

ВЛИЯНИЕ СЛАБОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СОСТОЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ И ПЛАСТИЧНОСТЬ ИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Ю. И. Головин*, Р. Б. Моргунов

Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина
392622, Тамбов, Россия

Поступила в редакцию 23 января 1998 г.

Цель работы заключалась в исследовании влияния слабого в энергетическом масштабе магнитного поля на состояние дислокаций и точечных дефектов в ионных кристаллах. Установлено, что комплексные точечные дефекты, находящиеся в метастабильном состоянии, чувствительны к магнитному полю с индукцией $B \sim 1$ Тл. Разделены вклады и установлена кинетика протекания реакций различных типов внутри структурных дефектов и между ними, приводящих к пластификации кристаллов в магнитном поле. Описан эффект влияния света на чувствительность точечных дефектов к магнитному полю и установлены его спектральные характеристики. Обнаружено резонансное влияние совместного действия слабого постоянного и высокочастотного магнитных полей на подвижность дислокаций при соотношении параметров этих полей, удовлетворяющем условиям электронного парамагнитного резонанса.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы надежно установлено, что магнитное поле с индукцией $B \sim 1$ Тл способно эффективно влиять на дислокационную пластичность ионных кристаллов. Под действием магнитного поля наблюдали смещение дислокаций в ненагруженных кристаллах [1], увеличение их пробега при нагружении [2], изменение микротвердости [3, 4], увеличение уровня дислокационного внутреннего трения [5], понижение предела текучести [6]. Все эти явления обычно называют магнитопластическими эффектами. Обнаружено, что эти эффекты чувствительны к типу основной примеси в кристалле [7, 8] и рентгеновскому облучению [9, 10]. Это позволило высказать гипотезу об электронной природе этих эффектов в ионных кристаллах [11, 12] и предложить возможный механизм действия магнитного поля на их пластичность [13–15].

Трудности в объяснении магнитопластического эффекта связаны с тем, что энергия, сообщаемая полем $B \sim 1$ Тл одному парамагнитному центру (который в ионных кристаллах можно отождествить с каким-либо примесным дефектом или электроном, локализованным на дислокации), составляет $\Delta U \approx \mu_B B \sim 10^{-4}$ эВ (где μ_B — магнетон Бора). При температурах $T \sim 300$ К, типичных для упомянутых экспериментов, $\Delta U \ll kT$. Поэтому в условиях, близких к термодинамическому равновесию, нельзя ожидать, что магнитное поле с $B \sim 1$ Тл может повлиять на пластические свойства неферромагнитных кристаллов.

Однако в настоящее время известен широкий класс электронных процессов, чувствительных к магнитному полю, в частности, магниточувствительные химические ре-

*E-mail: golovin@main.tsu.tambov.ru

акции с участием радикалов, на которые не могут быть распространены указанные выше термодинамические соображения в силу кратковременности промежуточных спин-зависимых стадий, за время протекания которых термические флуктуации «не успевают» нарушить корреляцию спинов в парах частиц [16–20]. Наличие парамагнитных свойств у ряда структурных дефектов в ионных кристаллах позволяет предполагать, что при пластическом деформировании также могут иметь место достаточно кратковременные радикальные реакции между дефектами, чувствительные к слабому магнитному полю.

Цель настоящей работы заключалась в установлении термодинамических причин влияния слабого магнитного поля на состояние структурных дефектов и пластичность ионных кристаллов, а также в определении типа магниточувствительных процессов и участвующих в них дефектов.

2. МЕТОДИКА

Для выявления различных аспектов влияния магнитного поля на состояние дефектов и пластичность номинально чистых кристаллов NaCl, LiF и KCl использовали набор взаимодополняющих методик. Изменение характеристик подвижности индивидуальных краевых дислокаций в результате действия магнитного поля (средняя скорость движения, величина и количество совершаемых ими скачков, длительность пауз между ними и др.) наблюдалось при помощи методов непрерывного или двойного химического травления путем измерения для каждой точки на графиках по 100–400 пробегов дислокаций и размеров ямок травления. При этом движение свежевведенных (от царапины) дислокаций инициировали двумя принципиально различающимися способами: одинаковым во всех опытах механическим импульсом сжатия (длительностью 0.2 с и амплитудой 0.5 МПа для NaCl) или экспозицией образцов в магнитном поле в отсутствие внешнего механического нагружения. Как будет видно из дальнейшего, при этом выявляются принципиально различающиеся характеристики подвижности дислокаций.

