

ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ЦЕНТРОСИММЕТРИЧНЫХ КРИСТАЛЛАХ

© *А.И.Коробов, Ю.А.Бражкин*

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова,
119899 Москва, Россия
(Поступила в Редакцию 11 мая 1994 г.)

Рассмотрен электроакустический эффект в центросимметричных кристаллах. Получено аналитическое выражение, связывающее изменение скорости акустических волн с величиной постоянного электрического поля, приложенного к центросимметричному кристаллу. Изменение скорости квадратично зависит от величины поля. Описана модуляционная методика, позволяющая исследовать электроакустический эффект в центросимметричных кристаллах. Проведено экспериментальное исследование электроакустического эффекта в центросимметричном кристалле титаната стронция. Определены восемь из девяти коэффициентов электрострикции шестого ранга в этом кристалле.

Электроакустический эффект (ЭАЭ) заключается во взаимодействии постоянного электрического поля с акустическими волнами (АВ) в твердых телах. В результате ЭАЭ происходит изменение скорости АВ. ЭАЭ достаточно хорошо изучен в пьезоэлектрических кристаллах (ПК) как теоретически, так и экспериментально [1-7]. В ПК изменение скорости АВ в результате ЭАЭ линейно по электрическому полю и объясняется нелинейностью пьезоэффекта. В настоящее время ЭАЭ широко используется для определения нелинейных пьезоэлектрических коэффициентов при исследовании фазовых переходов в устройствах акустоэлектроники [7-10].

В центросимметричных кристаллах (ЦСК), в которых пьезоэффект отсутствует, ЭАЭ исследован менее подробно. Это, на наш взгляд, объясняется тем, что, как правило, в таких кристаллах ЭАЭ существенно слабее, чем в ПК, и имеются экспериментальные трудности в его наблюдении и исследовании. Однако в твердых телах с большой величиной диэлектрической проницаемости ЭАЭ может быть сравним и даже превышать по величине ЭАЭ в ПК. В [11-13] было исследовано влияние электрического поля на скорость распространения объемных АВ (ОАВ) в изотропных твердых телах на основе керамики титаната бария. Была обнаружена квадратичная зависимость изменения скорости АВ от напряженности электрического поля. Для описания такой зависимости авторы использовали коэффициенты электрострикции первого и второго порядков, которые определялись ими из измерений зависимости диэлектрической проницаемости от величины внешнего одноосного сжатия. В [14] исследована зависимость скорости

поверхностных АВ (ПАВ) в подложке из ПСК титаната стронция от электрического поля при различных температурах. Изменение скорости ПАВ квадратично зависело от электрического поля и качественно описывалось выражением, полученным в [15]. Однако детального анализа ЭАЭ в ПСК не проведено.

Целью настоящей работы является подробное рассмотрение ЭАЭ в ПСК и его экспериментальное исследование в кристалле титаната стронция. Для упрощения анализа ЭАЭ в таких кристаллах мы воспользуемся результатами, полученными для ПК в [2,4], чтобы затем распространить их на ПСК.

1. Нелинейные уравнения состояния

Для описания макроскопических свойств кристаллов в случае распространения в них плоских ОАВ удобно воспользоваться термодинамическим потенциалом — электрической энтальпией H_{el} , — полный дифференциал которого имеет вид [16]

$$dH_{el} = T_{ij}S_{ij} - D_m dE_m + \Theta dS, \quad (1)$$

где D_m , E_n — компоненты векторов электрической индукции \mathbf{D} и напряженности электрического поля \mathbf{E} , Θ — температура, S — энтропия (вследствие адиабатического характера распространения ОАВ $dS = 0$, что позволяет последний член в (1) опустить), T_{ij} — тензор термодинамического напряжения,

$$T_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial a_j} + \frac{\partial U_j}{\partial a_i} + \frac{\partial U_t}{\partial a_i} \frac{\partial U_t}{\partial a_j} \right)$$

