

КОЭФФИЦИЕНТЫ УПРУГОСТИ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА КРИСТАЛЛА ТИТАНАТА СТРОНЦИЯ

© А.И.Коробов, Б.Б.Воронов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия
(Поступила в Редакцию 8 февраля 1996 г.)

Из измерений зависимости скорости акустических объемных волн от внешнего одноосного сжатия определены все нелинейные коэффициенты упругости третьего порядка в кристалле титаната стронция. Результаты экспериментальных измерений обрабатывались методом наименьших квадратов.

Исследованию кристаллов титаната стронция ввиду их весьма интересных физических свойств постоянно уделяется значительное внимание [1–3]. Целью настоящей работы является определение коэффициентов упругости третьего порядка (КУТП) в кристалле титаната стронция.

Для определения КУТП в кристалле титаната стронция нами был использован метод Терстона–Браггера [4], основанный на измерении зависимости скорости объемных акустических волн (ОАВ) от величины одноосного сжатия p

$$\left(\rho_0 W^2\right)'_{p=0} = \left(2\rho_0 W^2 F + G\right)_{p=0}, \quad (1)$$

где штрих означает производную по одноосному сжатию p , ρ_0 — плотность среды при $p = 0$, $G = S_{ipab}^T C_{j r k s i p} U_j U_k N_r N_s M_a M_b$, W — «естественная скорость» АВ, S_{ijkl}^T — компоненты тензора изотермической упругой податливости, C_{ijklqr} — смешанные КУТП, $\rho_0 W^2 = C_{j r k s}^S U_j U_k N_r N_s$, U_i , N_r — компоненты единичных векторов поляризации и волнового вектора ОАВ соответственно, $F = S_{j k a b}^T M_a M_b U_j U_k$, $C_{j r k s}^S$ — компоненты тензора адиабатических коэффициентов упругости второго порядка, M_i — компоненты единичного вектора в направлении одноосного сжатия.

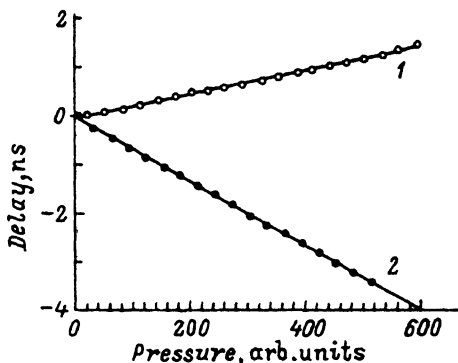
Титанат стронция при комнатной температуре принадлежит к кристаллографическому классу $m\bar{3}m$. В кристаллах этого класса имеются три независимых коэффициента упругости второго порядка (C_{11} , C_{12} , C_{44}) и шесть независимых компонент тензора КУТП (C_{111} , C_{112} , C_{123} , C_{144} , C_{166} , C_{456}). Для измерения был взят образец титаната

Коэффициенты упругости второго порядка в кристалле титаната стронция при $T = 293 \text{ K}$ (в 10^{11} N/m^2)

C_{11}	C_{12}	C_{44}	Литературная ссылка
3.156 ± 0.027	1.027 ± 0.027	1.215 ± 0.006	[5,6]
3.181	1.025	1.236	[7,8]
3.48	1.01	1.19	[9]
3.16 ± 0.04	1.02 ± 0.02	1.21 ± 0.02	Наст. раб.

стронция, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда размером $(8 \times 8 \times 20) \cdot 10^{-9} \text{ m}$, грани которого были ориентированы вдоль кристаллографических направлений $[1\bar{1}0]$, $[110]$, $[001]$. Измерение скорости ОАВ и плотности ($\rho_0 = 5110 \text{ kg/m}^3$) позволило определить коэффициенты упругости второго порядка в кристалле. Их значения находятся в хорошем согласии с результатами других авторов и приведены в табл. 1. Все акустические измерения были выполнены на частоте 15 MHz на автоматизированной установке, описанной в [10].

Для определения КУТП была экспериментально измерена зависимость времени распространения ОАВ $\tau(p)$ от величины приложенного к титанату стронция одностороннего сжатия p для различных поляризаций и направлений распространения ОАВ. Сжатие осуществлялось с помощью гидравлического пресса. Сила, прилагаемая к образцу, измерялась образцовым динамометром. При всех измерениях давление не превышало $2 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$. Гистерезиса на зависимостях $\Delta\tau(p) = \tau(p) - \tau(0)$ обнаружено не было (см. рисунок). Эти измерения позволяют рассчитать величины $(\rho_0 W^2)'_{p=0} = [\rho_0 (l_0/\tau(p))^2]'_{p=0} = -2[(\rho_0 W^2)\tau'(p)/\tau(p)]_{p=0}$, значения которых входят в выражение (1) для расчета КУТП и приведены в табл. 2. В этой таблице приведены также выражения для F и G . Эти результаты позволили получить линейную систему из девяти уравнений для определения шести смешанных КУТП в титанате стронция, которая была решена методом наименьших квадратов [11]. Результаты расчета КУТП приведены в табл. 3. В этой же таблице приведены значения КУТП, полученные в [6] и [8]. В [6] из экспериментов по генерации второй гармоники ОАВ были получены



Зависимость изменения времени распространения для двух ОАВ в кристалле титаната стронция от величины приложенного к кристаллу одностороннего сжатия.

