

**К ИЗМЕРЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА
СТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ¹****Б.П.Сорокин¹, Д.А.Глушков¹, А.В. Кодяков¹,
Л.Н. Безматерных², В.Л. Темеров², И.А.Гудим^{2*}**

Рассматривается метод измерения коэффициентов пьезоэлектрического эффекта при статическом нагружении. Исследованы образцы пьезоэлектрических кристаллов: германо- и силикосилленинты, кварц, лангасит, а также вновь синтезированные пьезоэлектрики $Pb_3Ga_2Ge_4O_{14}$ и $GdFe_3(BO_3)_4$ ². Сравнение с известными из литературы данными, полученными другими методами, показало хорошее соответствие результатов. Поэтому применение метода в качестве дополнительного в исследованиях электромеханических свойств кристаллов оправдано его простотой и надежностью получаемых результатов. Впервые были получены значения некоторых пьезомодулей кристаллов $Pb_3Ga_2Ge_4O_{14}$ и $GdFe_3(BO_3)_4$, которые являются слабыми пьезоэлектриками.

Измерение коэффициентов пьезоэлектрического эффекта в кристаллах - важная задача с точки зрения определения вероятных направлений применения таких материалов. Наиболее точным методом определения констант пьезоэффекта к настоящему времени является динамический резонансный метод пьезоэлектрического резонатора. Для таких резонаторов применяют бруски, колеблющиеся по длине в поперечном электрическом поле (измеряются компоненты тензора пьезоэлектрических модулей d_{nij} на относительно низких частотах – до нескольких сотен кГц), либо пластинки, резонансный размер которых совпадает с толщиной – толщинные и толщинно-сдвиговые резонаторы (измеряются компоненты тензора пьезоэлектрических постоянных e_{nij} на высоких частотах – вплоть до 100 МГц). Кроме того, измерить полный набор тензорных коэффициентов e_{nij} можно, исследуя распространение высокочастотных объемных упругих волн в определенных направлениях кристалла-пьезоэлектрика, включая направления с продольной пьезоактивностью.

¹ При поддержке ФЦП «Интеграция».

* ¹ © Б.П.Сорокин, Д.А.Глушков, А.В.Кодяков, 2004; Красноярский госуниверситет (Россия), E-mail: bsorokin@lan.krasu.ru ² © Л.Н.Безматерных, В.Л.Темеров, И.А.Гудим, 2004; Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск (Россия), E-mail: bezm@iph.krasn.ru

² Кристаллы синтезированы в лаборатории магнитных материалов Института физики им.Л.В.Киренского СО РАН.

Однако применение резонансных методов предполагает использование образцов с прецизионной кристаллофизической ориентировкой и высокоточным соблюдением заданной геометрии. Для изготовления образцов в виде брусков требуются значительные линейные размеры исходной заготовки, что, как правило, проблематично для вновь синтезируемых кристаллов.

Поэтому представляется, что относительно простой метод измерения констант пьезоэлектрического эффекта при статическом нагружении может быть востребован для получения начальных результатов. Достижение в этом случае приемлемой точности обеспечивается использованием вольтметра-электрометра с высоким входным сопротивлением.

Для вычисления коэффициентов пьезомодулей d_{ijk} при статическом нагружении пьезоэлектрических образцов используем уравнение прямого пьезоэффекта [1]:

$$P_i = d_{ijk} \sigma_{jk}, \quad (1)$$

где P_i – вектор поляризации, σ_{jk} – тензор механических напряжений. Рассмотрим случай продольного пьезоэлектрического эффекта, тогда уравнение (1) примет вид

$$P_1' = d'_{111} \sigma'_{11}, \quad (2)$$

где штрихи над величинами означают, что соответствующие векторы или тензоры рассматриваются в “повернутой” кристаллофизической системе координат (КФСК), причем поляризация пьезоэлектрика и направление сжатия (или растяжения) совпадают с осью OX'_1 КФСК. Поскольку $|\vec{P}| = \Sigma_{пол} = \frac{q}{S}$ ($\Sigma_{пол}$ – по-

верхностная плотность и q - величина поляризационных зарядов, S – площадь образца), а $\sigma'_{11} = \frac{F}{S}$ (F – величина силы, приложенной вдоль направления OX'_1), то для вычисления пьезомодуля имеем:

$$d'_{111} = \frac{q}{F}. \quad (3)$$

При использовании соотношения (3) подразумевается, что направления действия силы и вектора поляризации совпадают. С точки зрения упрощения метода измерений важно также то обстоятельство, что в случае продольного пьезоэффекта в измерениях не нужно учитывать значение площади образца.