— тензор деформации, $U_i = x_i - X_i$ — вектор смещения частицы среды, $X_i = X_i(a_i)$, a_i — координаты частицы в однородно деформированной и недеформированной среде соответственно, $x_i = x_i(a_i, t)$ — мгновенная координата колеблющейся точки в деформированной среде. В (1) и далее производится суммирование по повторяющимся индексам. Выражение (1) позволяет получить уравнения состояния ПК с учетом членов четвертого порядка

$$\begin{aligned} T_{ij} = \left(\frac{\partial H_{el}}{\partial U_{ij}} \right) \Big|_{S,E} = & C_{ijkl} U_{kl} - e_{mij} E_m + (1/2) C_{ijklqr} U_{kl} U_{qr} - \\ & - (1/2) f_{mnij} E_m E_n - e_{mijkl} E_m U_{kl} + (1/6) C_{ijklqrtv} U_{kl} U_{qr} U_{tv} - \\ & - (1/6) e_{mnpqij} E_m E_n E_p - (1/2) f_{mnpqijkl} E_m E_n U_{kl} - (1/2) e_{mijklqr} E_m U_{kl} U_{qr}, \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_m = - \left(\frac{\partial H_{el}}{\partial E_m} \right) \Big|_{U,S} = & \varepsilon_{mn} E_n + e_{mij} U_{ij} + f_{mnij} E_n U_{ij} + \\ & + (1/2) \varepsilon_{mnpq} E_n E_p + (1/2) e_{mijkl} U_{ij} U_{kl} + (1/2) e_{mnpqij} E_n E_p U_{ij} + \\ & + (1/2) f_{mnpqijkl} E_n U_{ij} U_{kl} + (1/6) e_{mijklqr} U_{ij} U_{kl} U_{qr} + (1/6) \varepsilon_{mnpq} E_n E_p E_q, \quad (3) \end{aligned}$$

где C_{ijkl} , C_{ijklqr} , $C_{ijklqrv}$, e_{mij} , e_{mijkl} , $e_{mijklqr}$, ϵ_{mn} , ϵ_{mnp} , ϵ_{mnpq} — коэффициенты упругости, пьезоэффекта, диэлектрической проницаемости второго, третьего, четвертого порядков соответственно, f_{mnij} , f_{mnijkl} — тензоры коэффициентов электрострикции четвертого и шестого рангов, e_{mnpqij} — тензор пятого ранга. Относительно этого коэффициента нет устоявшейся терминологии. В [17] его предлагается назвать пьезоэлектрическим тензором пятого ранга. В дальнейшем, очевидно, имеет смысл для коэффициентов разложения в (2), (3) тензоры четного ранга при произведениях вида $U_{ij}E_n$ называть коэффициентами электрострикции, а тензоры нечетного ранга — коэффициентами пьезоэффекта соответствующего порядка.

2. Электроакустический эффект в пьезоэлектрических кристаллах

Для анализа распространения ОАВ в кристалле, к которому приложено электрическое поле, воспользуемся уравнением движения в виде [4,18]

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U_s}{\partial t^2} = \frac{\partial P_{si}}{\partial a_i}, \quad (4)$$

где ρ_0 — плотность недеформированного кристалла, $P_{si} = \frac{\partial x_s}{\partial a_j} T_{ij}$ — тензор Пиолы–Кирхгофа. Совместно с уравнениями состояния (2), (3) в квазистатическом приближении можно получить уравнение Грина–Кристоффеля для ОАВ малой амплитуды в однородно деформированной среде [4,18]

$$\rho_0 \tilde{W}^2 U_f = \tilde{F}_{fh} U_h, \quad (5)$$

где $\tilde{F}_{fh} = [\delta_{fh} \tilde{T}_{jl} + (2\tilde{U}_{rh} + \delta_{rh}) \tilde{C}_{jfrl}^*] N_j N_l$ — тензор Грина–Кристоффеля, δ_{fh} — символ Кроннекера, U_f , N_j — единичные векторы поляризации и нормали к волновому фронту ОАВ, знаком \sim обозначены величины в однородно деформированном состоянии, $W = l_0/t$ — «естественная» скорость распространения ОАВ в кристалле (она определяется как скорость ОАВ в деформированном кристалле, размеры которого в направлении распространения ОАВ не изменились [18]), l_0 — длина образца кристалла в недеформированном состоянии, t — время распространения АВ через образец,

$$\tilde{C}_{ifrl}^* = \left[\tilde{C}_{jfrl} + (\tilde{e}_{pjf} N_p)(\tilde{e}_{mrl} N_m) / (\epsilon_{mn} N_m N_n) \right]$$

— «ужесточенный» коэффициент упругости в деформированном состоянии.

Продифференцировав (5) по электрическому полю, получим

$$\frac{d}{dE} \left(\rho_0 \tilde{W}^2 \right)_{E=0} = \left(U_f \frac{d\tilde{F}_{fh}}{dE} U_h \right)_{E=0}. \quad (6)$$

Уравнение (6) позволяет установить связь между изменением скорости ОАВ и приложенным к кристаллу электрическим полем. Для этого необходимо найти полную производную по электрическому полю от выражения (6) в явном виде.

