

## О влиянии концентрации точечных дефектов в кристаллах NaCl и LiF на поле насыщения магнитоэластического эффекта

© Е.В. Даринская, Е. Хартманн\*

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Российской академии наук,  
117333 Москва, Россия

\* Исследовательский институт физики твердого тела и оптики Венгерской академии наук,  
H-1121 Будапешт XII, Венгрия

E-mail: darin@ns.crys.ras.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 14 апреля 2003 г.)

Исследовано влияние концентрации примеси кальция в кристаллах NaCl и предварительного рентгеновского облучения кристаллов NaCl и LiF на величину магнитного поля насыщения  $B_0$ , характеризующего переход от обычной пропорциональности среднего пробега дислокаций  $l$  квадрату магнитной индукции  $B$  ( $l \propto B^2$ ) к насыщению ( $l = \text{const}$ ). Показано, что с увеличением концентрации примеси кальция в кристаллах NaCl и дозы рентгеновского облучения NaCl и LiF величина  $B_0$  растет. Данный факт соответствует тому, что открепление дислокаций от локальных дефектов в слабых магнитных полях лимитируется механизмом продольной релаксации спинов в системе радикальных пар, образующихся при взаимодействии дислокационных ядер с парамагнитными центрами.

Работа частично финансировалась грантом Российской академии наук (6-й конкурс научных проектов молодых ученых РАН), Hungarian Scientific Research Foundation (ОТКА T23092 and T035044) и Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 03-02-17021).

Магнитоэластический эффект (МПЭ), обнаруженный на кристаллах NaCl [1] как перемещение дислокаций в постоянном магнитном поле в отсутствие механической нагрузки, на протяжении последнего десятилетия подробно изучался на ряде щелочно-галогидных кристаллов, немагнитных металлов и полупроводников [2–6]. Кроме того, исследовалось влияние магнитного поля на макроскопические характеристики (предел текучести, микротвердость, внутреннее трение и скорость ползучести) немагнитных кристаллов [7–12]. Совокупность полученных экспериментальных данных показывает, что внешнее магнитное поле создает условия для открепления дислокаций от локальных дефектов, либо вызывая изменение спинового состояния системы дислокация–парамагнитный центр [3,13,14], либо модифицируя структуру точечных дефектов кристалла [4,15,16]. Первый эффект является более универсальным и наблюдается как в отожженных, так и в закаленных кристаллах. Что же касается прямого воздействия магнитного поля на перестройку примесных центров, то этот эффект требует начальной неравновесности в их структуре и наблюдается только на закаленных кристаллах. Далее будем обсуждать только эффекты первого типа, когда магнитное поле напрямую воздействует на систему дислокация–примесь, снимая спиновый запрет на определенный электронный переход в этой системе. В результате происходит уменьшение или разрушение барьера для движения дислокации. При этом полная энергия системы дислокация–парамагнитный центр практически не меняется, поскольку рассматриваемые спин-зависимые переходы в магнитном поле не связаны с подводом энергии к системе. Аналогичный принцип спиновой селективности лежит в основе целого круга