Экспонирование образца в магнитном поле до или после введения дислокаций, предварительно или совместно с приложением механической нагрузки, действие светом и другие вариации условий опыта позволяют разделить вклады различных факторов в магнитоэластический эффект (в частности, роль изменения состояний точечных дефектов и самих дислокаций в магнитном поле), а также выявить возможную многостадийность в процессах стимулированной полем модификации дефектов.

Влияние магнитного поля на макропластические характеристики кристаллов исследовали в специально сконструированной деформирующей машине с кварцевыми штоками и опорами, обеспечивающей режим «абсолютно мягкого» нагружения с линейно нарастающими во времени механическими напряжениями сжатия $\sigma = \alpha t$, где постоянная $\alpha = (1-10) \cdot 10^4$ Па/с была неизменна в пределах одного опыта. Такая техника в отличие от традиционной методики жесткого нагружения (в которой задается линейно зависящая от времени относительная деформация ϵ) позволяет устранить отрицательную обратную связь между машиной и образцом, при которой инициированное внешним воздействием разупрочнение приводит к уменьшению нагрузки на образце и приостановке пластического течения, способной «замаскировать» эффект разупрочнения. Кроме того, мягкая характеристика позволяет непосредственно убедиться в том, что в магнитном поле отсутствует втягивание штоков, нагрев образца и другие побочные

явления, способные исказить результаты измерений.

Постоянное магнитное поле с индукцией B до 2.2 Тл создавалось с помощью электромагнита. Импульсы магнитного поля имели форму полупериода синусоиды с амплитудой 7 Тл и длительностью 10^{-2} с и генерировались в маловитковом соленоиде тиристорным генератором.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В первой серии опытов исследовали смещение дислокаций в ненагруженных внешними силами кристаллах NaCl, инициированное импульсом магнитного поля $B = 7$ Тл. Для выяснения роли внутренних напряжений и возможного влияния на подвижность краевых дислокаций вихревого электрического поля, возникающего при включении и выключении магнитного поля, измеряли пробеги L^* и долю дислокаций d , смещающихся в четырех возможных кристаллографических направлениях $[110]$, $[\bar{1}10]$, $[1\bar{1}0]$, $[\bar{1}\bar{1}0]$. Установлено, что независимо от ориентации вектора \mathbf{B} по отношению к кристаллографическим осям (исследовано три ориентации \mathbf{B} : вдоль $[100]$, $[110]$ и $[001]$) d и L^* для четырех упомянутых групп дислокаций были одинаковы в пределах точности экспериментов и составляли $d = 0.25 \pm 0.03$ и $L^* = 26 \pm 1$ мкм. Качественно аналогичный результат получен и для смещений дислокаций, происходивших в этих кристаллах без действия магнитного поля, в результате двух последовательных химических травлений. В этом случае $d = 0.25 \pm 0.03$ и $L_0 = 9 \pm 1$ мкм (рис. 1б). Очевидно, в отсутствие магнитного поля дислокации могли смещаться только под действием случайных полей внутренних напряжений, которые должны взаимно компенсироваться в ненагруженном кристалле. Результаты, полученные в опытах с магнитным полем, свидетельствуют о том, что действие вихревого электрического поля при скорости изменения магнитного $\sim 10^3$ Тл/с пренебрежимо мало, а магнитное поле действительно не оказывает силового влияния на дислокации. Оно лишь способствует откреплению дислокаций от стопоров, а их движение происходит, как и в опытах без магнитного поля, под действием внутренних напряжений.

Для выявления кинетических особенностей стимулированного импульсом магнитного поля движения дислокаций использовался метод непрерывного травления. Для этого образец со свежевведенными дислокациями помещали в капсулу с «медленным» травителем, в котором дислокационная ямка размером 3 мкм образовывалась за 10 с травления. Находящийся в травителе кристалл подвергали действию импульса магнитного поля и через 50 с после этого извлекали из травителя. В контрольных опытах без магнитного поля кристалл выдерживали в травителе в течение такого же времени, как и в опытах с магнитным полем. Обнаружено, что в обоих случаях в течение всего времени выдержки образца в травителе дислокации совершают прерывистое движение с несколькими остановками. Однако в кристаллах, обработанных в магнитном поле, скорость движения дислокаций между остановками, количество скачков и общее время движения, измеренные по методике [21], были существенно больше, чем в контрольных опытах (рис. 2). Каждая дислокационная ямка, свидетельствующая об очередной остановке дислокации, образовывалась за время $\sim 5-10$ с, что значительно превышает длительность импульса магнитного поля (10^{-2} с). Следовательно, облегченное движение дислокаций происходило в течение длительного времени уже после отключения магнитного поля, и практически весь пробег осуществлялся при его отсутствии. Увеличенная