Приложение электрического поля к кристаллу приводит к изменению скорости АВ вследствие как первичных, так и вторичных эффектов. Первичным эффектом является зависимость скорости ОАВ от приложенного электрического поля. Вторичные эффекты вызываются тем, что при приложении электрического поля к твердому телу последнее вследствие пьезоэффекта и электрострикции деформируется, что в свою очередь приводит к изменению скорости АВ. Аналогичные эффекты учитываются при рассмотрении, например, пироэлектричества, линейного электрооптического эффекта. При этом вторичные эффекты могут превосходить первичные [16]. С учетом сказанного полную производную по электрическому полю можно записать в следующем виде [2]:

$$\left(\frac{d}{dE_n}\right)_{T,\Theta=\text{const}} = \left(\frac{\partial}{\partial E_n}\right)_{U,\Theta=\text{const}} + d_{ntv} \left(\frac{\partial}{\partial U_{tv}}\right)_{E,\Theta=\text{const}} \quad (7)$$

Выполнив дифференцирование в (6) с учетом (7), получим [2,4]

$$\left(\frac{d\tilde{F}_{jk}}{dE}\right) \Big|_{\Theta,E=0} = (2d_{nqk}C_{jrqs}^* - e_{njrks}^* + d_{ntv}C_{jrkstv}^*) N_r N_s q_n, \quad (8)$$

где $d_{nqk} = e_{nij}S_{ijqk}$ — коэффициенты пьезоэффекта, S_{ijqk} — коэффициенты упругой податливости, q_n — компоненты единичного вектора, совпадающего с направлением приложения внешнего постоянного электрического поля, e_{njrks}^* , C_{jrkstv}^* — эффективные константы нелинейного пьезоэффекта и нелинейной упругости соответственно

$$e_{njrks}^* = - \left(\frac{\partial C_{jrks}^*}{\partial E_n}\right) \Big|_{E=0,U} = \bar{e}_{njrks} - (\bar{f}_{mnjr}N_m)(e_{psk}N_p)/(\varepsilon_{mn}N_mN_n) - (e_{mjr}N_m)(\bar{f}_{npsk}N_p)/(\varepsilon_{mn}N_mN_n) + (e_{mjr}N_m)(e_{pks}N_p) \times (\bar{\varepsilon}_{mnp}N_mN_p)/(\varepsilon_{mn}N_mN_n)^2, \quad (9)$$

$$C_{jrkstv}^* = \left(\frac{\partial C_{jrks}^*}{\partial U_{tv}}\right) \Big|_{U=0,\Theta,E} = \bar{C}_{jrkstv} + (\bar{e}_{njrtv}N_n)(e_{mks}N_m)/(\varepsilon_{mn}N_mN_n) + (e_{njr}N_n)(\bar{e}_{mksv}N_m)/(\varepsilon_{mn}N_mN_n) - (e_{mjr}N_m)(e_{nks}N_n) \times (\bar{f}_{mntv}N_mN_n)/(\varepsilon_{mn}N_mN_n)^2. \quad (10)$$

Чертой сверху обозначены смешанные термодинамические коэффициенты [4]. Выражение (6) после подстановки в него (8) можно записать в виде [2]

$$\frac{d}{dE} (\rho_0 \tilde{W}^2) \Big|_{E=0,\Theta} = (2d_{nqk}C_{jrqs}^* - e_{njrks}^* + d_{ntv}C_{jrkstv}^*) U_j U_k N_r N_s q_n. \quad (11)$$

Уравнение аналогичное (11), было получено позднее в [7]. Результаты экспериментальных исследований выявили линейную зависимость

скорости ОАВ в ПК от величины электрического поля, приложенного к кристаллу [1-7]. Поэтому уравнение (11) можно переписать в виде

$$\Delta W/W(0) = [W(E) - W(0)]/W(0) = [(2d - P + G)E]/2C_0, \quad (12)$$

где $W(0)$, $W(E)$ — значение «естественной» скорости ОАВ в отсутствие и при приложении электрического поля к ПК соответственно,

