

# Магнитоэластический эффект в сегнетоэлектрических кристаллах $\text{NaNO}_2$

© Б.И. Смирнов, Н.Н. Песчанская, В.И. Николаев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: smir.bi@pop.ioffe.rssi.ru

(Поступила в Редакцию 22 мая 2001 г.)

Методом лазерной интерферометрии исследовалось влияние постоянного магнитного поля (ПМП) на скорость пластической деформации (ползучести)  $\dot{\epsilon}$  сегнетоэлектрических кристаллов  $\text{NaNO}_2$  при сжатии. Установлено, что приложение ПМП к нагруженному образцу приводит к увеличению скорости ползучести, а при удалении ПМП величина  $\dot{\epsilon}$  уменьшается. Предварительная выдержка ненагруженного образца в ПМП также влияет на скорость его деформации при последующем нагружении. Наблюдаемый магнитоэластический эффект наиболее выражен в некотором интервале значений  $\dot{\epsilon}$ , а его величина для сегнетоэлектрика  $\text{NaNO}_2$  в несколько раз больше, чем для кристаллов LiF.

Первоначально магнитоэластический эффект (МЭЭ) в немагнитных кристаллах ( $\text{NaCl}$ ) был обнаружен на микроскопическом уровне в виде перемещений дислокаций в образцах, помещенных в импульсное [1] или постоянное [2] магнитное поле при отсутствии механической нагрузки. Однако в [1] наблюдаемый эффект связывался с воздействием на дислокации не магнитного, а возникающего при этом вихревого электрического поля.

В дальнейшем было установлено, что МЭЭ заключается не только в увеличении подвижности индивидуальных дислокаций [3,4], он проявляется также на макроскопическом уровне, приводя к понижению предела текучести [5,6], уменьшению микротвердости [7] и изменению акустических параметров (внутреннего трения) [8]. Воздействие магнитного поля на пластичность наблюдалось для целого ряда немагнитных материалов: ионных кристаллов [1–8], полимеров [9–11], полупроводников [12,13], молекулярных кристаллов [14,15] и диамагнитных металлов [16–18]. (Более полный набор ссылок по МЭЭ см. в обзоре [19].) При этом, согласно [6], природу указанного МЭЭ принято связывать со спиновой конверсией в примесных центрах, приводящей к перестройке их электронной структуры и соответствующему снижению их взаимодействия с дислокациями.

Таким образом, проведенные к настоящему времени эксперименты показывают, что наличие МЭЭ в определенных условиях можно ожидать практически в любом немагнитном материале. В данной работе нами в качестве объекта исследования были выбраны сегнетоэлектрические кристаллы  $\text{NaNO}_2$ , которые содержат поляризованные области (домены) и, как было показано ранее [20], демонстрируют специфический поляризационный электроэластический эффект. На этих кристаллах изучалось влияние магнитного поля на скорость пластической деформации под действием постоянных сжимающих напряжений; было установлено, что в определенных условиях магнитное поле приводит к существенному увеличению указанной скорости.

## 1. Экспериментальная методика

В работе использовались монокристаллы  $\text{NaNO}_2$ , выращенные из расплава методом Киропулоса и отожженные при 500 К в течение 48 h. Рабочие образцы вырезались нитяной пилой в виде прямоугольных параллелепипедов размером  $2 \times 3 \times 6$  mm. Кристаллографическая ориентация образцов выбиралась так, чтобы их можно было деформировать пластически по известным системам скольжения  $\{110\}\langle 111 \rangle$  и  $(001)[100]$  [21].

Образцы деформировались сжатием под действием постоянных напряжений  $\sigma$  при комнатной температуре. Для регистрации процесса деформации во времени использовался метод лазерной интерферометрии [22], который позволяет измерять скорость относительной деформации  $\dot{\epsilon}$  при малых изменениях длины образца  $l_0$ . Одно биение на интерферограмме соответствует приращению деформации на  $0.3 \mu\text{m}$ , а величина  $\dot{\epsilon} = \lambda\nu/2l_0$ , где  $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$  — длина волны лазерного излучения,  $\nu$  — частота биений. В результате скорость неупругой деформации можно определять на базе  $\Delta l = 0.3 \mu\text{m}$  с точностью  $\sim 1\%$ , что позволяет регистрировать слабые эффекты, которые нивелируются на традиционных кривых ползучести деформация–время.

