

УДК 534.2

©1994

## УПРУГАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ОДНОРОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МОНОКРИСТАЛЛЕ $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$

*Б.П.Сорокин, П.П.Турчин, Д.А.Глушков*

Рассматривается распространение объемных акустических (ОАВ) волн малой амплитуды в пьезоэлектрике  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  при воздействии однородного механического давления  $P$ . Экспериментально определено, что зависимости скоростей упругих волн от  $P$  имеют линейный характер. Получены 24 коэффициента управления скоростью объемных акустических волн давлением и рассчитаны все 14 нелинейных модулей упругости данного материала. Проанализированы особенности распространения объемных акустических волн в монокристалле  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  при воздействии  $P$ .

Начиная с конца 50-х годов и по настоящее время возникла и продолжает оставаться актуальной тематика исследований нелинейных (макроскопических) свойств кристаллов. Анализ распространения объемных акустических волн (ОАВ) малой амплитуды в монокристаллах с малой нелинейностью в условиях статических внешних воздействий позволяет предсказать, что зависимости скоростей упругих волн от величин таких воздействий имеют линейный характер [1,2]. В этих работах показано, что изменения скоростей ОАВ при приложении однородного внешнего электрического поля или механического напряжения анизотропны и определяются тензорами нелинейных электро-механических свойств (НЭМС) кристаллов (нелинейные упругие, пьезоэлектрические, диэлектрические и электрострикционные постоянные) в линейном по величине воздействия приближении.

Естественно, что знание полного набора НЭМС позволяет определять срезы кристаллов с оптимальным сочетанием электро-механических свойств для использования в устройствах акустоэлектроники.

НЭМС пьезоэлектриков изучены в полном объеме для кристаллов со структурой силленита [2], ниобата лития [3]. Вместе с тем перспективным материалом для пьезотехники и акустоэлектроники является монокристалл  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ , который относится к точечной группе симметрии 32, обладает термостабильными направлениями для распространения ОАВ и большим, чем у кварца, коэффициентом электро-механической связи (КЭМС) [4,5]. Ранее нами были опубликованы результаты экспериментальных исследований влияния постоянно-го электрического поля на распространение ОАВ в данном кристалле [6]. Ниже приводятся результаты исследований упругой нелинейности этого кристалла.

# 1. Распространение ОАВ в кристаллах точечной симметрии 32 под действием статического механического напряжения

Теория распространения ОАВ в пьезокристаллах, подвергнутых влиянию статических механических напряжений, приведена в [2]. Для анализа необходимых в измерениях направлений и срезов будем использовать модифицированный тензор Грина-Кристоффеля в виде

$$\Gamma_{BC}^*(\tau) = \left[ C_{ABCD}^\epsilon + \left( \delta_{KA}\delta_{LD}\delta_{BC} + 2C_{ABFD}^\epsilon S_{FKL}^\epsilon + C_{ABCDQR}^\epsilon S_{QRKL}^\epsilon \right) \tau_{KL} \right] N_A N_D, \quad (1)$$

где  $C_{ABCD}^\epsilon$  — модули упругости 2-го порядка (УППП),  $S_{QRKL}^\epsilon$  — модули упругой податливости 2-го порядка,  $C_{ABCDQR}^\epsilon$  — нелинейные упругие постоянные (модули упругости 3-го порядка — УППП),  $N_A$  — компоненты единичного вектора: распространения волны,  $\tau_{KL}$  — тензор механических напряжений.

Соотношение (1) записано в предположении малой линейной зависимости эффективных упругих постоянных от  $\tau$ , причем рассмотрены только направления для распространения волн без продольной пьезоактивности. Последнее обстоятельство позволяет значительно упростить расчетные для УППП соотношения.