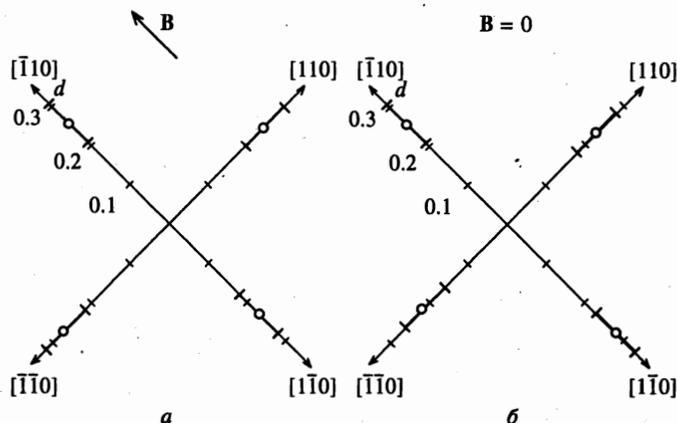


Рис. 1. Доля дислокаций d , сместившихся в четырех возможных направлениях в кристалле NaCl: а) в кристаллах, обработанных импульсом магнитного поля, б) в контрольных опытах

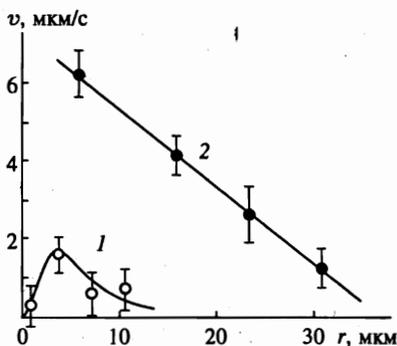


Рис. 2. Средняя скорость движения дислокаций v в кристаллах NaCl в зависимости от пройденного ими расстояния r : 1 — движение дислокаций в контрольных опытах без магнитного поля, 2 — движение дислокаций, стимулированное импульсом магнитного поля с $B = 7$ Тл

скорость движения дислокаций между остановками, v , наблюдалась и на расстояниях $r \approx 10\text{--}30$ мкм от их первоначального местоположения (рис. 2). Это свидетельствует о вызванных импульсом магнитного поля остаточных изменениях в кристалле, которые и после отключения поля продолжают сказываться на подвижности дислокаций.

2. Для выяснения роли магнитного поля в откреплении дислокаций от стопоров в условиях макродеформирования производили вторую серию опытов. О влиянии магнитного поля на макропластическую деформацию кристаллов NaCl, производимую под действием линейно нарастающих со временем механических напряжений сжатия, можно было судить по изменениям кривой деформирования $\epsilon(\sigma)$ при включении импульса магнитного поля с индукцией $B = 7$ Тл, направленной вдоль оси сжатия. Включение магнитного поля в упругой области не вызывало изменений диаграммы деформирования. Включение магнитного поля незадолго до достижения предела текучести ϵ_y приводило к понижению последнего. Включение магнитного поля на стадии легкого скольжения вызывало скачкообразное увеличение ϵ , т. е. происходило кратковременное разупрочнение кристалла. Максимальная величина скачка $\Delta\epsilon$ наблюдалась сразу после достижения ϵ_y (рис. 3).