Деформационные опыты в постоянном магнитном поле и без него производились в установке, все детали которой в области действия магнитного поля были изготовлены из немагнитных материалов. Магнитное поле с магнитной индукцией  $B = 0.2$  Т создавалось путем надвигания постоянного магнита в процессе деформирования образца, так чтобы последний располагался между полюсами магнита. Магнитное поле было направлено перпендикулярно оси образца. При этом особое внимание уделялось возможному изменению скорости деформации как при включении, так и при удалении постоянного магнитного поля (ПМП). Значения  $\dot{\epsilon}$  измерялись при одинаковых приращениях деформации до и после изменения поля.

Кроме того, проводились опыты по исследованию скорости ползучести образца после его экспозиции в магнитном поле в ненагруженном состоянии. Время экспозиции составляло 10 min, а скорость ползучести измерялась через 5 s после нагружения сразу же после удаления ПМП.

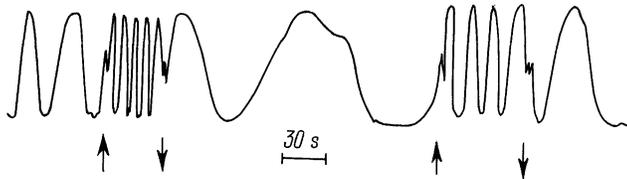
Для сравнения аналогичные эксперименты были проведены также на монокристаллах LiF размером  $5 \times 5 \times 10 \text{ mm}$  при скольжении по системам  $\{110\}\langle 110\rangle$ .

## 2. Результаты исследований и обсуждение

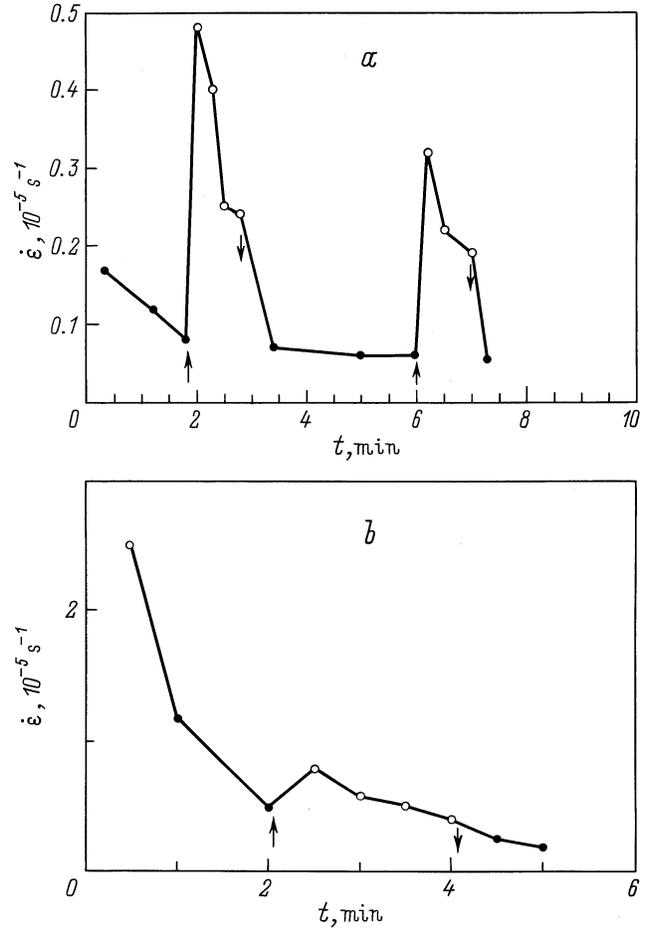
На рис. 1 представлена интерферограмма, на которой частота колебаний отражает изменение скорости ползучести нагруженного образца  $\text{NaNO}_2$  в момент приложения (отмечено стрелкой  $\uparrow$ ) и удаления ( $\downarrow$ ) магнитного поля. Эта интерферограмма наглядно демонстрирует наличие в кристаллах  $\text{NaNO}_2$  повторяющегося МПЭ, который заключается в резком увеличении скорости ползучести в магнитном поле и уменьшении  $\dot{\epsilon}$  при удалении поля.