Решая задачу на собственные значения и собственные векторы тензора  $\Gamma_{BC}^*$

$$(\Gamma_{BC}^* - \delta_{BC}\rho_0 V^2) U_C = 0, \quad (2)$$

получаем необходимые для определения нелинейных модулей упругости выражения  $\lambda_i = \rho_0 V_i^2(\mathbf{P})$ , где  $\rho_0$  — плотность кристалла относительно исходного (недеформированного) состояния,  $\mathbf{P}$  — величина механического давления. Результаты расчетов и измерений удобно сопоставлять, если ввести величины

$$\alpha_{V_i} = \frac{1}{V_i(0)} \left( \frac{\Delta V_i}{\Delta \mathbf{P}} \right)_{\Delta \mathbf{P} \rightarrow 0} \quad (3)$$

— так называемые коэффициенты управления скоростью ОАВ давлением. Явный вид этих выражений для кристаллов точечной группы симметрии 32 и продольно-непьезоактивных волн приводится в табл. 1, 2. Анализ табл. 1 позволяет сказать, что приведенный набор уравнений представляет собой переопределенную систему уравнений относительно 14 независимых модулей УППП, соответствующих классу симметрии 32. Это обстоятельство было использовано для минимизации погрешностей определения УППП.

Выражения для  $\alpha_{V_i}^r$  кристаллов точечной группы симметрии 32

$V_i$	Мода	N	U	P	$\alpha_{V_i}^r = \frac{1}{V_i(0)} \frac{dV_i}{dP}$
1	2	3	4	5	6
$V_1$	QL	[001]		[100]	$\frac{1}{2\lambda_1(0)} \alpha_{33}^{33}$
$V_2$	S	[001]	[100]	[100]	$\frac{1}{2\lambda_2(0)} \alpha_{33}^{11}$
$V_3$	QS	[001]		[100]	$\frac{1}{2\lambda_3(0)} \alpha_{33}^{22}$
$V_4$	QL	[001]		[010]	$\frac{1}{2\lambda_4(0)} \beta_{33}^{33}$
$V_5$	S	[001]	[100]	[010]	$\frac{1}{2\lambda_5(0)} \beta_{33}^{11}$
$V_6$	QS	[001]		[010]	$\frac{1}{2\lambda_6(0)} \beta_{33}^{22}$
$V_7$	S	[100]		[010]	$\frac{1}{4\lambda_7(0)} \left( \beta_{11}^{22} + \beta_{11}^{33} + A (\beta_{11}^{22} - \beta_{11}^{33}) + \right.$ $\left. + B (\beta_{11}^{23} + \beta_{11}^{32}) \right)$
$V_8$	S	[100]		[010]	$\frac{1}{4\lambda_8(0)} \left( \beta_{11}^{22} + \beta_{11}^{33} - A (\beta_{11}^{22} - \beta_{11}^{33}) - \right.$ $\left. - B (\beta_{11}^{23} + \beta_{11}^{32}) \right)$
$V_9$	S	[100]		[001]	$\frac{1}{4\lambda_9(0)} \left( \gamma_{11}^{22} + \gamma_{11}^{33} + A (\gamma_{11}^{22} - \gamma_{11}^{33}) + \right.$ $\left. + B (\gamma_{11}^{23} + \gamma_{11}^{32}) \right)$
$V_{10}$	S	[100]		[001]	$\frac{1}{4\lambda_{10}(0)} \left( \gamma_{11}^{22} + \gamma_{11}^{33} - A (\gamma_{11}^{22} - \gamma_{11}^{33}) - \right.$ $\left. - B (\gamma_{11}^{23} + \gamma_{11}^{32}) \right)$
$V_{11}$	QL	[010]		[100]	$\frac{1}{4\lambda_{11}(0)} \left( \alpha_{22}^{22} + \alpha_{22}^{33} + D (\alpha_{22}^{22} - \alpha_{22}^{33}) + \right.$ $\left. + E (\alpha_{22}^{23} + \alpha_{22}^{32}) \right)$
$V_{12}$	QS	[010]		[100]	$\frac{1}{4\lambda_{12}(0)} \left( \alpha_{22}^{22} + \alpha_{22}^{33} - D (\alpha_{22}^{22} - \alpha_{22}^{33}) - \right.$ $\left. - E (\alpha_{22}^{23} + \alpha_{22}^{32}) \right)$
$V_{13}$	QL	[010]		[001]	$\frac{1}{4\lambda_{13}(0)} \left( \gamma_{22}^{22} + \gamma_{22}^{33} + D (\gamma_{22}^{22} - \gamma_{22}^{33}) + \right.$ $\left. + E (\gamma_{22}^{23} + \gamma_{22}^{32}) \right)$
$V_{14}$	QS	[010]		[001]	$\frac{1}{4\lambda_{14}(0)} \left( \gamma_{22}^{22} + \gamma_{22}^{33} - D (\gamma_{22}^{22} - \gamma_{22}^{33}) - \right.$ $\left. - E (\gamma_{22}^{23} + \gamma_{22}^{32}) \right)$

