

НЕЛИНЕЙНОЕ УПРУГОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В НЕЦЕНТРОСИММЕТРИЧНЫХ КРИСТАЛЛАХ

А.А.Блистанов, В.С.Петраков, Н.Г.Сорокин, С.И.Чижиков,
М.П.Шаскольская

Рассмотрено влияние электрических полей на скорость распространения упругих волн в нецентросимметричных кристаллах. Показано, что характер изменения фазовых скоростей от напряженности электрического поля носит как линейный, так и нелинейный характер.

Изменение скорости распространения упругих волн в нецентросимметричных кристаллах под действием внешних электрических полей определяется упругоэлектрическим взаимодействием, которое приводит к линейному изменению упругих модулей (c_{ijkl}) в зависимости от напряженности электрического поля (E_m) [1 – 3]: $\Delta c_{ijkl} = g_{mikjl} E_m$, где g_{mikjl} – упругоэлектрические коэффициенты; индексы i, j, k, l и m принимают значения от единицы до 3.

В тех случаях, когда приложенное электрическое поле не изменяет направления собственных векторов (векторов смещения упругих волн), изменение фазовой скорости упругих волн линейно зависит от напряженности прикладываемого электрического поля [1 – 5]. Если электрическое поле изменяет направления собственных векторов, зависимость изменения фазовых скоростей от величины напряженности электрического поля носит более сложный характер. Эту зависимость можно определить выразив изменение собственных значений тензора Кристоффеля и, следовательно, фазовых скоростей через изменение упругих констант.

Для этого запишем тензор Кристоффеля возмущений электрическим полем в виде

$$\Gamma_{ij}^* = \Gamma_{ij}^0 + \Pi_{ij},$$

где $\Gamma_{ij}^0 = C_{ijkl} n_k n_l$ — тензор Кристоффеля при $E = 0$, C_{ijkl} — упругие модули кристалла, n_k, n_l — направляющие косинусы волновой нормали. Введенный симметричный тензор второго ранга $\Pi_{ij} = g_{mikjl} E_m n_k n_l$, где $E_m = EP_m$, P_m — направляющие косинусы электрического поля, отличается от Γ_{ij}^0 малым изменением собственных значений.

Рассмотрим влияние электрического поля для направления волновых нормалей, лежащих в плоскости упругой симметрии. Из решения уравнения Кристоффеля [6] для квазипродольной и квазипоперечной упругих волн, с учетом упругоэлектрических коэффициентов, и пренебрегая в разложении членами выше квадратичных по полю, получим в общем виде выражение для относительного изменения скорости упругих волн: $\Delta v/v = \alpha E + \beta E^2$, где для произвольного электрического поля, лежащего в плоскости упругой симметрии, коэффициенты α и β описываются для квазипродольной и квазипоперечной волн выражениями

$$\alpha = \frac{1}{2\rho v_0^2} \left[\Pi_{22} + \Pi_{33} \pm \frac{(\Pi_{33} - \Pi_{22})(\Gamma_{33} - \Gamma_{22}) + 4\Pi_{23}\Gamma_{23}}{\sqrt{(\Gamma_{33} - \Gamma_{22})^2 + 4\Gamma_{23}^2}} \right] \quad (1)$$

$$\beta = \pm \frac{1}{\rho v_0^2} \frac{[\Pi_{23}(\Gamma_{33} - \Gamma_{22}) - (\Gamma_{33} - \Gamma_{22})\Gamma_{23}]^2}{\sqrt{[(\Gamma_{33} - \Gamma_{22})^2 + 4\Gamma_{23}^2]^3}} \quad (2)$$

Здесь ρ — плотность, v_0 — фазовая скорость упругих волн при $E = 0$. Для кристаллов симметрии $3m$ ($3\parallel \bar{x}_3, m\parallel \bar{x}_2$), упругоэлектрическое взаимодействие описывается через 13 независимых упругоэлектрических коэффициентов. Выбираем, в отличие от [4, 6], за независимые коэффициенты g_{mikjl} такие, у которых индексы m принимают значения 3 и 2. В этом случае при приложении электрического поля, согласно принципу Кюри [7], симметрия кристалла понижается до моноклинной.

На рис. 1 представлены рассчитанные на ЭВМ ориентационные зависимости коэффициентов α и β в плоскости упругой симметрии для кристалла LiNbO_3 с использованием g_{mikjl} , измеренных на $f = 10^9$ иц, в продольном а), и поперечном б) электрическом поле по отношению к волновой нормали продольной фазовой скорости. Из вида ориентационных зависимостей можно определить направления распространения упругих волн, в которых изменение скорости от величины и направления электрического поля носит линейный или нелинейный характер. Так, для $\bar{n}\parallel[001]$ и $\bar{E}\parallel[001]$, изменение фазовой скорости продольной упругой волны описывается линейным членом, т.е. уравнение (1) будет иметь вид $\alpha =$

$= g_{333} / 2c_{33}$, при $\beta = 0$. Для случая $\vec{E} \parallel [010]$ (поперечное поле) и прежнем направлении распространения, $\alpha = 0$, а уравнение (2) примет вид $\beta = g_{234}^2 / 2c_{33} (c_{33} - c_{44})$, т.е. изменение скорости описывается квадратичным по полю членом. Таким образом, соответствующий выбор направления распространения, типа волны и направления приложения электрического поля приводит к различной зависимости изменения скорости упругих волн, измерение которых позволяет определить упругоэлектрические коэффициенты.

