

коэффициент диэлектрической восприимчивости в интервале 200—400 К (интервал измерения упругих свойств) имеет порядок  $10^{-4}$ , а относительная точность измерения составляет  $10^{-3}$ .

Представляется естественным связать обнаруженный эффект запоминания модуля упругости в кристалле ТБЛ с наличием в нем несоизмеримой модуляции. Можно предположить, что температурная зависимость модуля упругости кристалла существенным образом определяется температурной зависимостью волнового вектора модуляции  $C_{ij} = C_{ij}(T, \mathbf{q}(T))$ . Это предположение представляется разумным, поскольку в данном случае температура  $T^*$  значительно ниже  $T_i$  (вблизи  $T_i$  температурная зависимость модуля упругости определяется главным образом поведением амплитуды параметра порядка). Соответствующий температурный коэффициент имеет вид  $dC/dT = (\partial C/\partial T)_p + (\partial C/\partial q)(\partial q/\partial T)$ . Из полученных нами экспериментальных результатов в рамках сделанного предположения следует, что первый член этого выражения для кристалла ТБЛ достаточно мал, а температурное поведение модуля упругости определяется главным образом вторым членом. В окрестности  $T^*$  волновой вектор модуляции может быть фиксирован из-за перераспределения диффундирующих дефектов ( $\partial_i/\partial T \sim 0$ ), и модуль упругости кристалла оказывается при этом практически не зависящим от температуры.

Запоминание свойств кристалла, длительно хранящегося при комнатной температуре, имеет, по-видимому, общий характер. По существу такой же природы эффект наблюдался ранее при исследовании фотогальванического тока в кристалле с несоизмеримой сверхструктурой ниобате бария—натрия [6]. То обстоятельство, что память упругости не наблюдалась в других кристаллах с несоизмеримой модуляцией, можно объяснить оптимальностью значений соответствующих констант именно кристалла ТБЛ.

Авторы благодарны Я. В. Бураку и В. В. Зарецкому за предоставленные монокристаллы и С. Х. Есяну за указание на последнюю из цитируемых работ.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Gruner G. // Rev. Mod. Phys. 1988. V. 60. N 4. P. 1129—1181.
- [2] Jamet J. P. // Phase Transitions. 1988. V. 11. P. 335—371.
- [3] Bhalla A. S., Cross L. E., Whatmore R. W. // Jap. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. Suppl. 24—2. P. 727—729.
- [4] Зарецкий В. В., Бурак Я. В. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. № 4. С. 198—201.
- [5] Жигадо Н. Д., Зарецкий В. В. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. № 9. С. 498—500.
- [6] Есян С. Х., Ивченко Е. Л., Кавецкий А. Г. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 9. С. 2746—2752.

Институт кристаллографии АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
22 августа 1989 г.  
В окончательной редакции  
28 декабря 1989 г.

УДК 531.625.537.226.4

© Физика твердого тела, том 32, № 7, 1990  
Solid State Physics, vol. 32, N 7, 1990

## КВАДРАТИЧНЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $(\text{Bi}, \text{La})\text{FeO}_3$

В. А. Мурашов, Д. Н. Раков, Н. А. Экономов,  
А. К. Звездин, И. С. Дубенко

Кристаллы  $\text{BiFeO}_3$  и твердых растворов  $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$  ( $x=0\div 0.24$ ) являются сегнетомагнетиками [1] — веществами, сочетающими магнитное упорядочение с сегнетоэлектричеством. Ромбоэдрическое искаженный перовскит  $\text{BiFeO}_3$  (пр. гр.  $R3c$ ) является антиферромагнетиком G-типа

со сложной спиральной магнитной структурой [2]. Среди других сегнетомагнетиков его выделяют высокие температуры Кюри и Нееля (1083 и 633 К соответственно). Наличие спиральной магнитной структуры не допускает проявления линейного магнитоэлектрического (МЭ) эффекта [3], возможно наблюдение только квадратичного  $\Delta P = \beta H^2$ , где  $\Delta P$  — индуцированная магнитным полем поляризация,  $H$  — величина магнитного поля,  $\beta$  — магнитоэлектрическая восприимчивость. Такой эффект обнаружен в кристаллах  $\text{BiFeO}_3$  при 4.2 К [3]. При замещении части висмута на лантан в кристалле возникает слабый ферромагнитный момент и симметрия его понижается до триклинной (пр. гр.  $R\bar{1}$ ) [1].