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
$V_{15}$	$QL$	$\left[0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right]$		[100]	$\frac{1}{8\lambda_{15}(0)} \left[ (1+F) (\alpha_{22}^{22} + \alpha_{23}^{22} + \alpha_{33}^{22}) + (1-F) (\alpha_{22}^{33} + \alpha_{23}^{33} + \alpha_{33}^{33}) + G (\alpha_{22}^{23} + \alpha_{23}^{23} + \alpha_{33}^{23} + \alpha_{22}^{32} + \alpha_{23}^{32} + \alpha_{33}^{32}) \right]$
$V_{16}$	$QS$	$\left[0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right]$		[100]	$\frac{1}{8\lambda_{16}(0)} \left[ (1-F) (\alpha_{22}^{22} + \alpha_{23}^{22} + \alpha_{33}^{22}) + (1+F) (\alpha_{22}^{33} + \alpha_{23}^{33} + \alpha_{33}^{33}) - G (\alpha_{22}^{23} + \alpha_{23}^{23} + \alpha_{33}^{23} + \alpha_{22}^{32} + \alpha_{23}^{32} + \alpha_{33}^{32}) \right]$
$V_{17}$	$QL$	$\left[0, -\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right]$		[100]	$\frac{1}{8\lambda_{17}(0)} \left[ (1+K) (\alpha_{22}^{22} - \alpha_{23}^{22} + \alpha_{33}^{22}) + (1-K) (\alpha_{22}^{33} - \alpha_{23}^{33} + \alpha_{33}^{33}) - M (\alpha_{22}^{23} - \alpha_{23}^{23} + \alpha_{33}^{23} + \alpha_{22}^{32} - \alpha_{23}^{32} + \alpha_{33}^{32}) \right]$
$V_{18}$	$QS$	$\left[0, -\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right]$		[100]	$\frac{1}{8\lambda_{18}(0)} \left[ (1-K) (\alpha_{22}^{22} - \alpha_{23}^{22} + \alpha_{33}^{22}) + (1+K) (\alpha_{22}^{33} - \alpha_{23}^{33} + \alpha_{33}^{33}) - M (\alpha_{22}^{23} - \alpha_{23}^{23} + \alpha_{33}^{23} + \alpha_{22}^{32} - \alpha_{23}^{32} + \alpha_{33}^{32}) \right]$
$V_{19}$	$S$	[100]		[100]	$\frac{1}{4\lambda_{19}(0)} \left( (1+A)\alpha_{11}^{22} + (1-A)\alpha_{11}^{33} + B(\alpha_{11}^{23} + \alpha_{11}^{32}) \right)$
$V_{20}$	$S$	[100]		[100]	$\frac{1}{4\lambda_{20}(0)} \left( (1-A)\alpha_{11}^{22} + (1+A)\alpha_{11}^{33} - B(\alpha_{11}^{23} + \alpha_{11}^{32}) \right)$
$V_{21}$	$QL$	[010]		[010]	$\frac{1}{4\lambda_{21}(0)} \left( (1+D)\beta_{22}^{22} + (1-D)\beta_{22}^{33} + E(\beta_{22}^{23} + \beta_{22}^{32}) \right)$
$V_{22}$	$QS$	[010]		[010]	$\frac{1}{4\lambda_{22}(0)} \left( (1-D)\beta_{22}^{22} + (1+D)\beta_{22}^{33} - E(\beta_{22}^{23} + \beta_{22}^{32}) \right)$
$V_{23}$	$L$	[001]		[001]	$\frac{1}{2\lambda_{23}(0)} \gamma_{33}^{33}$
$V_{24}$	$S$	[001]		[001]	$\frac{1}{2\lambda_{24}(0)} \gamma_{33}^{11}$

