

Ферроэластоэлектрические явления в одноосном сегнетоэлектрическом кристалле ТГС

© Е.Ф. Дудник, В.М. Дуда, А.И. Кушнерёв

Днепропетровский государственный университет,
320625 Днепропетровск, Украина
E-mail: elf@ff.dsu.ua

(Поступила в Редакцию 26 апреля 1999 г.)

Рассмотрена возможность проявления в одноосном сегнетоэлектрическом кристалле ТГС ферроэластоэлектрических свойств. Путем анализа вида тензоров спонтанных пьезомодулей для каждого из 180° -х доменов, возникающих в результате фазового перехода в кристалле ТГС, определены возможные направления одновременного приложения электрического поля и механических напряжений для переключения кристаллов ТГС. Исследовано влияние одноосных механических напряжений σ_{11} , σ_{22} и σ_{33} на параметры насыщенных и ненасыщенных петель диэлектрического гистерезиса ТГС. Обнаружено переключение доменов в кристалле ТГС нетрадиционным способом — комбинацией полей $E_3\sigma_{12}$.

Кристаллы, у которых домены (ориентационные состояния) отличаются компонентами пьезоэлектрических констант, согласно классификации Аизу [1], относятся к ферроикам высшего порядка и носят название ферроэластоэлектриков (сегнетоэластоэлектриков). Переключение таких кристаллов из одного состояния в другое может осуществляться только посредством одновременного приложения электрического поля и механических напряжений. К классу ферроэластоэлектриков относятся, например, кристаллы кварца ниже фазового перехода из α - в β -модификацию ($T_c = 573.5^\circ\text{C}$) [2].

Симметричный анализ показывает, что все сегнетоэлектрики являются потенциальными ферроэластоэлектриками. Особенно благоприятными в плане изучения ферроэластоэлектрических свойств являются "чистые" одноосные сегнетоэлектрики, в которых влияние механических напряжений на процессы переключения не вуалируется сегнетоэластическими свойствами.

Типичным представителем "чистых" одноосных сегнетоэлектриков является триглицинсульфат, который при температуре 49.2°C испытывает фазовый переход $2m \leftrightarrow 2$, в результате чего возникают два ориентационных состояния (домена) S_1 и S_2 . Тензор спонтанных пьезоэлектрических модулей для одного из двух 180° -х доменов (S_1) имеет вид [3]

$$d_{ijk}^{S_1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 2d_{123} & 0 & 2d_{112} \\ d_{211} & d_{222} & d_{233} & 0 & 2d_{213} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2d_{323} & 0 & 2d_{312} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Тензор спонтанных пьезомодулей для 180° -х доменов S_2 можно получить путем умножения (1) на -1 .

Вид тензоров спонтанных пьезокоэффициентов (1) дает возможность определить направления, в которых необходимо одновременно приложить электрическое поле и механические напряжения для осуществления процессов переключения кристаллов ТГС, если они обладают ферроэластоэлектрическими свойствами. Это следу-

ющие комбинации:

$$E_1\sigma_{23}; E_1\sigma_{12}; E_2\sigma_{11}; E_2\sigma_{22}; E_2\sigma_{33}; E_2\sigma_{13}; E_3\sigma_{23}; E_3\sigma_{12}. \quad (2)$$

Далее приведены результаты исследований переключения кристаллов ТГС при одновременном приложении электрического поля и механических напряжений.

1. Методика эксперимента

Кристаллофизическая система координат, в соответствии с которой в данной работе изготавливались нужные кристаллофизические срезы кристаллов ТГС (X, Y, Z), аналогична принятой в работе [4]. Эксперименты по переключению кристаллов ТГС различными комбинациями электрического поля и механических напряжений проводились при помощи специально сконструированных кристаллодержателей, позволявших приложить к образцу одновременно электрического поле и механические напряжения либо во взаимно перпендикулярных направлениях, либо в одном и том же направлении.