Скачок деформации происходил не во время действия поля, а лишь через 100–

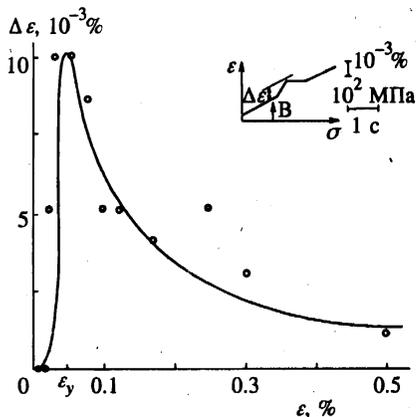


Рис. 3

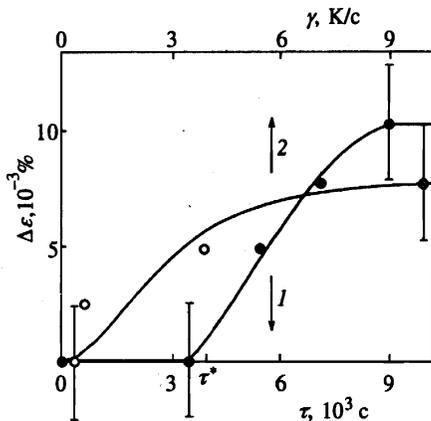


Рис. 4

Рис. 3. Зависимость величины скачка деформации $\Delta\epsilon$, вызываемого импульсом магнитного поля с $B = 7$ Тл, в кристаллах NaCl с пределом текучести ϵ_y от полной деформации кристаллов ϵ . Сбоку показан типичный фрагмент диаграммы деформирования в момент включения магнитного поля

Рис. 4. Зависимость величины скачка относительной деформации $\Delta\epsilon$, вызванного импульсом магнитного поля $B = 7$ Тл, в предварительно закаленных кристаллах NaCl, достигнувших деформации 0.15%, от времени τ их предварительной выдержки при $T = 700$ К (средняя скорость последующего охлаждения 9 К/с) (1) и от средней скорости закаливания γ при $\tau = 10^4$ с (2)

150 мс после окончания импульса магнитного поля. В течение 5–7 с после скачка, вызванного магнитным полем, скорость пластического течения была уменьшенной по сравнению с ее значением до включения магнитного поля. Включение поля в этот промежуток времени оказывало значительно более слабое влияние на пластичность (или вовсе не регистрировалось). Задержка скачка разупрочнения по отношению к экспозиции в магнитном поле и пониженная чувствительность кристалла к полю после него свидетельствуют о том, что и в условиях макропластической деформации фактически наблюдается последствие магнитного поля, обусловленное остаточными изменениями в состоянии дефектов структуры.

Узкий диапазон деформаций вблизи предела текучести, в котором проявляется магнитопластический эффект, означает, что магнитное поле эффективно облегчает преодоление дислокациями точечных дефектов и слабо влияет (или не влияет) на взаимодействие скользящих дислокаций с дислокациями леса. Об этом же свидетельствовали и результаты опытов, в которых использовались два типа кристаллов NaCl: 1) выдержанные в течение нескольких лет при температуре $T = 293$ К и 2) закаленные от 700 К со скоростью охлаждения $\gamma > 4$ К/с. В процессе деформирования первых многократное включение магнитного поля не вызывало изменений скорости пластического течения кристаллов в пределах точности экспериментов. Если же перед деформированием кристаллы подвергались закаливанию, процесс их пластического течения становился чувствительным к включению поля. Установлено, что для проявления эффекта закаливания необходима выдержка кристаллов при $T = 700$ К в течение времени $\tau > \tau^* = 4 \cdot 10^3$ с.