1 соответствует строке 6 табл. 2, 2 — строке 5 табл. 2.

Таблица 2

Значения $(\rho_0 W^2)'$ для различных поляризацій и направлений распространения АВ в кристалле титаната стронция

Номер п/п	N	U	M	$(\rho_0 W^2)_{p=0}$	F	G	$(\rho_0 W^2)_{p=0}$
1	[110]	[110]	[001]	$(C_{11} + C_{12} + 2C_{44})/2$	a	$[aC_{111} + (3a - b)C_{112} + 4aC_{166} - 2bC_{144} - bC_{123}]/2$	-2.42
2	[110]	[110]	[001]	$(C_{11} - C_{12})/2$	a	$[aC_{111} - (a + b)C_{112} + bC_{123}]/2$	-0.74
3	[110]	[001]	[001]	C_{44}	$(a - b)/2$	$[aC_{144} + (a - b)C_{166}]$	0.60
4	[001]	[001]	[110]	C_{11}	a	$[aC_{111} + (a - b)C_{112}]$	-2.31
5	[001]	[110]	[110]	C_{44}	$(a - b - 2c)/2$	$[(a - b)C_{144} + (3a - b)C_{166} - 4cC_{456}]/2c$	0.77
6	[001]	[110]	[110]	C_{44}	$(a - b + 2c)/2$	$[(a - b)C_{144} + (3a - b)C_{166} + 4cC_{456}]/2$	-0.23
7	[110]	[110]	[110]	$(C_{11} + C_{12} + 2C_{44})/2$	$(a - b + 2c)/2$	$[(a - b)C_{111} + (5a - 3b)C_{112} + 4(a - b + 4c)C_{166} + 4aC_{144} + 2aC_{123}]/4$	-1.43
8	[110]	[110]	[110]	$(C_{11} - C_{12})/2$	$(a - b - 2c)/2$	$[(a - b)C_{111} + (a + b)C_{112} - 2aC_{123}]/4$	-0.94
9	[110]	[001]	[110]	C_{44}	a	$[(a - b)C_{144} + (3a - b)C_{166} + 4cC_{456}]/2$	-0.22

Примечание. $a = C_{12}/[3B(C_{11} - C_{12})]$, $b = (C_{11} + C_{12})/[3B(C_{11} - C_{12})]$, $c = 1/4C_{44}$, $B = (C_{11} + 2C_{12})$.

Значения коэффициентов упругости третьего порядка кристалла титаната стронция при $T = 293 \text{ K}$ (в 10^{11} N/m^2)

КУТП	Литературная ссылка				$\left \frac{\Delta C_{ijk} \text{ кг р}}{C_{ijk} \text{ кг р}} \right $
	[6]	[8]	Наст. раб.	Из измерений в наст. раб. и [8]	
C_{111}	-49.6 ± 4.3	-49.6 ± 4.3	-38.2 ± 6.3	-42.7 ± 2.5	0.03
C_{112}	-4.0 ± 1.1	-7.7 ± 1.6	-7.2 ± 3.7	-4.4 ± 1.6	0.04
C_{123}	-2.7 ± 1.7	0.2 ± 4.3	0.1 ± 3.7	0.7 ± 3.4	0.05
C_{144}	-2.7 ± 1.7	-8.1 ± 2.4	-4.8 ± 2.0	-6.4 ± 2.0	0.02
C_{166}	-4.0 ± 1.1	-3.0 ± 1.2	-4.8 ± 1.1	-4.3 ± 1.0	0.01
C_{456}	-2.7 ± 1.7	-0.9 ± 2.7	-0.7 ± 0.9	-1.2 ± 1.0	0