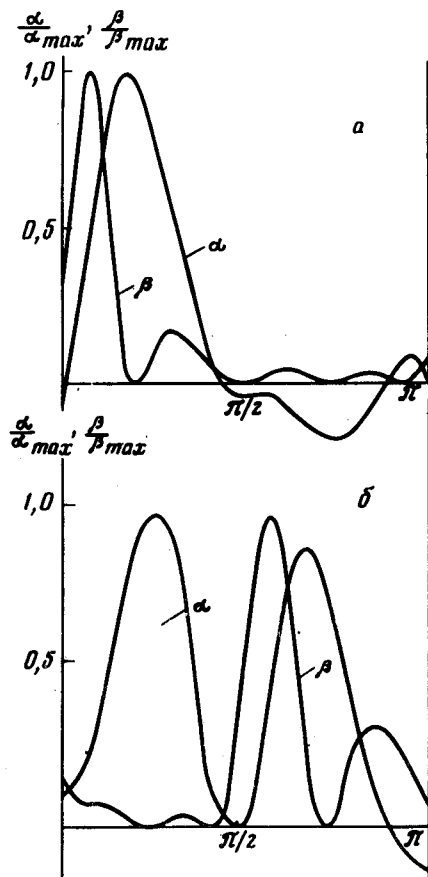


Рис. 1. Ориентационные зависимости коэффициентов α и β в плоскости упругой симметрии для кристалла LiNbO_3 в продольном a , и поперечном b электрическом поле по отношению к волновой нормали продольной фазовой скорости

Экспериментально исследованная зависимость изменения скорости продольной волны, в направлении $[001]$, распространяющаяся в кристалле LiNbO_3 , к которому приложено электрическое поле $E[010]$ (поперечное поле) приведена на рис. 2. Измерения проводились при комнатной температуре на образцах размерами $20 \times 5 \times 4 \text{ мм}^3$, методом сканируемого акустического интерферометра, в котором использова-

на линейно-частотная модуляция возбуждающего акустического сигнала с акустооптической регистрацией центральной частоты многоволнового акустического резонанса. Чувствительность к относительным изменениям скорости составляла 5×10^{-7} при времени измерения 10 сек. Генерация гиперзвука осуществлялась с поверхности кристалла, помещенного в коаксиальный резонатор. Вычисленное значение упруго-электрического коэффициента = 907 ± 14 .

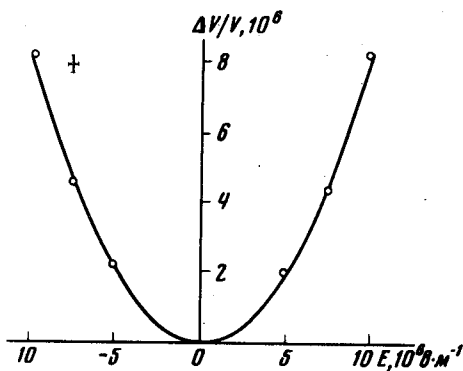


Рис. 2. Относительное изменение фазовой скорости продольной упругой волны $n \parallel [001]$ ($v = 7,345 \times 10^3 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-1}$) в кристалле LiNbO_3 от напряженности электрического поля $E \parallel [010]$

Полученное нелинейное изменение скорости упругой волны от напряженности прикладываемого поля показывает, что линейное изменение упругости кристаллов не всегда приводит к линейному изменению скорости упругих волн. Этот факт необходимо учитывать не только при определении упругоэлектрических коэффициентов, но и при разработке различного рода акустических устройств.

Московский
институт стали и сплавов

Поступила в редакцию
21 июня 1977 г.

Литература

- [1] К.Нгушка, В.Казда. Czech. J. Phys., В-18, 500, 1968.
- [2] R.В.Тhompson, С.Ф.Quate. J.Appl. Phys., 42, 907, 1971.
- [3] В.С.Петраков, Н.Г.Сорокин, С.И.Чижиков, М.П.Шаскольская, А.А.Блистанов. Изв. АН СССР, сер. физическая, 39, 974, 1975.
- [4] А.И.Коробов, В.Е.Лямов. ФТТ, 17, 1448, 1975.
- [5] Б.А.Агишев, И.А.Дерюгин, В.В.Лэманов, Н.К.Юшин. ФТТ, 18, 1117, 1976,
- [6] Ф.И.Федоров. Теория упругих волн в кристаллах, М., изд. Наука, 1965 г.
- [7] В.А.Копцик. Шубниковские группы. М., изд. МГУ, 1966 г.
- [8] Ю.И.Сиротин, М.П.Шаскольская. Основы кристаллофизики, М., изд. Наука, 1975 г.