## Обозначения, принятые в табл. 1

$$\begin{aligned}
\alpha_{33}^{11} &= (2C_{44} + C_{155})S_{11} + C_{144}S_{12} - C_{444}S_{14} + C_{344}S_{13} \\
\alpha_{33}^{22} &= (2C_{44} + C_{155})S_{12} + C_{144}S_{11} + C_{444}S_{14} + C_{344}S_{13} \\
\alpha_{33}^{23} &= C_{44}S_{14} + C_{134}(S_{11} - S_{12}) + C_{344}S_{14} \\
\alpha_{33}^{32} &= C_{33}S_{14} + C_{134}(S_{11} - S_{12}) + C_{344}S_{14} \\
\alpha_{33}^{33} &= 2C_{33}S_{13} + C_{133}(S_{12} + S_{11}) + C_{333}S_{13} \\
\alpha_{22}^{22} &= 2C_{11}S_{12} - C_{14}S_{14} + (C_{111} + C_{112} - C_{222})S_{11} + C_{222}S_{12} - \\
&\quad - (C_{114} + 2C_{124})S_{14} + C_{113}S_{13} \\
\alpha_{22}^{23} &= C_{11}S_{14} - 2C_{14}S_{13} + C_{124}S_{11} - (C_{114} + 2C_{124})S_{12} + C_{155}S_{14} - C_{134}S_{13} \\
\alpha_{22}^{32} &= C_{44}S_{14} - 2C_{14}S_{12} + C_{124}S_{11} - (C_{114} + 2C_{124})S_{12} + C_{155}S_{14} - C_{134}S_{13} \\
\alpha_{22}^{33} &= \beta_{11}^{33} = 2C_{44}S_{13} - C_{14}S_{14} + C_{144}S_{11} + C_{155}S_{12} + C_{444}S_{14} + C_{344}S_{13} \\
\alpha_{23}^{22} &= (C_{13} + C_{44})S_{14} - 4C_{14}S_{12} + 2C_{124}S_{11} - 2(C_{114} + 2C_{124})S_{12} + \\
&\quad + 2C_{155}S_{14} - 2C_{134}S_{13} \\
\alpha_{23}^{23} &= 2(C_{13} + C_{44})S_{13} - 2C_{14}S_{14} + (C_{123} + C_{144})S_{11} + (C_{113} + C_{155})S_{12} + \\
&\quad + (C_{444} - C_{134})S_{14} + (C_{133} + C_{344})S_{13} \\
\alpha_{23}^{32} &= 2(C_{44} + C_{13})S_{12} + (C_{123} + C_{144})S_{11} + (C_{113} + C_{155})S_{12} + \\
&\quad + (C_{444} - C_{134})S_{14} + (C_{133} + C_{344})S_{13} \\
\alpha_{23}^{33} &= (C_{44} + C_{13})S_{14} + 2C_{134}(S_{11} - S_{12}) + 2C_{344}S_{14} \\
\alpha_{11}^{22} &= 1 + 2C_{66}S_{12} + C_{14}S_{14} + \frac{1}{4}(3C_{222} - 2C_{111} - C_{112})S_{11} + \\
&\quad + \frac{1}{4}(2C_{111} - C_{112} - C_{222})S_{12} + C_{124}S_{14} + \frac{1}{2}(C_{113} - C_{123})S_{13} \\
\alpha_{11}^{23} &= C_{66}S_{14} + 2C_{14}S_{13} + \frac{1}{2}(C_{114} + 3C_{124})S_{11} + \frac{1}{2}(C_{114} - C_{124})S_{12} + \\
&\quad + (C_{155} - C_{144})S_{14} + C_{134}S_{13} \\
\alpha_{11}^{32} &= 2C_{14}S_{12} + C_{44}S_{14} + \frac{1}{2}(C_{114} + 3C_{124})S_{11} + \frac{1}{2}(C_{114} - C_{124})S_{12} + \\
&\quad + (C_{155} - C_{144})S_{14} + C_{134}S_{13} \\
\alpha_{11}^{33} &= 1 + C_{14}S_{14} + 2C_{44}S_{13} + C_{155}S_{11} + C_{144}S_{12} - C_{444}S_{14} + C_{344}S_{13} \\
\beta_{11}^{22} &= 2C_{66}S_{11} - C_{14}S_{14} + \frac{1}{4}(3C_{222} - 2C_{111} - C_{112})S_{12} + \\
&\quad + \frac{1}{4}(2C_{111} - C_{112} - C_{222})S_{11} - C_{124}S_{14} + \frac{1}{2}(C_{113} - C_{123})S_{13} \\
\beta_{11}^{23} &= 2C_{14}S_{13} - C_{66}S_{14} + \frac{1}{2}(C_{114} + 3C_{124})S_{12} + \\
&\quad + \frac{1}{2}(C_{114} - C_{124})S_{11} - (C_{155} - C_{144})S_{14} + C_{134}S_{13} \\
\beta_{11}^{32} &= 2C_{14}S_{11} - C_{44}S_{14} + \frac{1}{2}(C_{114} + 3C_{124})S_{12} + \\
&\quad + \frac{1}{2}(C_{114} - C_{124})S_{11} - (C_{155} - C_{144})S_{14} + C_{134}S_{13} \\
\beta_{33}^{11} &= (2C_{44} + C_{155})S_{12} + C_{144}S_{11} + C_{444}S_{14} + C_{344}S_{13} \\
\beta_{33}^{22} &= 2C_{44}S_{11} + C_{155}S_{13} + C_{144}S_{12} - C_{444}S_{14} + C_{344}S_{13} \\
\beta_{33}^{33} &= 2C_{33}S_{13} + C_{133}(S_{12} + S_{11}) + C_{333}S_{13} \\
\beta_{22}^{22} &= 1 + 2C_{11}S_{11} + C_{14}S_{14} + (C_{111} + C_{112} - C_{222})S_{12} + C_{222}S_{11} + \\
&\quad + (C_{114} + 2C_{124})S_{14} + C_{113}S_{13} \\
\beta_{22}^{23} &= -C_{11}S_{14} - 2C_{14}S_{13} + C_{124}S_{12} - (C_{114} + 2C_{124})S_{11} - C_{155}S_{14} - C_{134}S_{13} \\
\beta_{22}^{32} &= -2C_{14}S_{11} - C_{44}S_{14} + C_{124}S_{12} - (C_{114} + 2C_{124})S_{11} - C_{155}S_{14} - C_{134}S_{13}
\end{aligned}$$

