

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОДВИЖНОСТЬ ДИСЛОКАЦИЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© В.И.Альшиц, Е.В.Даринская, Е.Ю.Михина, Е.А.Петржик

Институт кристаллографии Российской академии наук,  
117333 Москва, Россия  
(Поступила в Редакцию 13 декабря 1995 г.  
В окончательной редакции 13 марта 1996 г.)

Исследовано влияние слабых электрических полей (0.25–5 kV/m) на магнитоупругий эффект в кристаллах NaCl и LiF при двух температурах (300 и 77 К). Показано, что электрическое поле действует только на краевые (заряженные) дислокации, не сказываясь на подвижности винтовых дислокаций. Электрическое поле, параллельное дислокациям или перпендикулярное их плоскости скольжения, не влияет на подвижность также и краевых дислокаций. Обнаружено, что критическая частота вращения образцов в магнитном поле, являющаяся мерой обратного времени открепления дислокаций от парамагнитных центров в магнитном поле, не чувствительна к электрическому воздействию. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о силовой природе электрического воздействия на дислокации и отсутствии влияния электрического поля на элементарный акт открепления дислокации от парамагнитных центров. Понижение порога чувствительности дислокационной подвижности к электрическому воздействию в магнитном поле примерно на два порядка объясняется относительно малой концентрацией в исследованных кристаллах немагниточувствительных стопоров, преодолеваемых с помощью внешней силы.

Как было показано в работах [1–8], в ряде немагнитных кристаллов (NaCl, LiF, CsI, Zn, Al) наблюдается магнитоупругий эффект — открепление дислокаций от парамагнитных примесей во внешнем магнитном поле в результате спин-зависимых переходов в системе дислокация–примесный центр с последующей релаксацией дислокационной структуры. При этом пробеги дислокаций могут достигать макроскопических значений в десятки и даже сотни микрон. В чистых кристаллах с низким пределом текучести внутренние дальнедействующие напряжения оказываются достаточной движущей силой, и перемещение дислокаций в магнитном поле происходит в отсутствие механического нагружения [1–8]. В жестких примесных кристаллах для выявления магнитоупругого эффекта наряду с магнитным полем приходится использовать внешнюю нагрузку [9–12]. В работах [13,14] было обнаружено сильное влияние слабых электрических полей на подвижность дислокаций в магнитном поле. Существенно, что в отсутствие магнитного поля даже наибольшее из прилагавшихся электрических полей не вызывало перемещения дислокаций. Настоящая работа посвящена выяснению физической природы влияния электрического поля на магнитоупругий эффект.

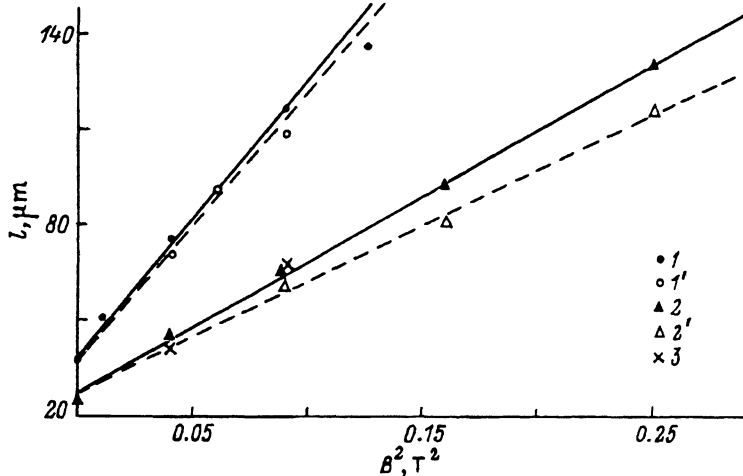


Рис. 1. Зависимость средней длины пробега  $l$  дислокаций в кристаллах NaCl-1 от магнитной индукции  $B$  при одновременном воздействии на кристалл электрического поля  $E$  в течение  $t = 5$  min при разных температурах  $T$  и разных ориентациях  $E$  по отношению к линии дислокации  $L$ .