В этой работе поставлены две цели: исследование квадратичного МЭ эффекта в кристаллах  $(\text{Bi}, \text{La})\text{FeO}_3$  в широком интервале температур (вплоть до комнатной) и изучение влияния на величину МЭ эффекта замещения части висмута на лантан.

Кристаллы  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{Bi}_{0.92}\text{La}_{0.08}\text{FeO}_3$  получали спонтанной кристаллизацией из раствора в расплаве по методике, описанной в [4, 5]. Кристаллы имели псевдокубическую огранку, размер  $\text{BiFeO}_3$  до 10 мм в поперечнике,  $\text{Bi}_{0.92}\text{La}_{0.08}\text{FeO}_3$  — до 4–5 мм. МЭ эффект изучали на срезах (100) и (110)  $\text{BiFeO}_3$ , (100) —  $\text{Bi}_{0.92}\text{La}_{0.08}\text{FeO}_3$ . Исследовались пластины толщиной 0.5 мм, площадью 4–12 мм<sup>2</sup>, с нанесенными серебряными электродами.

Измерения МЭ эффекта проводились в статическом и динамическом режимах. При ис-

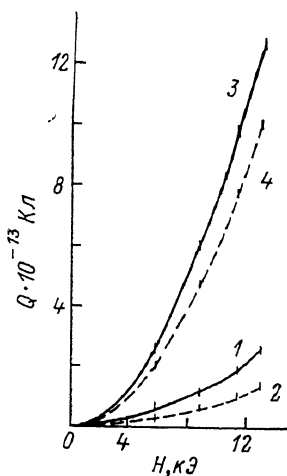


Рис. 1. Зависимости индуцированного магнитным полем заряда  $Q$  от величины поля  $H$  для кристаллов  $\text{BiFeO}_3$  (1, 2) и  $\text{Bi}_{0.92}\text{La}_{0.08}\text{FeO}_3$  (3, 4) при 4.2 (1, 3) и 77 К (2, 4). Плоскость монокристаллических пластин (100), площадь поверхности 7 мм<sup>2</sup>.

следованиях в статическом режиме образец в экране из нержавеющей стали помещали в кристате между полюсов магнита  $H$  до 13 кЭ. Возникающий при изменении поля заряд регистрировался с точностью  $2 \cdot 10^{-14}$  Кл универсальным вольтметром-электронметром В7-30. Входная емкость прибора в  $\sim 10^4$  раз больше емкости измерительной цепи, поэтому ее влияние не учитывалось. В исследованиях в динамическом режиме регистрировали напряжение, возникающее на электродах образца, помещенного в переменное магнитное поле. Поле  $h(t) = h_0 \cos 2\pi ft$ , где  $h_0 = 16$  Э,  $f = 50$ – $100$  кГц, создавалось катушкой, намотанной на пластмассовый держатель, внутри которого расположили образец. Возникающее напряжение регистрировалось с помощью селективного вольтметра У2-8. Наводки компенсировали, подавая на вход усилителя сигнал, равный по величине наводке и в противофазе с ней. Держатель с образцом помещали между полюсов электромагнита  $H$  до 7 кЭ.

На рис. 1 представлена зависимость заряда  $Q$ , возникающего на образцах  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{Bi}_{0.92}\text{La}_{0.08}\text{FeO}_3$ , от магнитного поля  $H$  при 4.2 и 77 К. Для обоих образцов наблюдается квадратичный эффект  $Q = \beta SH^2$ , где  $S$  — площадь пластин.