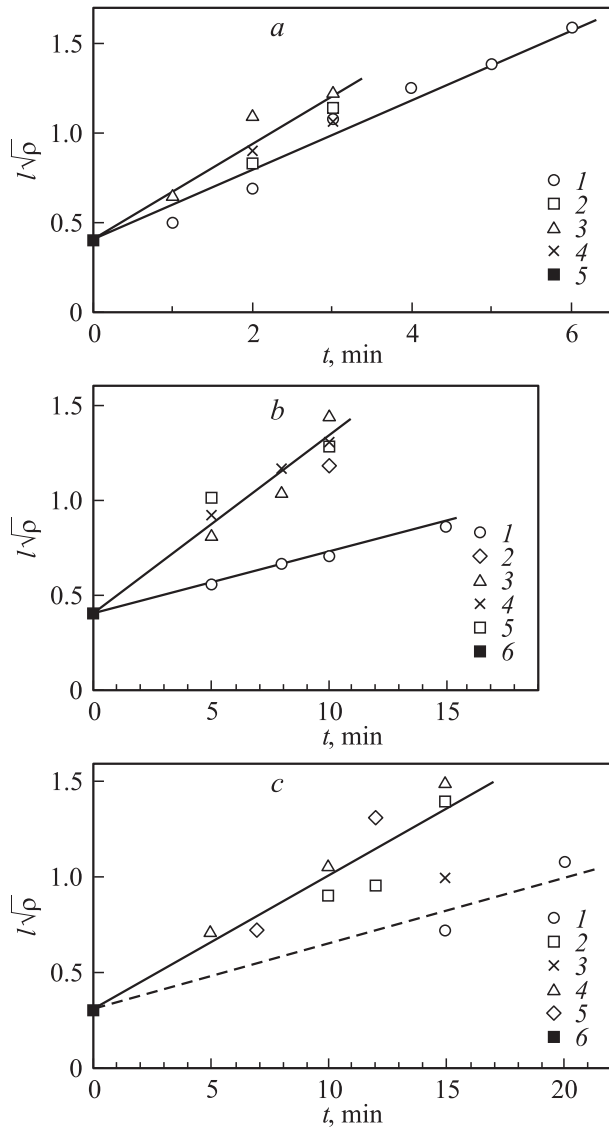
явлений, связанных с влиянием слабых магнитных полей на протекание разнообразных химических и физических процессов [17,18].

В работе [13] при исследовании МПЭ в кристаллах LiF для относительно высоких магнитных полей был обнаружен переход от обычной пропорциональности среднего пробега дислокаций квадрату магнитной индукции ( $l \propto B^2$ ) к насыщению ( $l = \text{const}$ ). Оказалось, что экспериментальные точки [13] на кривой  $l(B)$  хорошо описываются зависимостью, типичной для известного механизма продольной релаксации спинов в системе радикальных пар [19]

$$l(B) \propto [(B_0/B)^2 + 1]^{-1}, \quad (1)$$

где  $B_0$  — поле насыщения,  $B_0 = \hbar/\mu_B \tau_d$  ( $\mu_B$  — магнетон Бора), определяемое характерной частотой собственных колебаний дислокационных сегментов  $\tau_d^{-1}$  [1]. Последний параметр ( $\tau_d^{-1}$ ) зависит от средней длины ( $l_d$ ) дислокационных сегментов,  $\tau_d^{-1} \sim c/l_d$  ( $c$  — скорость звука), и может зависеть от концентрации примеси. Поскольку увеличение концентрации примеси приводит к понижению средней длины дислокационного сегмента, а следовательно, и характерного времени  $\tau_d$ , в [13] было сделано предсказание об увеличении  $B_0$  с ростом концентрации примеси в кристалле, если механизм продольной релаксации спинов действительно является определяющим при откреплении дислокации от локального препятствия в магнитном поле.

Настоящая работа посвящена изучению влияния концентрации примеси кальция на величину магнитного поля насыщения  $B_0$  в кристаллах NaCl. В связи с тем, что рентгеновское облучение создает дополнительные магниточувствительные дефекты, изменяющие кинетику