$$C_0 = \rho_0 W^2 = C_{j_r k s}^* U_j U_k N_r N_s,$$

$$d = d_{n q k} C_{j_r q s}^* U_j U_k N_r N_s q_n,$$

$$P = e_{n j r k s} U_j U_k N_r N_s q_n,$$

$$G = d_{n t v} C_{j_r k s t v} U_j U_k N_r N_s q_n.$$

Из (12) видно, что изменение скорости ОАВ в ПК при приложении к нему постоянного электрического поля описывается выражением, состоящим из трех слагаемых. Первое слагаемое описывает кажущееся изменение скорости ОАВ за счет изменения расстояния, проходимого ОАВ в результате деформации ПК вследствие пьезоэффекта при приложении к кристаллу постоянного электрического поля. Второе слагаемое в (12) связано с нелинейностью пьезоэффекта и описывает вклад в изменение скорости ОАВ нелинейных эффективных пьезоэлектрических коэффициентов (9). Третье слагаемое в (12) обусловлено вторичными эффектами, связанными с деформацией кристалла вследствие пьезоэффекта при приложении к нему электрического поля, и описывает добавку к изменению скорости ОАВ с помощью эффективных коэффициентов нелинейной упругости третьего порядка (10). Выражение (12) позволяет определить нелинейные коэффициенты третьего порядка в ПК из экспериментов по измерению зависимости скорости АВ от электрического поля. Если известны все коэффициенты, то выражение (12) позволяет рассчитать анизотропию изменения скорости ОАВ в ПК при приложении к нему электрического поля, что бывает важно при создании конкретных устройств акустоэлектроники.

3. Электроакустический эффект в центросимметричных кристаллах

Как уже отмечалось, в ЦСК вследствие отсутствия пьезоэффекта линейная зависимость скорости ОАВ от электрического поля, описываемая выражением (12), не наблюдается. Для определения зависимости скорости ОАВ от электрического поля E в таких кристаллах продифференцируем (6) по E вторично

$$\frac{d^2}{dE^2} (\rho_0 \tilde{W}^2) = U_h \left(\frac{d^2 \tilde{F}_{fh}}{dE^2} \right) U_f. \quad (13)$$

Явное выражение для $\left(\frac{d^2 \tilde{F}_{fh}}{dE^2} \right)$ в ЦСК можно получить, применив оператор (7) к (8) и положив после этого все пьезоэлектрические коэффициенты равными нулю,

$$\left(\frac{\partial^2 \tilde{F}_{fh}}{\partial E_m \partial E_n} \right) \Big|_{E=0, U, \Theta} = (\bar{g}_{m n g h} C_{f r g s} - f_{m n f r h s}^* + \bar{g}_{m n t v} \bar{C}_{f r h s t v}) N_r N_s, \quad (14)$$

где $g_{mng h} = f_{m n i j} S_{i j g h}$ — тензор электрострикции четвертого ранга,

$$f_{m n f r h s}^* = \bar{f}_{m n f r h s} - 2 (\bar{f}_{m n f r} N_m) (\bar{f}_{m n h s} N_n) / (\epsilon_{m n} N_m N_n)$$

— эффективный тензор электрострикции шестого ранга. Из (13), (14) легко получить

$$\left. \frac{d^2}{dE^2} (\rho_0 \bar{W}^2) \right|_{E=0} = (\bar{g}_{m n g h} C_{f r q s} - \bar{f}_{m n f r h s}^* + \bar{g}_{m n t v} \bar{C}_{f r h s t v}) q_n q_m N_r N_s U_f U_h. \quad (15)$$

Для относительного изменения скорости ОАВ из (15) получим

$$\Delta W/W(0) = [W(E) - W(0)]/W(0) = [(g - F + C)E^2]/2C_0, \quad (16)$$

где

$$C_0 = C_{i j k l} U_i U_k N_j N_l,$$

$$g = g_{m n g h} C_{f r g s} q_m q_n U_f U_h N_r N_s,$$

$$F = f_{m n f r h s}^* q_m q_n U_f U_h N_r N_s,$$

$$C = g_{m n t v} C_{f r h s t v} q_m q_n U_f U_h N_r N_s.$$

Выражение (16) аналогично (12) и также состоит из трех слагаемых. Первое слагаемое в (16) описывает кажущееся изменение скорости ОАВ из-за изменения расстояния, проходимого ими в кристалле вследствие деформации за счет электрострикции при приложении электрического поля. Второе слагаемое описывает влияние на изменение скорости эффективных коэффициентов электрострикции шестого ранга. Третье слагаемое обусловлено вторичными эффектами, связанными с деформацией кристалла при приложении к нему электрического поля, и описывает изменение скорости АВ с помощью коэффициентов упругости третьего порядка. Кроме того, (16) в отличие от (12) выражает квадратичную по электрическому полю зависимость скорости ОАВ.