$$\beta_{22}^{32} = 1 + C_{14}S_{14} + 2C_{44}S_{13} + C_{144}S_{12} + C_{155}S_{11} - C_{444}S_{14} + C_{344}S_{13}$$

$$\gamma_{11}^{22} = 2C_{66}S_{13} + \frac{1}{2}(C_{222} - C_{112})S_{13} + \frac{1}{2}(C_{113} - C_{123})S_{33}$$

$$\gamma_{11}^{23} = -\gamma_{22}^{23} = 2C_{14}S_{33} + (C_{114} + C_{124})S_{13} + C_{134}S_{33}$$

$$\gamma_{11}^{32} = -\gamma_{22}^{32} = 2C_{14}S_{13} + (C_{114} + C_{124})S_{13} + C_{134}S_{33}$$

$$\gamma_{11}^{33} = \gamma_{22}^{33} = 2C_{44}S_{33} + (C_{155} + C_{144})S_{13} + C_{344}S_{33}$$

$$\gamma_{22}^{22} = 2C_{11}S_{13} + (C_{111} + C_{112})S_{13} + C_{113}S_{33}$$

$$\gamma_{33}^{11} = 1 + 2C_{44}S_{13} + (C_{155} + C_{144})S_{13} + C_{344}S_{33}$$

$$\gamma_{33}^{33} = 1 + 2C_{33}S_{33} + 2C_{133}S_{13} + C_{333}S_{33}$$

$$A = \frac{C_{66} - C_{44}}{\left((C_{66} - C_{44})^2 + 4C_{14}^2\right)^{1/2}}, \quad B = \frac{2C_{14}}{\left((C_{66} - C_{44})^2 + 4C_{14}^2\right)^{1/2}}$$

