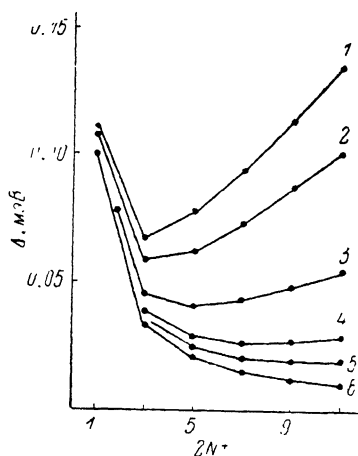


сунка следует, что величина щели в ИСР из кремния равна 0.1—0.15 мэВ, т. е. ИСР приводят нас в область сверхузкощелевых структур, которые другими методами получить вряд ли возможно.

Рассматриваемые эффекты можно экспериментально наблюдать, если уширение энергетических уровней в ИСР вследствие рассеяния на примеси или из-за температурного размытия будет заметно меньше, чем Δ_{2N+1} . Возьмем в (5) $d=100 \text{ \AA}$ и $N=0$, тогда $\Delta_1 \approx 0.1 \text{ мэВ}$ (в температурном эквиваленте $\sim 1.2 \text{ К}$). Следовательно, температура в эксперименте не должна превышать $\sim 0.5 \text{ К}$. Оценим влияние загрязнений. При технологически достижимой полной концентрации заряженной примеси



Зависимость величины энергетической щели Δ от номера зоны в ИСР $\text{Si}_{28}-\text{Si}_{30}$ при различных периодах ИСР.

Отношение периода ИСР к параметру решетки кремния, равному 5.4 \AA : 1 — 12, 2 — 14, 3 — 20, 4 — 30, 5 — 40, 6 — 100.

$\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ мы можем воспользоваться для оценки уширения энергетических уровней из-за рассеяния на примеси ΔE моделью Корнуэлла—Вайскопфа [3]. Получим $\Delta E \approx 0.01 \text{ мэВ}$, и, следовательно, при указанной концентрации примесей энергетическая щель в ИСР не будет заметно размыта.

Список литературы

- [1] Leiber L. // Phys. Rev. B. 1975. V. 12. N 10. P. 4443—4451.
- [2] Leiber L. // Phys. Rev. B. 1977. V. 16. N 2. P. 863—873.
- [3] Ридли Б. Квантовые процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1986. 304 с.

Институт атомной энергии
им. И. В. Курчатова
Москва

Поступило в Редакцию
9 ноября 1988 г.
В окончательной редакции
22 мая 1989 г.

УДК 548.0 : 539.37

Физика твердого тела, том 31, в. 10, 1989
Solid State Physics, vol. 31, N 10, 1989

АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ УПРУГИХ СВОЙСТВ ТЕТРАБОРАТА ЛИТИЯ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ

И. М. Сильвестрова, П. А. Сенющенко, В. А. Ломоносов, Ю. В. Писаревский

Кристаллы тетрабората лития $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (ТБЛ) в последнее время активно исследуются ввиду его перспективности для пьезотехники и акустоэлектроники [1, 2]. До недавнего времени температурные зависимости его упругих свойств были изучены в диапазоне температур -30 — $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ [1]. В работе [3] появились сообщения об упругих аномалиях скоростей продольных волн в направлениях X и Z при температуре около $-110 \text{ }^\circ\text{C}$. Недавно в [4] обнаружены скачки параметра ячейки ТБЛ вдоль оси Z. Эти скачки изменялись по величине и положению на температурной оси в зависимости от номера цикла охлаждения—нагрев.

Авторы [4] связывают скачки параметра ячейки с существованием не-соизмеримой фазы.

В настоящей работе измерены зависимости некоторых упругих параметров ТБЛ при термоциклировании. Средняя скорость изменения температуры при охлаждении и нагреве образца составляла $0.3^\circ/\text{мин}$. При этом однородность температуры по образцу составляла в процессе измерения скорости звука 0.01° , а относительная точность измерения скорости звука была не хуже 0.03% . Измерения проводились ультразвуковым методом на частотах $10\text{--}15$ МГц. В настоящей работе измерены температурные зависимости скоростей распространения продольных упругих волн по осям X и Z , а также сдвиговой волны по оси Z (рис. 1, 2). Аномалий температурных зависимостей скоростей продольных волн по осям X и Z , подобных описанным в [3], мы не наблюдали. Для скорости

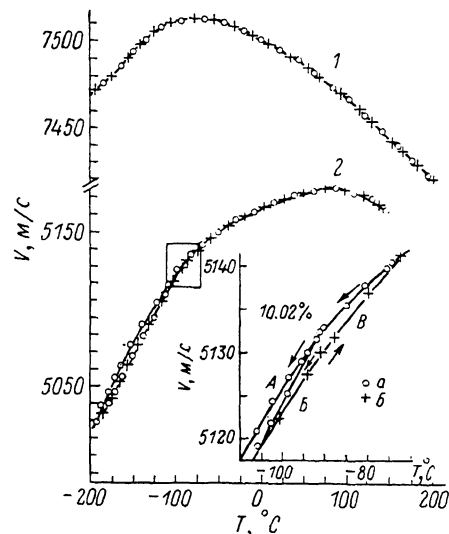


Рис. 1. Температурная зависимость скорости продольных звуковых волн в кристалле ТБЛ.

1 — волна в направлении X (V_{xx}), 2 — волна в направлении Z (V_{zz}). На вставке в увеличенном масштабе показан участок скачка температурного коэффициента скорости звука: А — первый цикл охлаждения, Б — второй цикл охлаждения, В — нагрев. Точки — эксперимент при охлаждении (а) и нагреве (б).