Очевидно, что и в случае ПК в выражении (12) имеется квадратичная по электрическому полю добавка к изменению скорости ОАВ. Эта добавка имеет более сложный вид, чем в ПСК. Проведенные оценки показывают, что в ПК квадратичная добавка к изменению скорости ОАВ по крайней мере на порядок меньше линейной и служит малой поправкой к ней даже в таких ПК, как кварц и ниобат лития [19,20].

4. Исследуемые образцы и методика эксперимента

Для исследования нами были использованы образцы монокристалла титаната стронция, который при комнатной температуре относится к кубической сингонии класса $m\bar{3}m$. Кристаллы класса $m\bar{3}m$ являются центросимметричными, и как следствие в них отсутствует пьезоэффект. Образцы (3 шт.) представляли собой прямоугольные параллелепипеды размером $8 \times 8 \times 20$ мм, грани которых были сориентированы вдоль кристаллографических направлений $[110]$, $[1\bar{1}0]$, $[001]$ с точностью не хуже 0.5° . Для приложения электрического поля на противоположные грани путем вакуумного напыления наносились металлические электроды (алюминий, медь, хром) толщиной менее $0.5 \mu\text{м}$.

Измерение емкости полученных конденсаторов и ее зависимости от внешнего одноосного сжатия позволило определить диэлектрическую проницаемость ϵ_{11} и коэффициенты электрострикции g_{mnij} . С помощью выражения $f_{mnij} = g_{mnik}C_{ijkl}$ нами были рассчитаны коэффициенты f_{mnij} .

Для измерения скорости ОАВ использовался эхоимпульсный метод с фиксированной задержкой на частоте 30 МГц. Точность определения абсолютной скорости составила $\sim 0.1\%$. Измерение скорости ОАВ позволило определить коэффициенты упругости и податливости в кристаллах титаната стронция. Результаты измерения коэффициентов диэлектрической проницаемости, электрострикции, упругости, податливости, а также величина плотности образцов титаната стронция, исследованных в работе, приведены в табл. 1.

Для определения величины (15) нами была использована модуляционная методика измерения, суть которой заключается в следующем [25]. При приложении к кристаллу электрического поля E вследствие изменения скорости $W(E)$ изменяется время прохождения $t(E)$ ОАВ через кристалл, при этом

$$[W(E) - W(0)]/W(0) = -[t(E) - t(0)]/t(0) = \Delta W(E)/W(0) = -\Delta t(E)/t(0). \quad (17)$$

В случае ЦСК можно показать, что

$$\frac{1}{W(0)} \left(\frac{d^2 W(E)}{dE^2} \right)_{E=0} = -\frac{1}{t(0)} \left(\frac{d^2 t(E)}{dE^2} \right)_{E=0}. \quad (18)$$

Если одновременно с постоянным электрическим полем \bar{E} приложить переменное электрическое поле $E_\Omega = \tilde{E} \cos \Omega t$, то результирующее поле E на образце будет равно $E = \bar{E} + \tilde{E} \cos \Omega t$. Время распространения ОАВ в образце $t(E)$ будет функцией электрического поля E и его можно представить в виде ряда Тейлора, ограничившись первыми тремя членами разложения,

$$t(E) = t(0) + \left(\frac{dt(E)}{dE} \right)_{E=0} E + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 t(E)}{dE^2} \right)_{E=0} E^2 + \dots \quad (19)$$

Из-за отсутствия пьезоэффекта в ЦСК из (8) следует, что $dt(E)/dE = 0$, поэтому выражение (19) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Delta t(E) &= t(E) - t(0) = \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 t(E)}{dE^2} \right)_{E=0} E^2 + \dots = \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 t(E)}{dE^2} \right)_{E=0} \left(\bar{E} + \tilde{E} \cos \Omega t \right)^2 + \dots = \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{d^2 t(E)}{dE^2} \right)_{E=0} + \left[2\bar{E}\tilde{E} + \tilde{E}^2(1 + \cos 2\Omega t) + 4(\bar{E})(\tilde{E}) \cos \Omega t \right] \dots \quad (20) \end{aligned}$$