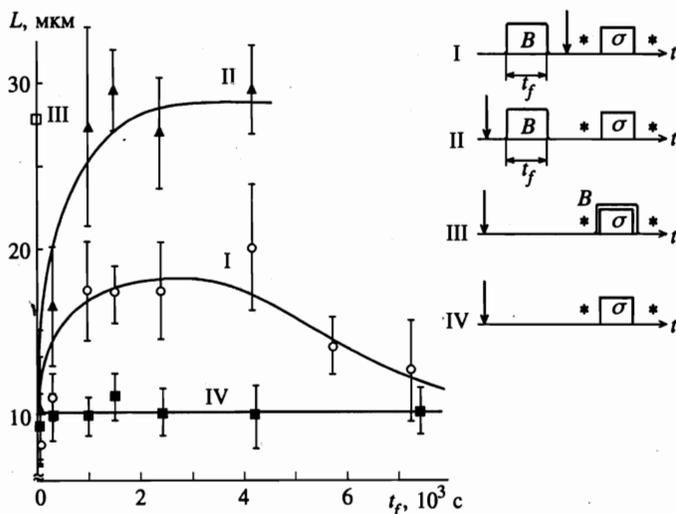


Рис. 5. Зависимость средней длины L пробега дислокаций, вызванного одинаковым во всех опытах механическим нагружением кристаллов NaCl, от длительности экспозиции t_f в постоянном магнитном поле с $B = 1$ Тл: I — дислокации вводились после экспозиции кристаллов в магнитном поле с $B = 1$ Тл; II — дислокации вводились до экспозиции кристаллов в магнитном поле с $B = 1$ Тл; III — нагружение кристаллов и их экспозиция в магнитном поле проводились одновременно в течение 6 с; IV — магнитное поле в паузе между введением дислокаций и нагружением отсутствовало ($B = 0$ Тл). Справа показана последовательность процедур в опытах разного типа (B — экспозиция в магнитном поле, σ — механическое нагружение, стрелка — введение дислокаций, звездочка — травление)

При $\tau < \tau^*$ пластические свойства кристаллов оставались нечувствительными к магнитному полю (рис. 4). Эффективность температурной сенсibilизации кристаллов к магнитному полю зависела также и от средней скорости их охлаждения γ , при снижении которой до 0.1 К/с термообработка не приводила к повышению чувствительности кристаллов к магнитному полю (рис. 4). Отметим, что в незакаленных кристаллах, хранящихся в неконтролируемых условиях, магнитоэластический эффект с меньшей систематичностью регистрировался и без предварительной термообработки, однако в этом случае он был заметно слабее.

3. Выявление механизмов разупрочняющего действия поля требует установления подверженных его влиянию объектов в кристалле. Поскольку физические свойства бездефектных областей ионных кристаллов вряд ли могут быть изменены в слабом магнитном поле, разупрочнение кристаллов может быть объяснено несколькими возможными причинами: а) магнитное поле изменяет состояние точечных дефектов, б) магнитное поле влияет на состояние дислокаций, в) к магнитному полю чувствителен сам процесс преодоления стопа дислокацией.

Чтобы установить, какие из этих возможностей действительно реализуются, проводили третью серию опытов, в которой о пластических свойствах кристаллов судили по пробегам индивидуальных дислокаций под действием калиброванного механического импульса сжатия, а экспозиция кристаллов в магнитном поле с $B = 1$ Тл осуществлялась: I) перед введением свежих дислокаций и нагружением, II) между введением дис-

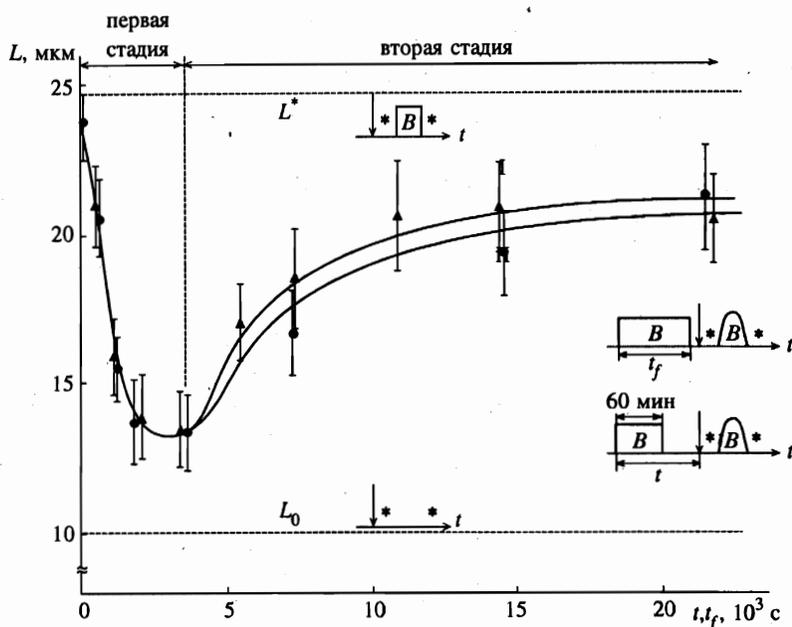


Рис. 6. Зависимость средней длины пробега дислокаций L , вызванного одинаковым во всех опытах импульсом магнитного поля ($B = 7$ Тл), в кристаллах NaCl от длительности их предварительной экспозиции t_f в постоянном магнитном поле с $B = 1$ Тл (●). Зависимость средней длины пробега дислокаций L , вызванного одинаковым во всех опытах импульсом магнитного поля ($B = 7$ Тл), в кристаллах NaCl, подвергнутых предварительной экспозиции в магнитном поле ($B = 1$ Тл) в течение 60 мин, от времени t , прошедшего между началом экспозиции кристаллов в постоянном магнитном поле и введением дислокаций (▲). Обозначения те же, что на рис. 5, импульс магнитного поля обозначен полупериодом синусоиды. Штрихом показаны значения длины пробега дислокаций L^* , инициированного импульсом магнитного поля в кристаллах, не подвергавшихся предварительной экспозиции в постоянном магнитном поле, и длины пробега L_0 , вызванного двойным травлением без магнитного поля

локаций и нагружением и III) во время нагружения кристаллов со свежесведенными дислокациями (см. правую часть на рис. 5).