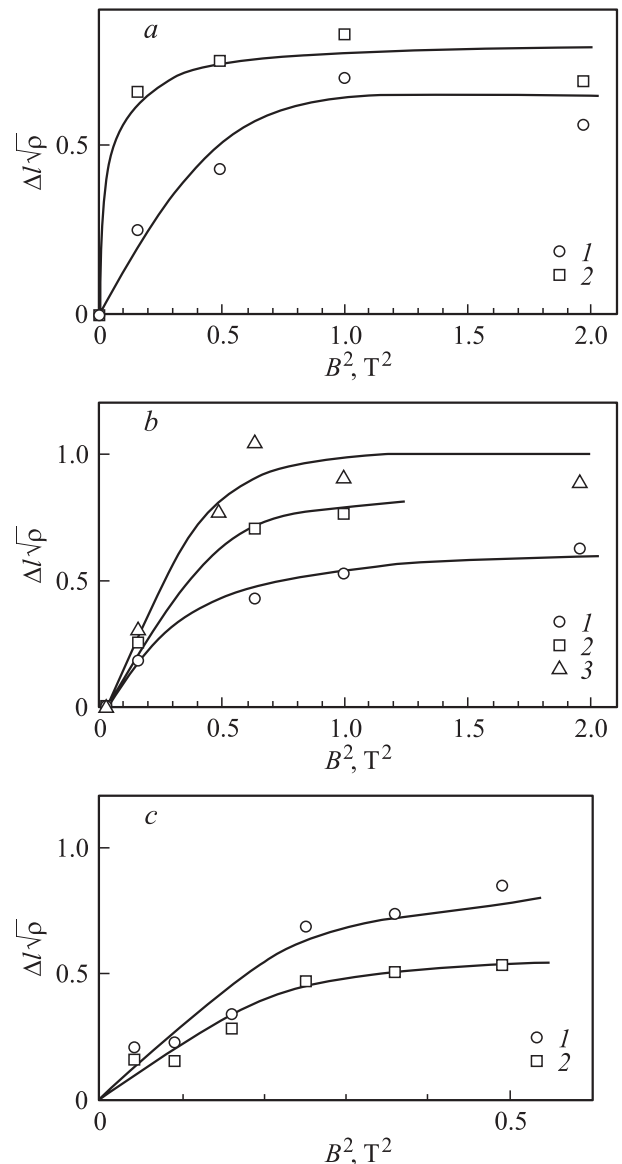


**Рис. 1.** Зависимость нормированного среднего пробега дислокаций  $l\sqrt{\rho}$  от времени выдержки образцов  $t$  в магнитном поле для разных значений индукции  $B$ . а) NaCl–I,  $B$ , Т: 1 — 0.5 [14], 2 — 0.7, 3 — 1, 4 — 1.4, 5 —  $l_0$ . б) NaCl–II,  $B$ , Т: 1 — 0.5, 2 — 0.7, 3 — 0.8, 4 — 1, 5 — 1.4, 6 —  $l_0$ . в) предварительно облученный LiF,  $B$ , Т: 1 — 0.6, 2 — 0.8, 3 — 0.7, 4 — 1, 5 — 1.2, 6 —  $l_0$ .

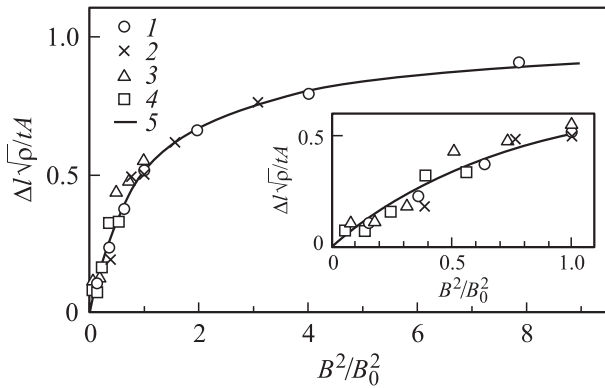
МПЭ [20], было также исследовано влияние предварительного рентгеновского облучения кристаллов NaCl и LiF на величину  $B_0$ .

Эксперименты проводились на кристаллах NaCl с двумя концентрациями примеси кальция: NaCl–I ( $C = 2 \cdot 10^{-5}$  wt.%) и NaCl–II ( $C = 10^{-2}$  wt.%) и соответствующими пределами текучести  $\tau_{y1} = 150$  и  $\tau_{y2} = 600$  кПа; концентрация других примесей меньше  $5 \cdot 10^{-5}$  wt.% [21]. В предварительно отожженные образцы с плотностью дислокаций  $\rho \sim 10^4$  см $^{-2}$  ударом вводились свежие дислокации  $\rho_d \sim \rho$ . Их начальные положения фиксировались методом избирательного