Далее величина $\Delta t(E)$ с помощью времяамплитудного преобразователя (ВАП) преобразуется в электрическое напряжение $V = S \Delta t(E)$, где S — крутизна преобразования ВАП. В результате в спектре электрического сигнала V будут гармонические составляющие на частотах Ω , 2Ω , амплитуды которых пропорциональны соответствующим производным времени распространения ОАВ по электрическому полю. Напряжения гармонических составляющих V_Ω , $V_{2\Omega}$ будут равны

$$V_\Omega = S \left(\frac{d^2 t(E)}{dE^2} \right)_{E=0} (\bar{E})(\tilde{E}) \cos \Omega t = -S \frac{t(0)}{W(0)} \left(\frac{d^2 W(E)}{dE^2} \right)_{E=0} (\bar{E})(\tilde{E}) \cos \Omega t, \quad (21)$$

$$V_{2\Omega} = \frac{S}{4} \left(\frac{d^2 t(E)}{dE^2} \right)_{E=0} \bar{E}^2 \cos 2\Omega t = -S \frac{t(0)}{4W(0)} \left(\frac{d^2 W(E)}{dE^2} \right)_{E=0} \bar{E}^2 \cos 2\Omega t. \quad (22)$$

Таким образом, проведя спектральный анализ электрического напряжения на выходе ВАП, можно определить значение величины $\left(\frac{d^2 W(E)}{dE^2} \right)_{E=0}$. При этом амплитуда сигнала V_Ω пропорциональна этой величине, а фаза сигнала определяет ее знак. В данной работе для определения $\left(\frac{d^2 W(E)}{dE^2} \right)_{E=0}$ проводились измерения зависимости V_Ω от постоянного электрического поля \bar{E} при постоянной амплитуде модулирующего напряжения \tilde{E} . Гармонический анализ сигнала ВАП осуществлялся узкополосным усилителем с синхронным детектированием. Калибровка установки проводилась с использованием кристалла ниобата лития с известной зависимостью скорости ОАВ от электрического поля. Чувствительность экспериментальной установки к относительным изменениям скорости в модуляционном режиме составила $\sim 10^{-8}$.

5. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Проведены измерения зависимости скорости АВ в образцах кристалла титаната стронция от величины приложенного постоянного \bar{E} и переменного \tilde{E} электрических полей при комнатной температуре. Напряженность постоянного электрического поля изменялась от 0 до $6 \cdot 10^5$ В/м, амплитуда переменного электрического поля на частоте 20 Нз изменялась от 0 до $2.15 \cdot 10^5$ В/м. Измерения показали линейную зависимость скорости ОАВ как от постоянного электрического поля \bar{E} при фиксированном \tilde{E} (рис. 1), так и от амплитуды переменного \tilde{E} при $\bar{E} = \text{const}$ (рис. 2). Это находится в согласии с выражением (21). Электрическое напряжение прикладывалось к напыленным в вакууме металлическим электродам (алюминий, медь, хром), использовались также электроды из аквадака. Результаты измерений зависимости скорости ОАВ от величины постоянного электрического поля при фиксированном \tilde{E} в кристалле титаната стронция приведены в табл. 2. Эти результаты не зависели от материала электродов.

Следует отметить, что нами не наблюдались гистерезисные и релаксационные явления, исследованные в [26] при возбуждении с поверхности ОАВ в кристаллах титаната стронция. Отмеченные эффекты

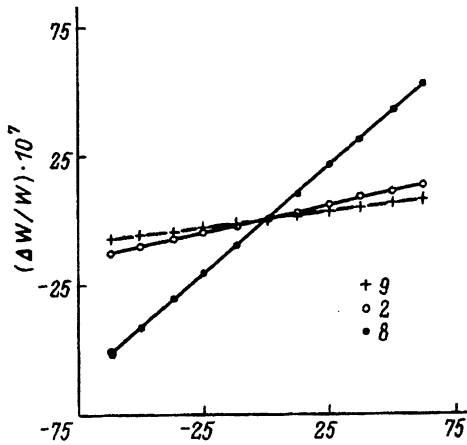


Рис. 1. Зависимость относительного изменения скорости акустических волн $\Delta W/W$ в кристалле титаната стронция от величины постоянного электрического поля \bar{E} при $\bar{E} = 2.15 \cdot 10^5$ В/м.

Номера кривых соответствуют номерам в табл. 2.