$E$  (kV/m): 1, 1', 3 — 1, 2, 2' — 0.  $T$  (K): 1-3 — 293, 1', 2' — 77. 1, 1', 2, 2' —  $E \perp L$ , 3 —  $E \parallel L$ .

Исследовались кристаллы NaCl-1 (предел текучести  $\tau = 400$  kPa, общая концентрация примесей  $C < 10$  ppm), NaCl-2 ( $\tau = 500$  kPa,  $C = 10$  ppm) и LiF ( $\tau = 300$  kPa,  $C < 50$  ppm). Измерения проводились при двух температурах:  $T = 77$  и 293 K. Использовались слабые постоянные электрическое ( $E = 0.25-5$  kV/m) и магнитное ( $B = 0.05-0.5$  T) поля. Изучалась подвижность свежесозданных дислокаций. Пробеги фиксировались методом избирательного травления. Электрические контакты наносились с помощью специальной пасты.

Как видно из рис. 1, приложение электрического поля к образцу NaCl с парамагнитными примесями, находящемуся в магнитном поле, значительно увеличивает средний статистический пробег краевых дислокаций, при этом сохраняется линейная зависимость пробега дислокаций от квадрата магнитной индукции. Если при  $E = 0$  наблюдалась слабая температурная зависимость (точки 2 и 2' на рис. 1), то при совместном действии магнитного и электрического полей пробег дислокаций не меняется при понижении температуры от комнатной до 77 K (точки 1 и 1' на рис. 1). Инверсия знака электрического поля приводит к изменению направления движения большинства краевых дислокаций в NaCl, что согласуется с линейной зависимостью пробега от величины электрического поля (рис. 2). Оказалось, что взаимная ориентация электрического поля, дислокации и ее вектора Бюргера значительно влияет на подвижность дислокаций в магнитном поле. Электрическое поле, направленное вдоль линии дислокации (точки 3 на рис. 1) или перпендикулярно ее плоскости скольжения (точки 3 на рис. 2), не меняет среднего пробега дислокаций в магнитном поле. Если вектор напряженности электрического поля имеет составляющую в плоскости скольжения (точки 2 на рис. 2), то средний пробег дислокаций значительно увеличивается. При этом максимальная подвижность дислокаций при совместном действии полей наблюдается, когда вектор

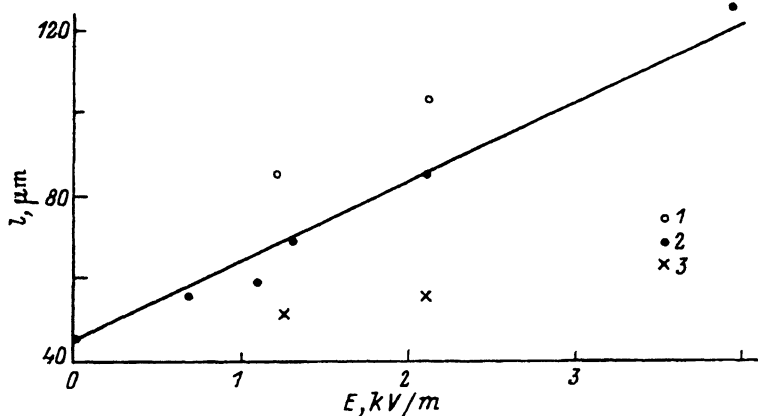


Рис. 2. Зависимость средней длины пробега  $l$  дислокаций в кристаллах NaCl-2 от напряженности электрического поля  $E$  при  $B = 0.2$  Т,  $t = 5$  мин и различных углах  $\varphi$  между вектором  $E$  и плоскостью скольжения.

$\varphi$  (°): 1 — 0, 2 — 45, 3 — 90.

напряженности электрического поля лежит в плоскости скольжения перпендикулярно линии дислокации (точки 1 на рис. 2). В кристаллах NaCl с диамагнитной примесью свинца, в которых не наблюдается магнитопластического эффекта, при совместном действии полей также не обнаружено движения дислокаций.

В принципе, обсуждая природу электрического влияния на магнитопластический эффект, естественно выбирать между двумя физическими механизмами: прямое влияние на элементарный акт открепления дислокации от парамагнитного центра или дополнительное к внутренним напряжениям силовое воздействие на дислокацию. Конечно, возможна и комбинация обоих механизмов. К счастью, в наших руках имеются возможности прямой экспериментальной проверки указанных гипотез.