травления кристалла. Затем образец помещался в постоянное магнитное поле  $B = (0.5-1.4)$  Т на время  $t = (1-15)$  min при комнатной температуре без какой-либо механической нагрузки. После магнитостимулированного открепления от локальных дефектов дислокации двигались под действием дальнодействующих внутренних полей напряжения, создаваемых другими дислокациями. Положение дислокаций после „магнитной обработки“ определялось с помощью повторного избирательного травления. В настоящей работе изучалась подвижность только краевых дислокаций, обеспечивающих более полные гистограммы пробегов. Исследовались также предварительно облученные рент-



**Рис. 2.** Насыщение дислокационных пробегов при повышенных магнитных полях для разных времен магнитной обработки  $t$  (а, б) и предварительного облучения  $t_{ir}$  (в) кристаллов NaCl. а) NaCl–I ( $t_{ir} = 0$ ),  $t$ , min: 1 — 2, 2 — 3. б) NaCl–II,  $t$ , min: 1 — 5, 2 — 8, 3 — 10. в) NaCl–I ( $t = 5$  min),  $t_{ir}$ , s: 1 — 5, 2 — 10.



**Рис. 3.** Экспериментальные точки рис. 2 (перестроенные в координатах  $\Delta l\sqrt{\rho}/At - (B/B_0)^2$ ) в сравнении с теоретической зависимостью  $[(B_0/B)^2 + 1]^{-1}$  (сплошная кривая 5): 1 — NaCl—I,  $B_0 = 0.5$  Т,  $A = 0.35$ ; 2 — NaCl—II,  $B_0 = 0.8$  Т,  $A = 0.16$ ; 3 — NaCl—I,  $t_{ir} = 5$  с,  $B_0 = 0.7$  Т,  $A = 0.3$ ; 4 — NaCl—I,  $t_{ir} = 10$  с,  $B_0 = 0.8$  Т,  $A = 0.28$ .

геном в течение 5 с кристаллы LiF (общая концентрация примеси менее  $10^{-4}$  wt.%) из той же серии, что и необлученные образцы в работе [13]. Для анализа влияния предварительного рентгеновского облучения кристаллов NaCl—I на величину магнитного поля насыщения  $B_0$  использовались данные, полученные в работе [20].

На рис. 1 представлены зависимости среднего пробега краевых дислокаций  $l$ , нормированного на среднее расстояние между дислокациями  $1/\sqrt{\rho}$  [3,22], от времени „магнитной обработки“ образцов  $t$  для разных полей  $B$  для кристаллов NaCl (рис. 1, *a, b*) и предварительно облученных кристаллов LiF (рис. 1, *c*). Фоновый пробег  $l_0$  при  $t = 0$  определяется вытравливанием приповерхностных стопоров и от условий эксперимента не зависит. Видно, что при достаточно высоких полях наклон линейной зависимости  $l(t)$  не меняется. Наиболее ярко насыщение среднего пробега по магнитному полю проявляется в координатах  $\Delta l(B^2)$  (рис. 2, *a, b*) ( $\Delta l = l - l_0$ ). Аналогичные зависимости были получены для кристаллов NaCl—I (рис. 2, *c*), предварительно облученных рентгеном в течение 5 и 10 с, и облученных образцов LiF. Как и в работе [13], наблюдается уменьшение уровня насыщения с понижением времени „магнитной обработки“ (рис. 2, *a, b*). Таким образом, оказывается, что уровень насыщения не связан с геометрическим пределом ( $1/\sqrt{\rho} \approx 1.4$ ), характерным для процесса релаксации дислокаций в ЩГК в поле внутренних напряжений. Кроме того, на рис. 2, *c* видно, что увеличение времени предварительного облучения уменьшает уровень насыщения средних пробегов. Полученные зависимости аналогичны экспериментальным кривым, приведенным в [1]. На рис. 3 видно, что экспериментальные точки, представляющие собой перестроенные данные с рис. 2 в координатах  $\Delta l\rho/At - B^2/B_0^2$  для четырех значений параметра  $A$ , определяемых по наклону линейных зависимостей насыщения рис. 1, хорошо опи-