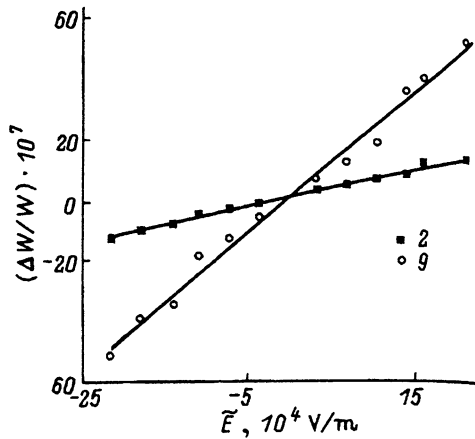


Рис. 2. Зависимость относительного изменения скорости акустических волн $\Delta W/W$ в кристалле титаната стронция от амплитуды переменного электрического поля \bar{E} при $\bar{E} = 2.15 \cdot 10^5$ В/м.

Номера кривых соответствуют номерам в табл. 2.

авторы объясняют образованием барьера Шоттки на границе диэлектрика с металлическим электродом и возникновением больших значений напряженности электрического поля в приповерхностном слое в несколько микрон. Очевидно, что в случае возбуждения звука с поверхности роль слоя, прилегающего к контакту металл-диэлектрик, должна быть значительной. В нашем случае приповерхностные эффекты не должны оказывать существенного влияния на распределение электрического поля в объеме исследуемого образца. Оценки, проведенные в [15], показывают, что отмеченные выше явления при самых неблагоприятных ситуациях не могут привести к ошибкам измерений, превышающим 3–5%.

Приведенные в табл. 2 результаты измерений зависимости скорости ОАВ от внешних электрических полей в образцах кристалла титаната стронция позволили определить ряд коэффициентов f_{mijkl} этого кристалла. Коэффициенты f_{mijkl} , являющиеся тензорами шестого ранга, симметричны по первой, второй, третьей парам индексов и по перестановке второй и третьей пар: $f_{mijkl} = f_{nmijkl} = f_{mijnkl} = f_{mniklj} = f_{mnklij}$. В кристаллах класса $m3m$, к которому относится титанат стронция, имеются девять независимых, отличных от нуля компонент $f_{111}, f_{112}, f_{122}, f_{123}, f_{144}, f_{155}, f_{414}, f_{424}, f_{456}$ (приведены коэффициенты $f_{\lambda\mu\nu}$, записанные в матричном виде, которые связаны с компонентами тензора f_{mijkl} правилом пересчета $mn \rightarrow \lambda, ij \rightarrow \mu, kl \rightarrow \nu; \lambda, \mu, \nu = 1, \dots, 6$) [16]. Нами определены восемь из девяти коэффициентов (не определен коэффициент f_{414}). Рассчитанные коэффициенты при $T = 293$ К приведены в табл. 3 (следует заметить, что вблизи фазового перехода, происходящего в титанате стронция при $T \sim 103$ К, величина ЭАЭ существенно возрастает [21], как следствие абсолютные значения

Таблица 2

Результаты измерения электроакустического эффекта в кристалле титаната стронция

Номер п/п	Направление распространения волны N	Поляризация акустической волны U	Направление электрического поля E	$\frac{d^2(\rho W^2)}{dE^2}$, 10^{-6} F/m
1	[001]	[001]	[001]	-1.7 ± 0.4
2	[001]	[110]	[001]	-4.7 ± 0.9
3	[110]	[001]	[001]	-0.9 ± 0.2
4	[110]	[110]	[001]	-5.0 ± 1.0
5	[110]	[110]	[001]	-2.3 ± 0.5
6	[001]	[001]	[110]	-2.5 ± 0.5
7	[001]	[110]	[110]	0.0 ± 0.1
8	[110]	[001]	[110]	-2.6 ± 0.5
9	[110]	[110]	[110]	-16.5 ± 2.5
10	[110]	[110]	[110]	-2.8 ± 0.6

Таблица 3

Значения коэффициентов тензора электрострикции шестого ранга в кристалле титаната стронция при комнатной температуре в (10^{-5} F/m)

f_{111}	f_{112}	f_{122}	f_{123}	f_{144}	f_{155}	f_{414}	f_{424}	f_{456}
7.5 ± 3.0	-0.6 ± 0.3	0.20 ± 0.05	-0.74 ± 0.25	0.4 ± 0.2	0.42 ± 0.10	-	2.3 ± 1.7	-0.26 ± 0.20

этих коэффициентов увеличиваются в несколько раз [15]). Для их расчета были использованы значения нелинейных коэффициентов упругости из [22], а также величины коэффициентов, приведенных в табл. 1. Экспериментальные результаты были обработаны по методу наименьших квадратов.