$$D = \frac{C_{11} - C_{14}}{\left((C_{11} - C_{44})^2 + 4C_{14}^2\right)^{1/2}}, \quad E = \frac{-2C_{14}}{\left((C_{11} - C_{44})^2 + 4C_{14}^2\right)^{1/2}}$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{C_{11} - 2C_{14} - C_{33}}{\left(\frac{1}{4}(C_{11} - 2C_{14} - C_{33})^2 + (C_{13} + C_{44} - C_{14})^2\right)^{1/2}}$$

$$G = \frac{C_{13} + C_{44} - C_{14}}{\left(\frac{1}{4}(C_{11} - 2C_{14} - C_{33})^2 + (C_{13} + C_{44} - C_{14})^2\right)^{1/2}}$$

$$K = \frac{1}{2} \frac{C_{11} + 2C_{14} - C_{33}}{\left(\frac{1}{4}(C_{11} + 2C_{14} - C_{33})^2 + (C_{13} + C_{44} + C_{14})^2\right)^{1/2}}$$

$$M = \frac{-(C_{13} + C_{44} + C_{14})}{\left(\frac{1}{4}(C_{11} + 2C_{14} - C_{33})^2 + (C_{13} + C_{44} + C_{14})^2\right)^{1/2}}$$

$$\lambda_1(0) = \lambda_4(0) = \lambda_{23}(0) = C_{33}, \quad \lambda_2(0) = \lambda_3(0) = \lambda_5(0) = \lambda_6(0) = \lambda_{24}(0) = C_{44}$$

$$\lambda_7(0) = \lambda_9(0) = \lambda_{19}(0) = \frac{1}{2}(C_{44} + C_{66}) + \frac{1}{2}\left((C_{44} - C_{66})^2 + 4C_{14}^2\right)^{1/2}$$

$$\lambda_8(0) = \lambda_{10}(0) = \lambda_{20}(0) = \frac{1}{2}(C_{44} + C_{66}) - \frac{1}{2}\left((C_{44} - C_{66})^2 + 4C_{14}^2\right)^{1/2}$$

$$\lambda_{11}(0) = \lambda_{13}(0) = \lambda_{21}(0) = \frac{1}{2}(C_{11} + C_{44}) + \frac{1}{2}\left((C_{11} - C_{44})^2 + 4C_{14}^2\right)^{1/2}$$

$$\lambda_{12}(0) = \lambda_{14}(0) = \lambda_{22}(0) = \frac{1}{2}(C_{11} + C_{44}) - \frac{1}{2}\left((C_{11} - C_{44})^2 + 4C_{14}^2\right)^{1/2}$$

$$\lambda_{15}(0) = \frac{1}{4}(C_{11} - 2C_{14} + 2C_{44} + C_{33}) + \frac{1}{4}\left((2C_{14} - C_{11} + C_{33})^2 + 4(C_{13} + C_{44} - C_{14})^2\right)^{1/2}$$

$$\lambda_{16}(0) = \frac{1}{4}(C_{11} - 2C_{14} + 2C_{44} + C_{33}) - \frac{1}{4}\left((2C_{14} - C_{11} + C_{33})^2 + 4(C_{13} + C_{44} - C_{14})^2\right)^{1/2}$$

$$\lambda_{17}(0) = \frac{1}{4}(C_{11} + 2C_{14} + 2C_{44} + C_{33}) + \frac{1}{4}\left((2C_{14} + C_{11} - C_{33})^2 + 4(C_{13} + C_{44} + C_{14})^2\right)^{1/2}$$

$$\lambda_{18}(0) = \frac{1}{4}(C_{11} + 2C_{14} + 2C_{44} + C_{33}) - \frac{1}{4}\left((2C_{14} + C_{11} - C_{33})^2 + 4(C_{13} + C_{44} + C_{14})^2\right)^{1/2}$$

