haussuhl S., Siegert H.* Destimmung des Elastizitat trikliner Kristall: Beispiel $CuSO_45H_2O$ // Z. für Kristallographik. - 1969. - **199**. - S.142-146.
27. *Михальченко В.П., Раренко И.М., Шарлай Б.М.* Об анизотропии упругости и термического расширения галлия // УФЖ. - 1973. - **18**. - С.218-221.
28. *Балазюк В.Н., Богачев Г.Ю., Гешко Е.И., Михальченко В.П., Раранский Н.Д.* Температурная зависимость упругих свойств диарсенида цинка // Кристаллография.-1998.-**43**.-С.92-93.