Анализ экспериментальных результатов показывает, что основной вклад в изменение скорости ОАВ в электрических полях в титанате стронция вносят первые два члена в правой части уравнения (16). Вклад третьего члена в этом уравнении обусловлен упругой нелинейностью и не превышает 10%.

Таким образом, в результате анализа распространения ОАВ в ЦСК получено аналитическое выражение зависимости скорости ОАВ от величины внешнего постоянного электрического поля, приложенного к кристаллу (16). Изменение скорости ОАВ квадратично зависит от электрического поля. Кроме того, уравнение (16) не только дает возможность определить по экспериментальным результатам значения коэффициентов, входящих в это уравнение, но и позволяет по известным параметрам рассчитать анизотропию электроакустического взаимодействия в ЦСК.

Значения коэффициентов электрострикции шестого ранга, приведенные в табл. 3, позволяют рассчитать ряд эффектов в кристалле титаната стронция [14,27].

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

Список литературы

- [1] Hruska C.K., Khogali A. IEEE Trans. Son. Ultrason. **SU18**, 3, 171 (1971).
- [2] Коробов А.И., Лямов В.Е. ФТТ **17**, 5, 1448 (1975).
- [3] Агишев Б.А., Леманов В.В., Юшин Н.К. ФТТ **20**, 9, 2819 (1978).
- [4] Лямов В.Е. Поляризаационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах. М. (1983). 224 с.
- [5] Зайцева М.П., Кокорин Ю.И., Сандлер Ю.М., Зражевский В.М., Сорочкин Б.П., Сысоев А.М. Нелинейные электромеханические свойства ацентричных кристаллов. Новосибирск (1986). 177 с.
- [6] Hruska K., Brendel R. J. Appl. Phys. **67**, 4, 1676 (1990).
- [7] Cho Ya., Yamapouchi K. J. Appl. Phys. **61**, 3, 875 (1987).
- [8] Гуляев Ю.В., Каринский С.С., Мондииков В.Д. Письма в ЖТФ **1**, 17, 791 (1975).
- [9] Агишев Б.А., Лайхтман Б.Д., Леманов В.В., Полховская Т.М., Юшин Н.К. ФТТ **21**, 1, 142 (1979).
- [10] Straube U., Brazhkin Yu.A., Korobov A.I., Kondratkov A.I., Serdobolskaja O.Yu. Acta Phys. Slov. **40**, 1, 64 (1990).
- [11] Пекар С.И., Демиденко А.А., Здебский А.П., Иванец В.А., Писковой В.И., Черная И.С. ДАН СССР **230**, 5, 1089 (1976).
- [12] Жабитенко И.К., Кучеров И.Я. УФЖ **23**, 2, 263 (1978).
- [13] Демиденко А.А., Здебский А.П., Писковой В.И., Черная И.С. УФЖ **27**, 11, 1737 (1982).
- [14] Гуляев Ю.В., Ермоленко А.В., Зайцев Б.Д., Калинин В.Ю., Синицын Н.И. Акуст. журн. **35**, 1, 154 (1989).
- [15] Бражкин Ю.А., Коробов А.И., Лямов В.Е. ФТТ **23**, 5, 1545 (1981).
- [16] Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М. (1975). 680 с.

- [17] Graham R.A. J. Appl. Phys. **48**, 6, 2153 (1977).
- [18] Thurston R.N., Bragger K. Phys. Rev. **133A**, 1604 (1964).
- [19] Mason W.P., Thurston R.N. Physical acoustic. N.Y. (1975). V. 11, 364 p.
- [20] Блистанов А.А., Петраков В.С., Сорокин Н.Г., Чижииков С.И., Шаскольская М.П. Письма в ЖЭТФ **26**, 3, 141 (1977).
- [21] Bell R.O., Rupprecht G. Phys. Rev. **129**, 1, 90 (1963).
- [22] Акустические кристаллы. Справочник / Под ред. М.П.Шаскольской. М. (1982). 632 с.
- [23] Rupprecht G., Winter W.H. Phys. Rev. **155**, 3, 1019 (1967).
- [24] Winter W.H., Rupprecht G. Bull. Amer. Phys. Soc. **7**, 7, 438 (1962).
- [25] Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Буга С.Г. ПТЭ, **6**, 158 (1982).
- [26] Юшин Н.К., Сотников А.В. ФТТ **22**, 9, 2772 (1980).
- [27] Белый В.Н., Курилкина С.Н. ФТТ **35**, 10, 2794 (1993).