Тензор коэффициентов квадратичной магнитоэлектрической восприимчивости  $\beta$  — тензор 3-го ранга. Для  $\text{BiFeO}_3$  (класс симметрии  $3m$ ) определены все 4 независимых коэффициента. Для этого исследованы зависимости  $Q$  от угла поворота  $\theta$  кристаллов в магнитном поле 13 кЭ срезов (100) и (110) при вращении вокруг (001). Выражения  $Q = f(\theta)$  имеют вид: для (100)

$$Q = \left[ \frac{\sqrt{2}}{3} (\sin^2 \theta - \sin 2\theta) \beta_{111} + \frac{1}{3\sqrt{3}} (\cos 2\theta + \cos^2 \theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta) \beta_{113} + \right.$$

$$+ \frac{1}{3\sqrt{3}} (2 - \sin 2\theta) \beta_{311} + \frac{1}{3\sqrt{3}} (1 + \sin 2\theta) \beta_{333} \Big] SH^2,$$

для (110)

$$Q = \left[ \left( \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \sin^2 \theta \right) \beta_{111} + \sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta \cos \theta \beta_{113} \right] SH^2.$$

Отсюда определены  $\beta_{ijk}(c/A)$ : при 4.2 К  $\beta_{111} = (2.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-20}$ ;  $\beta_{113} = (-5.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-20}$ ;  $\beta_{311} = (-9.4 \pm 0.5) \cdot 10^{-20}$ ;  $\beta_{333} = (13.3 \pm 0.5) \cdot 10^{-20}$ ; при 77 К  $\beta_{111} = (2.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-20}$ ;  $\beta_{113} = (-3.6 \pm 0.5) \cdot 10^{-20}$ ;  $\beta_{311} = (-4.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-20}$ ;  $\beta_{333} = (5.3 \pm 0.5) \cdot 10^{-20}$ . Величины  $\beta_{ijk}$  при 4.2 К отличаются в меньшую сторону от данных [3], что связано, по-видимому, с особенностями доменной структуры кристаллов, полученных разными методами.

Для триклинных кристаллов  $\text{Vi}_{0.92}\text{La}_{0.08}\text{FeO}_3$  тензор содержит 18 независимых компонентов, которые из-за большой трудоемкости экспериментов не определяли. Исследовали срезы {100}, для которых при  $\theta = 0^\circ$  величина  $\beta = (16.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-20}$  при 4.2 К,  $(13.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-20}$  с/А при 77 К.

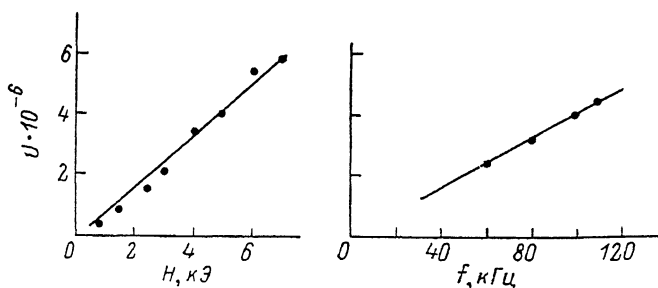


Рис. 2. Зависимости переменного напряжения  $U$ , возникающего в результате МЭ эффекта на пластине кристалла  $\text{Vi}_{0.92}\text{La}_{0.08}\text{FeO}_3$  (срез {100}, площадь пластины  $12 \text{ мм}^2$ ) от  $H$  и  $f$ .

Наблюдениям МЭ эффекта в статическом режиме при более высоких температурах мешает резкое увеличение электропроводности этих кристаллов [6]. Поэтому при комнатной температуре исследования проводили в динамическом режиме. Исследовали кристаллы  $\text{Vi}_{0.92}\text{La}_{0.08}\text{FeO}_3$ , обладающие наибольшим эффектом.

Плоскость пластины располагалась перпендикулярно направлениям переменного и постоянного магнитных полей. Регистрируемое вольтметром напряжение равно

$$U(t) = \frac{dQ}{dt} R = R\beta S \cdot 2(H + h_0 \cos 2\pi ft) \sin 2\pi ft h_0 \cdot 2\pi f \approx R \cdot 4\pi\beta S H h_0 f \sin 2\pi ft,$$

где  $R$  — эквивалентное сопротивление измерительной цепи (1.4 кОм). Амплитуда наблюдаемого сигнала  $U = 4\pi\beta R S H h_0 f$ .

На рис. 2 приведены зависимости  $U$  от частоты  $f$  и величины внешнего магнитного поля  $H$ . Пропорциональность  $U$  частоте и величине поля соответствует приведенной выше формуле. Величина коэффициента  $\beta = (36 \pm \pm 1) \cdot 10^{-20}$  с/А близка к значениям, определенным в статическом режиме.