На перпендикулярные полярированной оси поверхности образцов методом напыления платины или втирания графита наносились электроды. Изучалось влияние одноосных механических напряжений, приложенных вдоль оси X (σ_{11}), оси Y (σ_{22}) и оси Z (σ_{33}) на параметры петель диэлектрического гистерезиса (ПДГ), получаемых с помощью модифицированной схемы Сойера–Тауэра в интервале температур $20-50^\circ\text{C}$.

Для исследования возможности переключения кристаллов комбинациями полей $E_1\sigma_{23}$ и $E_3\sigma_{12}$ электроды наносились на поверхности образцов, перпендикулярные осям X и Y , и на поверхности, перпендикулярные осям Z и Y , соответственно. Поскольку одноименные пьезокоэффициенты в доменах с противоположной ориентацией вектора спонтанной поляризации в кристаллах ТГС одинаковы по модулю, но противоположны по знаку, измеряя пьезоэлектрический отклик на гранях,

перпендикулярных полярной оси Y при наложении на кристалл сжимающих механических напряжений σ_{22} , можно определить направление и степень поляризации образцов ТГС.

2. Переключение кристаллов ТГС комбинациями полей

$$E_2\sigma_{11}, E_2\sigma_{22}, E_2\sigma_{33}$$

Комбинации полей $E_2\sigma_{11}$, $E_2\sigma_{22}$ и $E_2\sigma_{33}$ достаточно просто реализуются экспериментально путем наложения сжимающих напряжений σ_{11} , σ_{22} и σ_{33} при наблюдении ПДГ.

Результаты исследований насыщенных ПДГ, соответствующих практически полному переключению кристаллов ТГС, при различных температурах при наложении одноосных механических напряжений сжатия σ_{11} , σ_{22} и σ_{33} представлены на рис. 1, 2. Как можно видеть из рис. 1, механические напряжения σ_{11} и σ_{22} приводят к уменьшению, а σ_{33} — к росту значений спонтанной поляризации P_s во всей области исследованных температур. По нашему мнению, такое поведение является следствием прямого пьезоэффекта и соответствует различным знакам пьезокоэффициентов ($\text{sign } d_{21} = \text{sign } d_{22} = -\text{sign } d_{23}$).

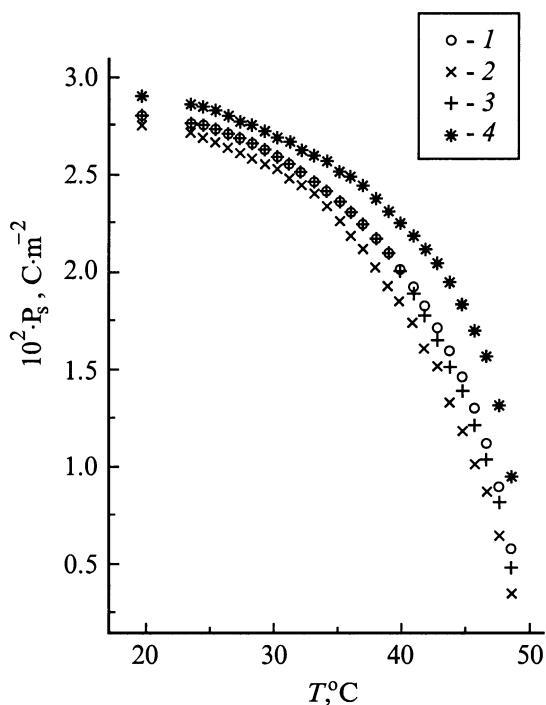


Рис. 1. Температурная зависимость спонтанной поляризации. 1 — без механического напряжения; 2 — под действием механического напряжения 40 МПа в направлении оси X ; 3 — под действием механического напряжения 3.6 МПа в направлении оси Y ; 4 — под действием механического напряжения 40 МПа в направлении оси Z .