Используя определение тензора 3-го ранга, с помощью стандартной процедуры легко связать d'_{111} с определенными линейными комбинациями компонент тензора пьезомодулей кристалла избранной точечной группы:

$$d'_{111} = a_{1i} a_{1j} a_{1k} d_{ijk}, \quad (4)$$

где a_{1i}, \dots, a_{1k} – компоненты матрицы ортогональных преобразований. За исключением точечных групп 422 и 622, где продольный пьезоэлектрический эффект невозможен [1], с помощью (4) можно составить систему необходимых и проверочных уравнений для соответствующих кристаллофизических направлений, что позволит определить компоненты тензора d'_{111} с наибольшей точностью.

Рассмотрим тензор d'_{111} в приложении к кубическим пьезоэлектрическим кристаллам (точечные группы симметрии $\bar{23}$, $43m$). Для них существуют 3 компоненты тензора пьезомодулей, не являющиеся независимыми: $d_{14} = d_{25} = d_{36}$ (в матричной форме записи). Можно показать [2], что тензор d'_{111} имеет максимальное значение в случае, когда ось OX'_1 совпадает с направлением $[111]$, при этом

$$d'_{111} \approx 0,588d_{14}. \quad (5)$$

Рассматривая пьезоэлектрические кристаллы симметрии 32, можно получить, что

$$d'_{111} = d_{111} \quad (6)$$

в направлении $OX'_1 || [100]$.

Для проведения эксперимента использована установка, блок-схема которой показана на рис.1. В эксперименте использованы ориентированные с помощью рентгеновского дифрактометра (точность не хуже $\pm 5^\circ$) образцы пьезоэлектрических кристаллов: германо- и силикосиллениты $Vi_{12}GeO_{20}$, $Vi_{12}SiO_{20}$ (точечная симметрия 23), кварц SiO_2 , лангасит (точечная симметрия 32), а также вновь синтезированные пьезоэлектрики $Pb_3Ga_2Ge_4O_{14}$ и $GdFe_3(BO_3)_4$ (точечная симметрия 32). В процессе эксперимента использованы нагрузки $F = 0 \dots 70$ Н, при этом вольтметром - электрометром непосредственно регистрировались поверхностные заряды, обусловленные прямым пьезоэлектрическим эффектом. Для всех исследованных образцов получены линейные зависимости $q = f(F)$ (рис.2). Статистическая погрешность результатов эксперимента обрабаты-

лась по методу Стьюдента, полученные значения пьезомодулей (с надежностью 0,9) приведены в табл.1 в сравнении с известными из литературы данными, полученными другими методами.