Силовое воздействие электрического поля на дислокацию возможно, только если она заряжена. Это действительно имеет место для краевых дислокаций в щелочно-галогидных кристаллах. Обратный эффект Степанова [15–17], проявляющийся в перемещении краевых дислокаций во внешних электрических полях (в чистых кристаллах обычно порядка  $10^2$  kV/m), принято связывать именно с этим обстоятельством. В то же время винтовые дислокации в тех же кристаллах макроскопическим зарядом не обладают.

Для проверки силовой гипотезы изучалось движение краевых и винтовых дислокаций в кристаллах LiF при одновременном действии полей. Оказалось, что электрическое поле увеличивает пробег только краевых дислокаций и не изменяет пробега винтовых (рис. 3). Существенно, что при этом величина электрического поля на два порядка меньше, чем при обычном движении заряженных дислокаций в эффекте Степанова. Таким образом, наличие силового воздействия электрического поля на краевые дислокации сомнений не вызывает. Остается выяснить, нет ли параллельного влияния на элементарный акт открепления.

В работах [5–8] было показано, что существует критическая частота переменного магнитного поля, созданного вращением образца в посто-

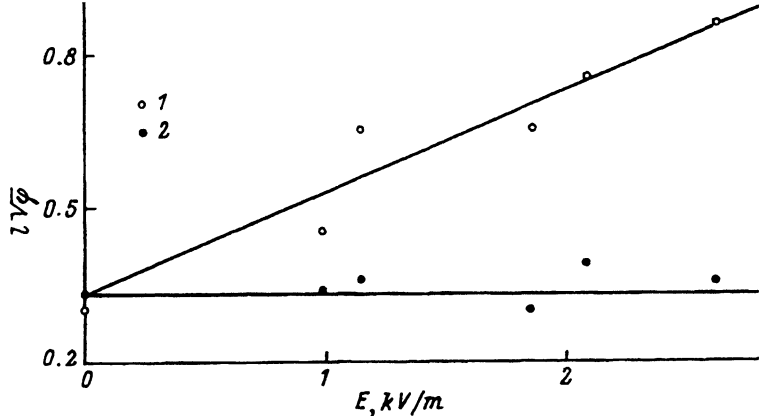


Рис. 3. Зависимость нормированного среднего пробега  $l\sqrt{\rho}$  дислокаций (где  $\rho$  — плотность дислокаций) в кристаллах LiF от напряженности электрического поля  $E$  при  $B = 0.6$  Т и  $t = 0.5$  мм для краевых (1) и винтовых (2) дислокаций.

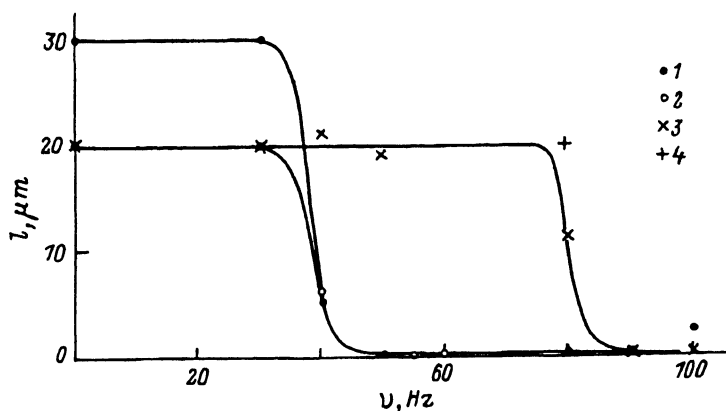


Рис. 4. Зависимость средней длины пробега  $l$  дислокаций в кристаллах LiF от частоты  $\nu$  вращения образца в постоянном магнитном поле  $B = 0.5$  Т в течение времени  $t = 5$  мин для краевых (1, 2) и винтовых (3, 4) дислокаций при одновременном приложении постоянного электрического поля  $E$ .  $E$  (кВ/м): 1, 3 — 2, 2, 4 — 0.