Примеры количественных зависимостей  $\dot{\epsilon}$  от времени  $t$ , включая моменты приложения и удаления ПМП, для кристаллов  $\text{NaNO}_2$  и LiF приведены на рис. 2. На этом рисунке четко проявляется упомянутый выше МПЭ, причем реакция кристаллов  $\text{NaNO}_2$  на магнитное поле выражена гораздо сильнее, чем в случае LiF. Аналогичный эффект увеличения скорости ползучести наблюдался и после экспозиции в магнитном поле ненагруженных образцов.

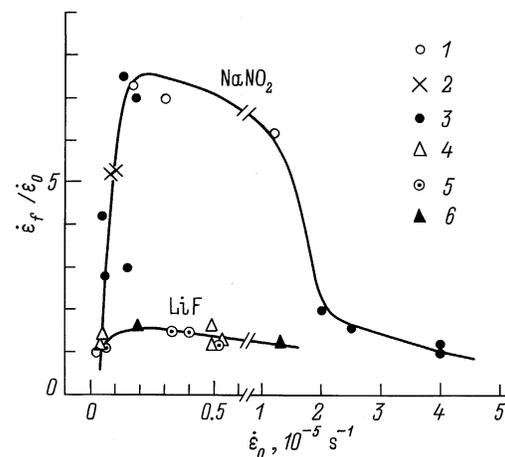
Количественно МПЭ в случае ползучести можно характеризовать отношением скоростей ползучести в поле и без поля, т.е. величиной  $\dot{\epsilon}_f/\dot{\epsilon}_0$ . Поскольку скорость ползучести при  $\sigma = \text{const}$  со временем уменьшается, измерения отношения  $\dot{\epsilon}_f/\dot{\epsilon}_0$  были проведены для различных значений  $\dot{\epsilon}_0$ . На рис. 3 приведены зависимости величины  $\dot{\epsilon}_f/\dot{\epsilon}_0$  от скорости ползучести, при которой измерялся МПЭ в случаях нагруженного образца или образца после его экспозиции в ПМП в ненагруженном состоянии. Видно, что для кристаллов  $\text{NaNO}_2$  при малой скорости деформации ( $\dot{\epsilon}_0 < 5 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ) влияние магнитного поля практически не наблюдается. В то же время дальнейшее (даже небольшое) увеличение  $\dot{\epsilon}_0$



**Рис. 1.** Пример интерферограммы, отражающей изменение скорости ползучести по системе  $(001)[100]$  нагруженного образца  $\text{NaNO}_2$  при приложении ( $\uparrow$ ) и удалении ( $\downarrow$ ) магнитного поля;  $B = 0.2 \text{ T}$ ,  $\sigma = 8.6 \text{ MPa}$ .



**Рис. 2.** Примеры зависимостей скорости ползучести от времени, включая моменты приложения ( $\uparrow$ ) и удаления ( $\downarrow$ ) магнитного поля.  $a$  —  $\text{NaNO}_2$  (система скольжения  $\{110\}\langle 111\rangle$ ),  $\sigma = 8.5 \text{ MPa}$ ,  $b$  — LiF,  $\sigma = 7 \text{ MPa}$ .



**Рис. 3.** Зависимости отношения  $\dot{\epsilon}_f/\dot{\epsilon}_0$  от скорости ползучести, при которой измерялся МПЭ в кристаллах  $\text{NaNO}_2$  (1–3) и LiF (4–6). Данные получены при приложении (1, 2, 4) или удалении (5) ПМП ( $B = 0.2 \text{ T}$ ), а также после экспозиции в течение 10 min в поле (3, 6). Системы скольжения в кристаллах  $\text{NaNO}_2$ : 1, 3 —  $\{110\}\langle 111\rangle$ , 2 —  $(001)[100]$ .

приводит к появлению и резкому росту МПЭ до значений  $\dot{\epsilon}_f/\dot{\epsilon}_0 \approx 7$ . Примерно этот же уровень МПЭ сохраняется до  $\dot{\epsilon}_0 \approx 1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , после чего эффект быстро уменьшается и при  $\dot{\epsilon}_0 \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  практически пропадает. Для кристаллов LiF зависимость  $\dot{\epsilon}_f/\dot{\epsilon}_0$  имеет подобный характер, однако максимальная величина этого отношения не превышает 1.6.