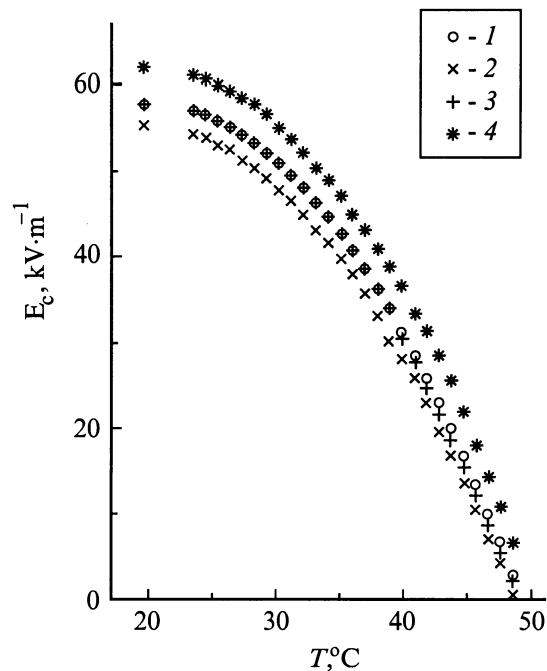


Рис. 2. Температурная зависимость коэрцитивного поля. 1 — без механического напряжения; 2 — под действием механического напряжения 40 МПа в направлении оси X ; 3 — под действием механического напряжения 3.6 МПа в направлении оси Y ; 4 — под действием механического напряжения 40 МПа в направлении оси Z .

Интересно отметить влияние соответствующих механических напряжений на величину коэрцитивного поля E_c (рис. 2). Из рис. 2 следует, что механические напряжения σ_{11} и σ_{22} уменьшают, а σ_{33} увеличивают E_c , т.е. соответственно либо способствуют, либо препятствуют процессам переполяризации в кристаллах ТГС.

В то же время исследование ненасыщенных ПДГ, соответствующих частичным процессам переполяризации, показывает, что при значениях напряженности электрического поля ниже некоторой "критической" величины (равной примерно величине E_c для насыщенных ПДГ) измеряемая величина поляризации (пропорциональная переполяризуемому объему кристалла) увеличивается при наложении механических напряжений σ_{11} либо σ_{22} и уменьшается при наложении напряжений σ_{33} , что противоположно действию соответствующих механических напряжений на насыщенную ПДГ. Полученные данные свидетельствуют о том, что и в данном случае механические напряжения σ_{11} и σ_{22} благоприятствуют движению доменов, в то время как напряжения σ_{33} затрудняют его. Необходимо отметить также, что "критическое" поле практически не меняется при наложении механических напряжений, а наблюдаемые явления носят обратимый характер.

Полученные результаты можно объяснить, если принять во внимание тот факт, что кристаллы ТГС являются не только сегнетоэлектриками, но и ферроэластоэлек-

триками. Известно [1], что одновременное приложение к ферроэластоэлектрику в определенных кристаллографических направлениях электрического поля и механических напряжений приводит к его монодоменизации, т.е. установлению какого-либо одного ориентационного состояния. Изменение знака одного из внешних воздействий (смена сжатия на растяжение или изменение направления электрического поля) приводит к изменению одного ориентационного состояния на другое посредством движения доменных стенок, подобно тому, как это происходит в сегнетоэлектриках. Однако поскольку ферроэластоэлектрики являются ферроиками более высокого порядка, чем сегнетоэлектрики, то соответствующие электрические и механические коэрцитивные поля оказываются достаточно высокими при низких температурах, вдали от точки структурного фазового перехода. Например, в кристаллах кварца движение ферроэластоэлектрических доменов при одновременном действии электрического поля и механических напряжений наблюдается только при температуре на 3 градуса ниже $\alpha \rightarrow \beta$ -перехода [2].

Исследуемые кристаллы ТГС в отличие от кристаллов кварца не являются чистыми ферроэластоэлектриками, а в основном известны как "чистые" сегнетоэлектрики. Поскольку 180°-е сегнетоэлектрические домены в ТГС являются одновременно и ферроэластоэлектрическими доменами, то они подвержены действию двух движущих сил. Низкая температура Кюри кристаллов ТГС дает основания полагать, что ферроэластоэлектрические свойства в них будут проявляться при комнатной температуре.