В опытах I-го типа кристалл выдерживался в магнитном поле в интервале времени $0 < t_f < 10^4$ с, затем в него вводились дислокации, и после процедуры химического травления, выявляющей их исходное расположение, образец подвергался сжатию с одинаковым во всех опытах импульсом механических напряжений. Измерение средней длины пробега дислокаций L в опытах этого типа позволило установить, что в кристаллах, подвергнутых экспозиции в магнитном поле, она больше, чем в контрольных опытах без поля при $t_f < 8 \cdot 10^3$ с (рис. 5). При $t_f > 8 \cdot 10^3$ с величина L восстанавливалась приблизительно к исходному значению. «Запоминание» кристаллами факта экспозиции в магнитном поле можно было обнаружить и по измерению микротвердости, проведенному сразу после воздействия магнитного поля на образец. Микротвердость закаленных кристаллов уменьшалась после их обработки в магнитном поле

(длительность 20 с и $B = 2$ Тл) на $\sim 6\%$. В кристаллах, подвергнутых длительному изотермическому отжигу при 700 К и последующему медленному охлаждению до $T = 290$ К за 6 ч, импульс магнитного поля не оставлял остаточных изменений.

В опытах II-го типа (рис. 5) действию магнитного поля с $B = 1$ Тл могли быть подвержены и свежевведенные дислокации, и точечные дефекты, так как дислокации вводились в кристалл раньше, чем он подвергался экспозиции в магнитном поле. Измерение пробегов дислокаций, подвергнутых действию магнитного поля, как и в первом типе опытов, проводилось после отключения поля. Установлено, что при одинаковых условиях эксперимента (величине поля, продолжительности магнитной экспозиции и параметрах импульса нагружения) во втором типе опытов величина L была больше, чем в первом (рис. 5).

В опытах I-го и II-го типов для создания заметного изменения состояния кристалла, приводящего соответственно к 50- и 100-процентному увеличению L , требовалась экспозиция кристаллов в поле с $B = 1$ Тл длительностью $t_f \sim 10^3$ с при $T = 293$ К (рис. 5). Если же кристаллы со свежевведенными дислокациями подвергались одновременному действию магнитного поля и механической нагрузки (в опытах III-го типа), двукратное увеличение L достигалось уже через 5–10 с действия магнитного поля (рис. 5).

4. В экспериментах четвертой серии после экспозиции в постоянном магнитном поле в кристалл вводились дислокации, а затем для инициирования их движения вместо механического нагружения кристалл подвергался действию импульса магнитного поля ($B = 7$ Тл, длительность 10^{-2} с). В отличие от опытов третьей серии, в которых механическое нагружение могло стимулировать отрыв дислокаций от всех типов стопоров (независимо от их чувствительности к магнитному полю), в опытах четвертой серии внешнее тестирующее воздействие (импульс магнитного поля) могло инициировать открепление дислокаций только от магниточувствительных стопоров, а движение дислокаций происходило в поле внутренних механических напряжений. При длительностях экспозиции $t_f < 4 \cdot 10^3$ с в постоянном магнитном поле в противоположность аналогичным опытам третьей серии наблюдалось уменьшение L при увеличении t_f по сравнению с поведением L^* в кристаллах, не подвергавшихся предварительной экспозиции в магнитном поле (рис. 6). При $t_f > 4 \cdot 10^3$ с значение L восстанавливалось, приближаясь по мере роста t_f к значению, несколько меньшему L^* . Кинетика восстановления длины пробега дислокаций нечувствительна к наличию постоянного магнитного поля на этом восходящем участке зависимости $L(t_f)$ (рис. 6).