три уравнения для определения шести КУТП. Этих измерений было недостаточно для определения всех КУТП. Авторы сделали предположение, что в титанате стронция для КУТП выполняется условие Коши $C_{144} = C_{123} = C_{456}$, $C_{112} = C_{166}$. Это позволило искусственно уменьшить число независимых КУТП до трех и определить их. В [8] в титанате стронция были проведены измерения зависимости коэффициентов C_{11}^s , C_{12}^s , C_{44}^s от величины гидростатического сжатия. Эти измерения позволили определить значения для трех комбинаций между смешанными КУТП. Авторы [8] объединили результаты своих измерений с результатами из [6] и определили все КУТП в титанате стронция. Из табл. 3 видно, что значения КУТП в [8] и данной работе в пределах ошибки измерений находятся в удовлетворительном согласии, но их средние значения несколько отличаются. При этом значения коэффициентов упругости второго порядка, как видно из табл. 1, совпадают с точностью до десятых процента. Аналогичная ситуация для коэффициентов упругости второго порядка и средних значений КУТП наблюдалась и в других кубических кристаллах [12]. В [12] это объясняется систематическими ошибками и различием методик проведения измерений и обработки результатов эксперимента. На наш взгляд, есть еще одна причина таких расхождений. Измерения КУТП в кристаллах, значения которых приведены в [12], были выполнены различными авторами и на разных образцах. Некоторые различия в исследуемых образцах, возникшие при их изготовлении, не оказали существенного влияния на линейные свойства образца. Однако КУТП могли оказаться более чувствительными к этим различиям, возникшим в результате выращивания и обработки образцов. В качестве примера могут служить исследования по влиянию дислокаций в алюминии на его упругие свойства. Нелинейные упругие свойства алюминия определялись по эффективности генерации второй гармоники ОАВ в нем. Дислокации в монокристаллах алюминия, возникающие при его деформации, вызывали увеличение амплитуды второй гармоники в несколько раз. При этом изменение скорости ОАВ не превышало единиц процентов [13,14]. Для уменьшения влияния систематических ошибок на точность определения КУТП в титанате стронция, вызванных индивидуальными

ми особенностями образца, мы объединили результаты наших измерений с результатами измерений, полученными в [8]. В результате для определения шести КУТП была получена система из двенадцати уравнений, которая была решена методом наименьших квадратов. Усреднение по большому числу измерений позволило уменьшить ошибку в определении КУТП. Кроме того, усреднялись результаты измерений, выполненные на двух различных образцах. Эти результаты приведены в табл. 3 и, на наш взгляд, являются наиболее точными из приведенных в этой таблице. Там же приведены результаты расчетов величины согласно [15]: $|\Delta C_{jkpqrS}/C_{jkpqrS}| = |(C_{jkpqrS} - C_{jkpqrS}^S)/C_{jkpqrS}|$, где $C_{jkpqrS}^S = (\partial C_{jkpqr}^S/\partial U_{rs})_S$ — адиабатические КУТП, $C_{jkpqrS} = (\partial C_{jkpqr}^S/\partial U_{rs})_T$ — смешанные КУТП. Из расчетов видно, что разность между величинами смешанных и адиабатических КУТП составляет несколько процентов и не превышает ошибки их определения.

В заключение можно сделать вывод о некорректности предположения, сделанного [6], о выполнении в кристалле титаната стронция условия Коши для КУТП (необходимо отметить, что условие Коши для коэффициентов упругости второго порядка $C_{12} = C_{44}$ в титанате стронция также не выполняется). Невыполнение условия Коши для коэффициентов упругости указывает на нецентральный характер межатомных сил в этом кристалле [12].

Данная работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований «Университеты России» и при частичной поддержке гранта N J8Q100 от Международного научного фонда и правительства Российской Федерации.

Список литературы

- [1] Физическая акустика / Под. ред. У. Мэзона, Р. Терстона. М. (1973). Т.У 1. С. 90–137.
- [2] Каган В.Д., Суслов А.В. ФТТ **36**, 9, 2672 (1994).
- [3] Леманов В.В., Холкин А.Л. ФТТ **36**, 6, 1537 (1994).
- [4] Thurston R.N., Brugger K. Phys. Rev. **133**, 6A, A1604 (1964).
- [5] Wactman J.B., Wheat M.L., Marzullo S. J. Res. Nat. Bur. Stand. **67A**, 193 (1963).
- [6] Mackey J.E., Arnold R.T. J. Appl. Phys. **40**, 12, 4808 (1969).
- [7] Bell R.O., Rupprecht G. Phys. Rev. **129**, 1, 90 (1963).
- [8] Beattie A.G., Samara G. J. Appl. Phys. **4**, 2376 (1971).
- [9] Poindexter E., Giardini A. Phys. Rev. **110**, 1069 (1958).
- [10] Коробов А.И., Асаинов А.Ф., Воронов Б.Б., Кокшайский И.Н. Измер. техника, **9**, 60' (1995).
- [11] Thurston R.N., McScimin H.J., Andreatch P. J. Appl. Phys. **37**, 1, 267 (1966).
- [12] Breazeale M.A., Jacob Philip. Physical Acoustics / Ed. W.P. Mason and R.N. Thurston. Academic. N. Y. (1980). V. 18. P. 1–60.
- [13] Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М. (1966). 519 с.
- [14] Hikata A., Chick B.B., Elbaum C. Appl. Phys. Lett. **3**, 195 (1963).
- [15] Brugger K. Phys. Rev. **133**, 6A, A1611 (1964).