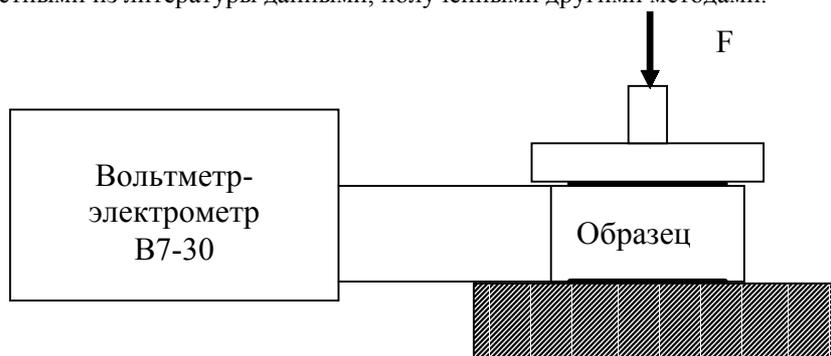


Рис.1. Схема эксперимента по измерению статического пьезоэффекта

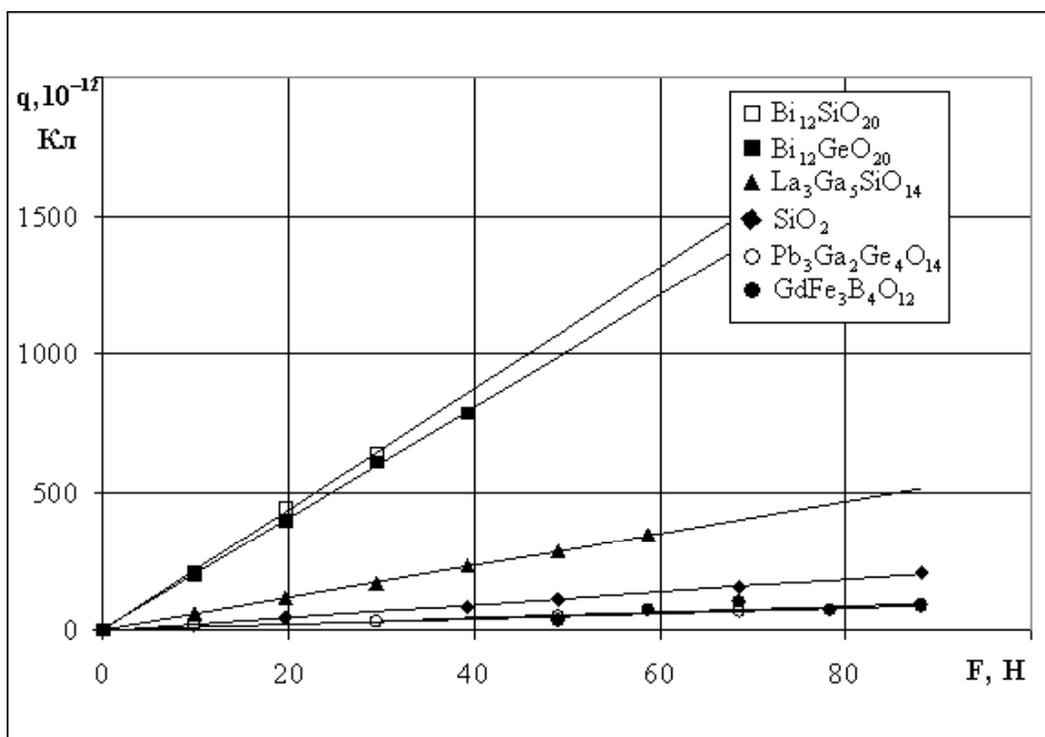


Рис.2. Зависимости $q = f(F)$ исследованных пьезоэлектриков

Таблица 1

Пьезоэлектрические модули кристаллов, измеренные статическим методом (297 К)

Наши измерения		Литературные данные		
$La_3Ga_5SiO_{14}$	$ d_{11} , 10^{-11}$ Кл/Н	$0,58 \pm 0,05$	0,50	[3]
SiO_2		$0,22 \pm 0,05$	0,23	[4]
$Pb_3Ga_2Ge_4O_{14}$		$0,10 \pm 0,05$	-	-
$GdFe_3(BO_3)_4$		$0,10 \pm 0,05$	-	-
$Bi_{12}SiO_{20}$	$ d_{14} , 10^{-11}$ Кл/Н	$3,70 \pm 0,05$	4,0	[5]
$Bi_{12}GeO_{20}$		$3,47 \pm 0,05$	3,76	[5]

Можно заключить, что измеренные данным методом значения коэффициентов пьезоэффекта в кристаллах $Bi_{12}GeO_{20}$, $Bi_{12}SiO_{20}$, SiO_2 и $La_3Ga_5SiO_{14}$ находятся в хорошем соответствии с известными результатами. Следовательно, применение этого метода в качестве дополнительного в исследованиях электромеханических свойств кристаллов вполне оправдано простотой и достаточной надежностью получаемых результатов. Кроме того, нами впервые были получены значения пьезомодулей кристаллов $Pb_3Ga_2Ge_4O_{14}$ и

$GdFe_3(BO_3)_4$, измерения которых акустическим методом были недостаточно точными, а для резонансного метода размеры образцов слишком малы. Можно отметить, что данные кристаллы относятся к слабым пьезоэлектрикам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаскольская М.П. Кристаллография / М.П. Шаскольская. - М.: Высш.шк., 1976. – С.391.
2. Сорокин Б.П. Физические свойства кристаллов. Кристаллофизика анизотропных диэлектриков: Учеб. пособие / Б.П. Сорокин. – Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 1990. – С.108.
3. Aleksandrov K.S., Sorokin B.P., Turchin P.P., Glushkov D.A. Nonlinear piezoelectricity in $La_3Ga_5SiO_{14}$ piezoelectric single crystals // *Ferroelectrics Letters*. 1992. V.14. P.115-125.
4. Смагин А.Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А.Г.Смагин, М.И.Ярославский. - М.:Энергия, 1970. – С.488.
5. Блистанов А.А. Акустические кристаллы: Справочник / А.А.Блистанов, В.С.Бондаренко, Н.В.Переломова, Ф.Н.Стрижевская, В.В.Чкалова, М.П.Шаскольская. - М.: Наука, ГРФМЛ, 1982. – С.632.

STATIC METHOD OF PIEZOELECTRIC EFFECT COEFFICIENTS MEASURING

**B.P. Sorokin, D.A. Glushkov, A.V. Kodyakov,
L.N. Bezmaternych, V.L. Temerov, I.A. Gudim**

The method of measurement of piezoelectric effect coefficients at static pressure has been considered. Samples of piezoelectric crystals to be used are: $Bi_{12}GeO_{20}$, $Bi_{12}SiO_{20}$, quartz, langasite, and also new synthesized piezoelectrics as $Pb_3Ga_2Ge_4O_{14}$ and $GdFe_3(BO_3)_4$. The comparison with known data received other methods has shown good conformity of results. Therefore application of this method as additional in researches of electromechanical properties of crystals is justified by its simplicity and reliability of received results. First time values of some piezoelectric constants of crystals $Pb_3Ga_2Ge_4O_{14}$ and $GdFe_3(BO_3)_4$ have obtained. It was found that these materials are weak piezoelectrics.