Таким образом, частичное замещение висмута на лантан в кристалле  $\text{ViFeO}_3$  приводит к увеличению МЭ эффекта в  $\sim 6$  раз. Впервые удалось наблюдать квадратичный МЭ эффект при 77 К и комнатной температуре.

#### Список литературы

- [1] Мурашов В. А., Раков Д. Н., Буш А. А., Ионов В. М., Титов Ю. В., Веневцев Ю. Н. // Тез. докл. III Всес. конф. по физико-химическим основам технологии сегнетоэлектрических и родственных материалов. Звенигород, 1988. С. 91.
- [2] Sosnowska I., Peterlin-Neumaier T., Steichele E. // J. Physic C: Sol. St. Phys. 1982. V. 15. N 23. P. 4835—4346.

- [3] Tabares-Munoz C., Rivera J.-P., Bezines A., Monnier A., Schmid H. // Jap. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. Suppl. 24—2. P. 1051—1053.
- [4] Раков Д. Н., Мурашов В. А., Буш А. А., Веневцев Ю. Н. // Кристаллография. 1988. Т. 33. № 2. С. 445—449.
- [5] Мурашов В. А., Раков Д. Н., Титов Ю. В. // Тез. докл. VII Всес. конф. по росту кристаллов. М., 1988. Т. 2. С. 232—233.
- [6] Мурашов В. А., Раков Д. Н., Буш А. А., Ионов В. М. и др. // Тез. докл. IV Всес. конф. по физике и химии редкоземельных полупроводников. Новосибирск, 1987. С. 134.

Институт информатики МИРЭА  
Москва

Поступило в Редакцию  
31 июля 1989 г.  
В окончательной редакции  
28 декабря 1989 г.

© Физика твердого тела, том 32, № 7, 1990  
Solid State Physics, vol. 32, N 7, 1990

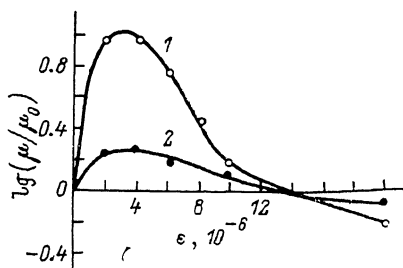
## МЕХАНИЗМ ИЗМЕНЕНИЯ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ

П. И. Баранский, А. Е. Беляев, С. М. Комирченко, Н. В. Шевченко

В [1, 2] было показано, что ультразвуковая обработка (УЗО) твердых растворов  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  (КРТ) позволяет проводить модификацию их дефектной структуры. Об этом (хотя и косвенно) свидетельствуют изменения подвижности носителей заряда, измеренной при температуре, когда основными источниками рассеяния являются ионизированные примеси и собственные дефекты. Эти изменения, как видно из рисунка, сводятся к следующему.

При малых амплитудах деформации (когда не происходит генерации новых точечных дефектов, о чем свидетельствует неизменность коэффициента Холла  $R_x$ ) подвижность после УЗО возрастает, при больших (когда возможны и генерация новых точечных дефектов, что также подтверждается холловскими измерениями, и размножение дислокаций) — падает. Снижение температуры, при которой проводится обработка, существенно уменьшает эффект.

Одной из причин, вызывающих увеличение подвижности, могут быть стимулированные ультразвуком диффузионные процессы, приводящие к рассасыванию кластеров дефектов и пространственному перемещению точечных дефектов к стокам (в частности, к дислокациям, малоугловым границам, свободной поверхности) и их аннигиляции. Влияние ультразвука в этом случае сводится к уменьшению энергии активации диффузии  $Q_A$  за счет передачи энергии упругих волн, запасаемой фононами, термостату [3]. Однако если учесть частоты, на которых проводилась УЗО в нашем случае (0.1—1.0 МГц), и время, в течение которого образец подвергался воздействию ультразвука ( $\approx 30$  мин), то, как показывают оценки, уменьшение  $Q_A$  оказывается столь незначительным, что посредством его нельзя объяснить наблюдаемые изменения подвижности.



Зависимость подвижности (при  $T=4.2$  К) от амплитуды деформации при УЗО, проводимой при 300 (1) и 77 К (2).