Переменное электрическое поле E_2 является переполаризующим для сегнетоэлектрического состояния, в то же время в комбинации с механическими напряжениями оно является источником еще одной движущей силы, обусловленной ферроэластоэлектрическими свойствами. Эти две движущие силы в зависимости от знаков пьезокоэффициентов могут действовать как в одном, так и в противоположных направлениях. Учитывая это и принимая во внимание знаки пьезокоэффициентов ($-d_{21}$, $-d_{22}$, $+d_{23}$), можно сделать вывод о том, что комбинации полей $E_2\sigma_{11}$ и $E_2\sigma_{22}$ способствуют движению доменных стенок, в то время как комбинация полей $E_2\sigma_{23}$ препятствует их движению.

Очевидно, что, меняя знак механического напряжения (т.е. меняя сжатие на растяжение), можно изменить поведение как насыщенных, так и ненасыщенных ПДГ на противоположное тому, что наблюдалось в настоящей работе.

3. Переключение кристаллов ТГС комбинациями полей $E_1\sigma_{23}$ и $E_3\sigma_{12}$

Поскольку ТГС является одноосным сегнетоэлектриком, переполаризация которого осуществляется наложением электрического поля вдоль оси Y , то переключение

при помощи одной из комбинаций воздействий $E_1\sigma_{12}$, $E_1\sigma_{23}$, $E_3\sigma_{12}$, $E_3\sigma_{23}$, когда электрическое поле перпендикулярно P_s , являлось бы прямым доказательством того, что эти кристаллы относятся также и к ферроэластоэлектрикам. Нами была проведена экспериментальная проверка возможности такого переключения.

В начале эксперимента образцы монодоменизировались электрическим полем 300 кВ/м, приложенным вдоль полярной оси Y , после чего измерялось значение пьезомодуля d_{22} и по его знаку определялось направление, в котором поляризован кристалл. Затем к образцам прикладывалась комбинация полей $E_3\sigma_{12}$ или $E_1\sigma_{23}$. Напряженность электрического поля имела значение 400 кВ/м, а величина механического напряжения — 15 МПа. Эксперименты производились при комнатной температуре. По истечении некоторого времени поля снимались, и снова измерялся пьезоотклик образца. Путем сравнения значений и знаков пьезооткликов до воздействия и после него можно было судить о степени переключения образца.

Комбинация полей $E_1\sigma_{23}$ слабо изменяет пьезоотклик образца даже при длительном их воздействии. В то же время для нескольких образцов после воздействия комбинации полей $E_3\sigma_{12}$ в течение 30–90 минут было зафиксировано изменение знака пьезоотклика. Приложение к этим же образцам электрического поля и механических напряжений той же величины и той же длительности, но отдельно друг от друга, изменения пьезоотклика не вызывало. Полученный результат указывает на то, что комбинация полей $E_3\sigma_{12}$ способна вызывать переключение P_s в кристалле ТГС. Это позволяет отнести кристаллы ТГС к классу сегнетоэлектриков и ферроэластоэлектриков.

Отметим, что приведенные выше результаты носят предварительный характер и в настоящее время уточняются с помощью иных независимых экспериментов.

Список литературы

- [1] K. Aizu. J. Phys. Soc. Jap. **34**, 1, 121 (1973).
- [2] J.W. Laughner, V.K. Wadhawan, R.E. Newnham. *Ferroelectrics* **36**, 439 (1981).
- [3] Е.Ф. Дудник, В.М. Дуда, А.И. Кушнерев. Укр. физ. журн. **43**, 2, 243 (1998).
- [4] В.П. Константинова, И.М. Сильвестрова, К.С. Александров. В сб.: Физика диэлектриков. Изд-во АН СССР, М. (1960). С. 351.