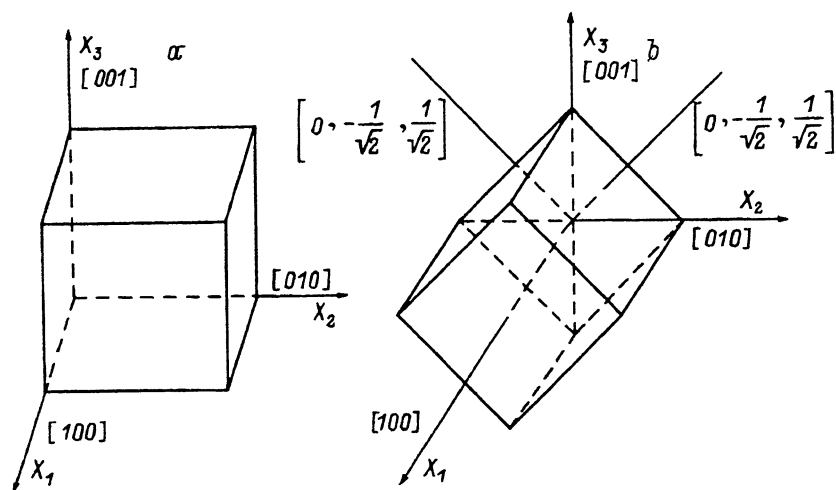
## 2. Эксперимент

Для экспериментальных исследований нами использовались импульсная ультразвуковая установка (30 МГц) с чувствительностью не хуже  $10^{-6}$  и система приложения одноосного давления [2]. В эксперименте использовались кристаллографически ориентированные образцы в виде параллелепипедов с размерами приблизительно  $20 \times 20 \times 20$  мм (см. рисунок). Точность ориентировки контролировалась с помощью рентгеновского дифрактометра УРС-25И и составляла не хуже  $\pm 2$  угловых минут. Плоскопараллельность образцов не хуже  $\pm 1 \mu/\text{см}$ , что удовлетворяло точности эксперимента и проверялось путем сканирования однородности возникающих по образцу напряжений непосредственно в ходе акустического эксперимента. Изменения механического давления в пределах  $0 \div 125 \cdot 10^5$  Ра приводили к обратимой линейной зависимости скоростей всех исследованных волн. Такой характер экспериментальных зависимостей позволил вычислить экспериментальные значения коэффициентов [3] (принято, что механические напряжения сжатия отрицательны). Результаты приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты управления  $\alpha_{V_i}^T$  для монокристалла  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$

$V_i$	Мода	N	U	P	$V_i(0), \text{m/s}$	$\alpha_{V_i}^T, 10^{-12} \text{ m/N}$
$V_1$	QL	[001]		[100]	6746.7	-2.8
$V_2$	S	[001]	[100]	[100]	3052.2	-6.3
$V_3$	QS	[001]		[100]	3052.2	12.0
$V_4$	QL	[001]		[010]	6746.7	-2.8
$V_5$	S	[001]	[100]	[010]	3052.2	12.0
$V_6$	QS	[001]		[010]	3052.2	-6.3
$V_7$	S	[100]		[010]	3311.5	1.3
$V_8$	S	[100]		[010]	2379.6	15.5
$V_9$	S	[100]		[001]	3311.5	-3.6
$V_{10}$	S	[100]		[001]	2379.6	-3.9
$V_{11}$	QL	[010]		[100]	5755.3	5.4
$V_{12}$	QS	[010]		[100]	3009.9	16.4
$V_{13}$	QL	[010]		[001]	5755.3	1.0
$V_{14}$	QS	[010]		[001]	3009.9	-10.1
$V_{15}$	QL	$\left[0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right]$		[100]	6312.8	-0.5
$V_{16}$	QS	$\left[0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right]$		[100]	3332.0	-3.7
$V_{17}$	QL	$\left[0, -\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right]$		[100]	5963.3	10.4
$V_{18}$	QS	$\left[0, -\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right]$		[100]	3231.2	1.5
$V_{19}$	S	[100]		[100]	3311.5	-8.3
$V_{20}$	S	[100]		[100]	2379.6	-29.4
$V_{21}$	QL	[010]		[010]	5755.3	-12.2
$V_{22}$	QS	[010]		[010]	3009.9	-19.2
$V_{23}$	L	[001]		[001]	6746.7	-8.2
$V_{24}$	S	[001]		[001]	3052.2	-16.3



Ориентация образцов для измерений.

*a* — с главными кристаллографическими направлениями, *b* — образец повернут на 45° относительно оси  $X_1$  (выбор направления  $[1, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}]$  осуществляется исходя из условия  $C_{14} < 0$  [6]).