янном магнитном поле, выше которой пробег дислокаций в магнитном поле резко уменьшается. Эта частота, пропорциональная вероятности отрыва дислокаций от парамагнитного центра [6], фактически является мерой обратного времени задержки дислокации на каждом парамагнитном стопоре. На рис. 4 представлены результаты эксперимента по изучению подвижности дислокаций в кристаллах LiF в переменном магнитном поле с одновременной выдержкой в постоянном электрическом. Видно, что электрическое поле увеличивает пробег краевых дислокаций (плато на кривой 1), но не меняет величины пробега винтовых (плато на кривой 3). Критические частоты для краевых и винтовых дислокаций различны, но остаются неизменными под действием электрического поля. Следовательно, электрическое поле не влияет на вероятность отрыва дислокаций от стопора, т. е. не влияет на процесс открепления дислокаций от парамагнитных примесных центров.

В заключение обсудим причину отмеченного выше резкого увеличения (примерно на два порядка) чувствительности дислокационной подвижности к электрическому полю при одновременном действии магнитного поля. В наших кристаллах наряду с парамагнитными центрами, в основном определяющими уровень предела текучести, естественно, присутствуют и другие стопоры, нечувствительные к магнитному полю (дислокации «леса», другие примесные комплексы). Количество первых и вторых в наших чистых кристаллах резко различается. При включенном магнитном поле парамагнитные центры «не держат» дислокации, и даже внутренних напряжений ( $\sim 1 \text{ g/mm}^2$ ) оказывается достаточно для силового преодоления остальных дефектов. Таким образом, при включенном магнитном поле для заметного увеличения подвижности дислокаций требуется уровень электрического воздействия, сопоставимый с движущей силой внутренних напряжений. А при выключенном магнитном поле масштаб требуемой электрической силы задается напряжениями порядка предела текучести, которые в нашем случае как раз на два порядка выше, чем внутренние.

При отсутствии электрического поля направления наблюдаемых дислокационных пробогов в магнитном поле являются хаотически распределенными по кристаллу, что является естественным отражением хаотичности распределения внутренних напряжений. В электрическом поле движение дислокаций, как мы видели, приобретает направленный характер и меняется на противоположное при инверсии напряженности электрического поля.

Авторы выражают признательность В.М. Чернову и В.П. Киселю за методическую помощь в работе, Л.М. Соيفеру за предоставление кристаллов LiF, а также Международному научному фонду (грант M19300) и Российскому фонду фундаментальных исследований (грант № 95-02-03920а) за частичное финансирование настоящей работы.

#### Список литературы

- [1] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 2, 467 (1987).
- [2] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, И.В. Гектина, Ф.Ф. Лаврентьев. Кристаллография **35**, 4, 1014 (1990).
- [3] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик. ФТТ **33**, 10, 3001 (1991).
- [4] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик. ФТТ **35**, 2, 320 (1993).
- [5] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик. ФТТ **34**, 1, 155 (1992).
- [6] В.И. Альшиц, Р. Воска, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик. ФТТ **35**, 1, 70 (1993).
- [7] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик. Изв. РАН. Сер. Физ. **57**, 11, 2 (1993).
- [8] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, E.A. Petrzhik. Mat. Sci. Eng. **A164**, 322 (1993).
- [9] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. ФТТ **35**, 5, 1384 (1993).
- [10] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. Письма в ЖЭТФ **61**, 7, 583 (1995).
- [11] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. ФТТ **37**, 5, 1352 (1995).
- [12] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. ФТТ **37**, 7, 2118 (1995).
- [13] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик. ФТТ **35**, 5, 1397 (1993).
- [14] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, O.L. Kazakova, E.Yu. Mikhina, E.A. Petrzhik. J. Alloys Comp. **211/212**, 548 (1994).
- [15] A.V. Stepanov. Z. Phys. **81**, 7-8, 560 (1933).
- [16] R.L. Sproull. Phil. Mag. **5**, 56, 815 (1960).
- [17] Е.Г. Швидковский, Н.А. Тяпунина, Э.П. Белозерова. Кристаллография **7**, 3, 471 (1962).