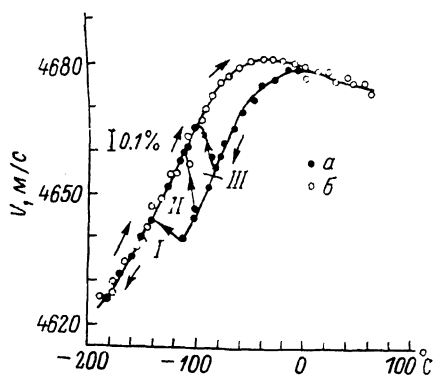


Рис. 2. Температурная зависимость скорости поперечной звуковой волны, распространяющейся вдоль оси Z (V_{zz}) в кристалле ТБЛ.

I — первый цикл охлаждения—нагрев, II — второй, III — третий. а — охлаждение, б — нагрев.

продольной волны по полярной оси (Z) (рис. 1) кривые охлаждения и нагрева первого цикла практически совпадают. При втором цикле наблюдается гистерезис в области температур $-100\div-195^\circ\text{C}$.

Температурный гистерезис скорости поперечной звуковой волны, распространяющейся по полярной оси, имеет иной характер (рис. 2). В процессе охлаждения при некоторой температуре скорость звука скачком возрастала на величину порядка 0.3% , а последующее охлаждение до азотных температур и нагрев до комнатных температур не меняли монотонного характера температурной зависимости скорости звука, причем при комнатной температуре скорость звука возвращалась к исходному значению. Последующие циклы имели подобный характер, но скачок происходил каждый раз при более высокой температуре, т. е. область температурного гистерезиса уменьшалась.

Обращает на себя внимание изменение знаков температурных коэффициентов для всех измеренных скоростей звука. Выше $+100^\circ\text{C}$ все они имеют нормальный характер ($TV < 0$). При температуре $+100^\circ\text{C}$ TV_{xx} меняет знак; TV_{zz} меняет знак при -100°C , а TV_{zz} — в области 0°C , причем TV_{zz} , кроме того, при -91°C при охлаждении меняется скачком

Упругие модули C_{ik} (10^{10} н/м²),
 модули упругой податливости S_{ik} (10^{-13} м²·Н⁻¹),
 пьезоэлектрические модули d_{ik} (10^{-12} К·Н⁻¹),
 пьезоэлектрические постоянные e_{ik} (К·м⁻²),
 коэффициенты электромеханической связи K_{ik} ,
 диэлектрические постоянные ϵ_{ik}/ϵ_0 тетрабората лития
 при комнатной температуре

Модуль	Наст. раб. *	[°]	Модуль	Наст. раб.	[°]
C_{11}^E	13.52	12.67	S_{11}^E	9.03	8.81
C_{12}^E	0.08	0.05	S_{12}^E	1.41	1.23
C_{13}^E	3.19	3.0	S_{13}^E	-6.11	-5.92
C_{33}^E	5.49	5.39	S_{33}^E	26.8	24.6
C_{44}^E	5.59	5.50	S_{44}^E	16.79	17.1
C_{66}^E	4.73	4.60	S_{66}^E	20.89	21.4
e_{15}	0.35	0.36	d_{15}	6.33	8.07
e_{31}	0.38	0.19	d_{31}	-2.017	-2.58
e_{33}	0.88	0.89	d_{33}	20.4	19.4
$\epsilon_{11}^I/\epsilon_0$	8.88	8.97	$\epsilon_{11}^I/\epsilon_0$	9.13	9.33
$\epsilon_{33}^I/\epsilon_0$	8.46	8.15	$\epsilon_{33}^I/\epsilon_0$	10.34	9.93
K_{31}	0.07	0.09	—	—	—
K_{33}	0.387	0.42	—	—	—
K_{15}	0.187	0.21	—	—	—
K_i	0.39	—	—	—	—

* Эти результаты получены на кристаллах, выращенных Я. В. Бураком.

с $9 \cdot 10^{-5}$ до $(15 \div 16) \cdot 10^{-5}$, а при нагреве это изменение происходит более плавно.

Комплекс электрофизических параметров ТБЛ, измеренных нами при комнатной температуре, приведен в таблице вместе с данными, опубликованными в работах [1, 2]. Анализ таблиц показывает, что упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические параметры кристаллов ТБЛ, полученных в разных лабораториях, хорошо воспроизводятся.

Несмотря на то что в настоящей работе одновременно с измерением скорости звука не проводились dilatометрические измерения, указанные выше аномалии нельзя отнести за счет возможных аномалий теплового расширения, так как, по нашему мнению, аномалии теплового расширения одинаково сказались бы как на продольной, так и на поперечной волне, что не наблюдается на опыте.

Отметим, что в отличие от [4], где скачки параметра ячейки наблюдались при нагреве, скачки скорости звука поперечной волны наблюдались нами только при охлаждении. Тем не менее наличие широкого температурного интервала гистерезиса скорости звука и изменяющиеся при термоциклировании температуры ее скачков, по нашему мнению, подтверждают высказанное в [4] предположение о существовании в ТБЛ несоизмеримой фазы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Shiozaki T., Adachi M., Kobayashi N., Azaki K., Kawabata A. // Jap. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. Suppl. 24—2. P. 25—27.
- [2] Emin C. D., Werner F. // Proc. 37 Annual Symposium on Frequency Control. 1983. P. 136—143.
- [3] Борман К. Я., Бурак Я. В. Актуальные проблемы физики и химии сегнетоэлектриков. Рига, ЛатвГУ, 1987. С. 140—144.
- [4] Зарецкий В. В., Бурак Я. В. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. № 4. С. 198—201.