Таблица 4  
Упругие постоянные III порядка монокристалла  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  при 25 °С

$C_{\lambda\mu\nu}$	$\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$		$\text{SiO}_2$ [1]
	$10^{10}, \text{ N/m}^2$	абсолютная погрешность $10^{10}, \text{ N/m}^2$	$10^{10}, \text{ N/m}^2$
$C_{111}$	-97.2	0.5	-21.0
$C_{112}$	0.7	0.1	-34.5
$C_{113}$	-11.6	0.3	1.3
$C_{114}$	-2.2	0.3	-16.3
$C_{123}$	0.9	0.2	-29.4
$C_{124}$	-2.8	0.1	-1.5
$C_{133}$	-72.1	0.5	-31.2
$C_{134}$	-4.1	0.1	0.2
$C_{144}$	-4.0	0.2	-13.4
$C_{155}$	-19.8	0.4	-20.0
$C_{222}$	-96.5	0.3	-33.2
$C_{333}$	-183.4	0.7	-81.5
$C_{344}$	-38.9	0.3	-11.0
$C_{444}$	20.2	0.7	-27.6



### 3. Обсуждение результатов

Приведенные в табл. 3 данные были использованы для расчета на ЭВМ по соотношениям табл. 1, 2 коэффициентов УППП (табл. 4). Процедура решения переопределенной системы уравнений и определения ошибок компонент подробно излагается авторами [1]. В расчете также использованы полученные ранее нами величины УППП [6].

Полученные значения компонент УППП  $C_{111}$ ,  $C_{222}$ ,  $C_{333}$  значительно превосходят аналогичные модули для кварца, что качественно можно объяснить тем, что в кристаллах  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  значительно (в 2-3 раза) больше упругие постоянные II порядка, такие как  $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$ .

Легко проанализировать особенности распространения ОАВ, возникающие в условиях приложения поля однородных статических напряжений, с помощью табл. 1 и 4. Изменения в акустических свойствах такого напряженного кристалла являются, конечно, следствием изменения симметрии среды при воздействии. Действительно, приложение  $\mathbf{P} \parallel [100]$  (ось симметрии 2-го порядка невозмущенного кристалла) понижает эффективную симметрию кристалла до моноклинной (класс симметрии 2) согласно принципу Кюри. Следствием этого является снятие вырождения для скоростей сдвиговых волн, распространяющихся вдоль направления  $[001]$  (ось симметрии 3-го порядка, являющаяся акустической осью для невозмущенного кристалла). Экспериментально на это обстоятельство указывают величины коэффициентов управления для мод  $V_2$  и  $V_3$ . Аналогичный эффект снятия вырождения вследствие смещения исходной акустической оси конического типа происходит и для ситуации  $\mathbf{P} \parallel [010]$ ,  $\mathbf{N} \parallel [001]$ , однако симметрия среды понижается до триклинной, класс симметрии 1 (табл. 1, 4, моды  $V_5$  и  $V_6$ ). Естественно, что приложение  $\mathbf{P} \parallel [001]$  не изменяет исходную симметрию кристалла, благодаря чему акустические свойства для таких ситуаций изменяются лишь количественно (моды  $V_9$  и  $V_{10}$ ).

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Красноярского краевого фонда науки, грант IF0107.

#### Список литературы

- [1] Thurston R.N., McScimin H.J., Andreatch P. // J. Appl. Phys. 1966. V. 37. N 1. P. 267-275.
- [2] Зайцева М.П., Кокорин Ю.И., Сандлер Ю.М. и др. Нелинейные электромеханические свойства ацентричных кристаллов. Новосибирск: Наука, 1986. 224 с.
- [3] Cho Y., Yamanouchi K. // J. Appl. Phys. 1987. V. 63. N 3. P. 875-887.
- [4] Андреев И.А., Дубовик М.Ф. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. № 8. С. 487-491.
- [5] Сильвестрова И.М., Писаревский Ю.В., Сенищенко П.А., Крупный А.И. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 9. С. 2875-2878.
- [6] Aleksandrov K.S., Sorokin B.P., Turchin P.P., Glushkov D.A. // Ferroelectrics Letters. 1992. V. 14. N 5-6. P. 115-125.

Красноярский государственный университет

Поступило в Редакцию  
23 января 1994 г.