Интересно, что в ранее проводившихся экспериментах на кристаллах NaCl и LiF при их испытаниях с постоянными скоростями деформации [6] или нагружения [19] максимальные значения  $\dot{\epsilon}_f/\dot{\epsilon}_0$  в слабых магнитных полях также не превышали 2 даже для образцов с большим содержанием двухвалентной примеси, которая усиливает МПЭ [19]. При этом на кристаллах LiF в случае  $B = 0.2 \text{ Т}$  МПЭ наблюдался только для  $\dot{\epsilon}_0 < 2 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  [6].

Таким образом, полученные в настоящей работе экспериментальные результаты свидетельствуют о наличии в сегнетоэлектрических кристаллах МПЭ. В данном случае на кристаллах  $\text{NaNO}_2$  МПЭ проявляется в значительном увеличении скорости пластической деформации нагруженного образца при включении магнитного поля или после экспозиции образца в поле. При этом МПЭ наблюдается только в интервале скоростей деформации  $\dot{\epsilon} \approx (0.1-3) \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Качественно полученные результаты могут быть объяснены в рамках модели, учитывающей наличие в кристаллах процессов термоактивационного и магнитостимулированного открепления дислокаций от различного вида стопоров, в первую очередь от примесных центров [6,19]. При этом, естественно, необходимо учитывать особенности строения самих дислокаций и стопоров для каждого конкретного кристалла. В частности, в сегнетоэлектриках может иметь большое значение образование на дислокациях поляризационного электрического заряда [23], для оценки роли которого в МПЭ необходимо проведение дополнительных исследований.

## Список литературы

- [1] Н.В. Загоруйко. Кристаллография **10**, 81 (1965).
- [2] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 467 (1987).
- [3] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, O.L. Kazakova, E.Yu. Michina, E.A. Petrzhhik. Mater. Sci. Eng. **A234-236**, 617 (1997).
- [4] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. ЖЭТФ **115**, 605 (1999).
- [5] А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, Н.Н. Беккауер, А.Е. Смирнов. ФТТ **42**, 267 (2000).
- [6] В.И. Альшиц, А.А. Урусовская, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауер. ФТТ **42**, 270 (2000).
- [7] Yu.I. Golovin, R.B. Morgunov, D.V. Lopatin, A.A. Baskakov. Phys. Stat. Sol (a) **160**, R3 (1997).
- [8] Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Е.П. Белозерова. ФТТ **41**, 1035 (1999).
- [9] Н.Н. Песчанская, В.Ю. Суrowова, П.Н. Якушев. ФТТ **34**, 2111 (1992).
- [10] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев. ФТТ **39**, 1690 (1997).
- [11] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, С.Ю. Ликсутин. Высокомолекуляр. соединения **Б40**, 373 (1998).
- [12] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, А.А. Баскаков, М.В. Бадыевич, С.З. Шмурак. Письма в ЖЭТФ **69**, 114 (1999).
- [13] Е.В. Даринская, Е.А. Петржик, С.А. Ерофеева, В.П. Кисель. Письма в ЖЭТФ **70**, 298 (1999).
- [14] Ю.А. Осипьян, Ю.И. Головин, Д.В. Лопатин, Р.Б. Моргунов, Р.К. Николаев, С.З. Шмурак. Письма в ЖЭТФ **69**, 110 (1999).
- [15] Ю.А. Осипьян, Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, Р.К. Николаев, И.А. Пушкин, С.З. Шмурак. ФТТ **43**, 1333 (2001).
- [16] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, И.В. Гектина, Ф.Ф. Лаврентьев. Кристаллография **35**, 1014 (1990).
- [17] В.И. Альшиц, Р. Воска, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик. ФТТ **35**, 70 (1993).
- [18] О.И. Дацко, В.И. Алексеев, А.Д. Шахова. ФТТ **39**, 1234 (1997).
- [19] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. Материаловедение **3-6**, 2 (2000).
- [20] В.И. Николаев, Б.И. Смирнов. ФТТ **27**, 3369 (1985).
- [21] В.И. Николаев, Б.И. Смирнов, В.А. Иванцов. ФТТ **27**, 2519 (1985).
- [22] Н.Н. Песчанская, Г.С. Пугачев, П.Г. Якушев. Механика полимеров **2**, 490 (1977).
- [23] В.И. Николаев, Н.А. Перцев, Б.И. Смирнов. ФТТ **33**, 93 (1991).