сываются функцией  $[(B_0/B)^2 + 1]^{-1}$  (см. формулу (1)) при  $B_0$  в интервале (0.5–0.8) Т (сплошная кривая). Оказалось, что рост примеси кальция в кристаллах NaCl с  $C = 2 \cdot 10^{-5}$  до  $10^{-2}$  wt.% приводит к увеличению значения  $B_0$  более чем в 1.5 раза ( $B_0 = 0.5$  Т для NaCl—I,  $B_0 = 0.8$  Т для NaCl—II). Предварительное рентгеновское облучение кристаллов NaCl—I в течение 5 с увеличивает  $B_0$  от 0.5 до 0.7 Т, а в течение 10 с — до 0.8 Т. Такая же тенденция наблюдается при исследовании предварительно облученных образцов LiF.

Таким образом, сделанное в работе [13] предсказание об увеличении значения магнитного поля насыщения  $B_0$  с ростом концентрации примеси в кристалле подтвердилось, что является дополнительным свидетельством в пользу гипотезы об определяющей роли механизма продольной релаксации спинов в процессе открепления дислокации от локального дефекта в магнитном поле.

Авторы благодарят В.И. Альшица за детальное обсуждение полученных результатов и В.П. Киселя за помощь при подготовке образцов.

Работа выполнена на кристаллах NaCl (Ca), предоставленных Исследовательским институтом физики твердого тела и оптики Венгерской АН.

## 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] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, O.L. Kazakova, E.Yu. Mikhina, E.A. Petrzniak. Materials Science and Engineering **A234–236**, 617 (1997).
- [4] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. ЖЭТФ **115**, 2, 605 (1999).
- [5] Е.В. Даринская, Е.А. Перджик, С.А. Ерофеева, В.П. Кисель. Письма в ЖЭТФ **70**, 4, 298 (1999).
- [6] А.М. Орлов, А.А. Скворцов, А.А. Соловьев. ЖЭТФ **121**, 3 (2003).
- [7] В.И. Альшиц, Н.Н. Беккауер, А.С. Смирнов, А.А. Урусовская. ЖЭТФ **115**, 951 (1999).
- [8] В.И. Альшиц, А.А. Урусовская, А.С. Смирнов, Н.Н. Беккауер. ФТТ **42**, 2, 270 (2000).
- [9] Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Э.П. Белозерова. Изв. РАН. Сер. физ. **64**, 9, 1776 (2000).
- [10] О.И. Дацко. ФТТ **44**, 2, 289 (2002).
- [11] Ю.А. Осипьян, Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, Р.К. Николаев, И.А. Пушкин, С.З. Шмурак. ФТТ **43**, 7, 1333 (2001).
- [12] Б.И. Смирнов, Н.Н. Песчанская, В.И. Николаев. ФТТ **43**, 12, 31 (2001).
- [13] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская. Письма в ЖЭТФ **70**, 11, 749 (1999).
- [14] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик. Письма в ЖЭТФ **63**, 8, 628 (1996).

- [15] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргун, В.Е. Иванов, С.Е. Жуликов, А.А. Дмитриевский. Письма в ЖЭТФ **68**, 5, 400 (1998).
- [16] Р.Б. Моргун, А.А. Баскаков. ФТТ **43**, 9, 1632 (2001); **45**, 1, 91 (2003).
- [17] Я.Б. Зельдович, А.Л. Бучаченко, Е.Л. Франкевич. УФН **155**, 1, 3 (1988).
- [18] А.Л. Бучаченко, Р.З. Сагдеев, К.М. Салихов. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. Наука, Новосибирск (1978). 296 с.
- [19] V. Brocklehurst. Nature **221**, 921 (1969).
- [20] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова. ЖЭТФ **111**, 2, 615 (1997).
- [21] А.А. Urusovskaya, E.V. Darinskaya, R. Voszka, J. Jansky. Cryst. Res. Tech. **16**, 5, 597 (1981).
- [22] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева. ФТТ **43**, 9, 1631 (2001).