Если кристалл без свежевведенных дислокаций подвергали не длительной экспозиции в постоянном магнитном поле, а действию кратковременного импульса поля ($B = 7$ Тл, длительность 10^{-2} с), а затем в него вводились дислокации, то при включении второго такого же импульса, длина L оказывалась меньше, чем L^* (рис. 7), как и в опытах с постоянным магнитным полем. В специально проведенных экспериментах было установлено, что одного импульса магнитного поля оказывается достаточно, чтобы повторные импульсы поля уже не сказывались на состоянии кристалла и не изменяли подвижность вводимых впоследствии дислокаций. В этих условиях действие первого импульса магнитного поля модифицирует состояние кристалла, а последующее движение свежих дислокаций под действием повторного импульса магнитного поля может служить индикатором количества оставшихся в кристалле магниточувствительных центров, откреплению дислокаций от которых способствует магнитное поле.

Установлено, что длина пробегов дислокаций, инициированных вторым импульсом поля, зависела от времени t_p между двумя обработками кристалла в магнитном

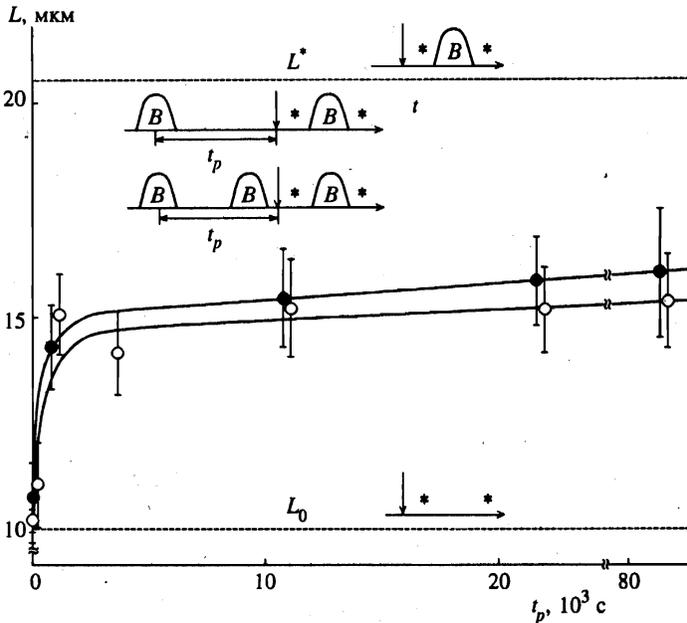


Рис. 7. Зависимость средней длины пробега дислокаций L , инициированного тестирующим импульсом магнитного поля, в кристаллах NaCl, подвергнутых действию предварительного импульса магнитного поля перед введением дислокаций, от длительности паузы t_p между импульсами магнитного поля (●); то же в условиях, когда перед введением дислокаций образец подвергался действию дополнительного промежуточного импульса магнитного поля сразу перед введением дислокаций в этой серии опытов не влияло ни на кинетику восстановления длины пробега, ни на уровень, на который выходит величина L при больших t_p (рис. 7). Штрихом показаны значения длины пробега L^* , инициированного импульсом магнитного поля в кристаллах, не подвергавшихся предварительной экспозиции в постоянном магнитном поле, и длины пробега L_0 , вызванного двойным травлением без магнитного поля. Обозначения те же, что на рис. 5, 6

поле. Причем с увеличением t_p длины пробега дислокаций, инициированных вторым импульсом поля, увеличивались (рис. 7), т.е. подвижность дислокаций со временем восстанавливалась. Включение дополнительного промежуточного импульса магнитного поля сразу перед введением дислокаций в этой серии опытов не влияло ни на кинетику восстановления длины пробега, ни на уровень, на который выходит величина L при больших t_p (рис. 7).

5. Такие экспериментальные процедуры как закаливание, механическое нагружение и введение дислокаций влияют на состояние всех типов структурных дефектов одновременно. Это затрудняет идентификацию изучаемых магниточувствительных центров и установление их физических характеристик. В то же время известно, что монохроматический свет оптического диапазона способен селективно модифицировать определенные типы точечных дефектов при совпадении частоты света с резонансными частотами внутрицентровых электронных переходов или при переходах в зону проводимости. Фотостимулированным изменением состояний некоторых типов точечных дефектов объясняются фотопластические эффекты, обнаруженные в [22, 23]. Это позволяет предполагать, что точечные дефекты, преодоление которых облегчается в результате действия магнитного поля в наших экспериментах, также могут быть селективно модифицированы светом.

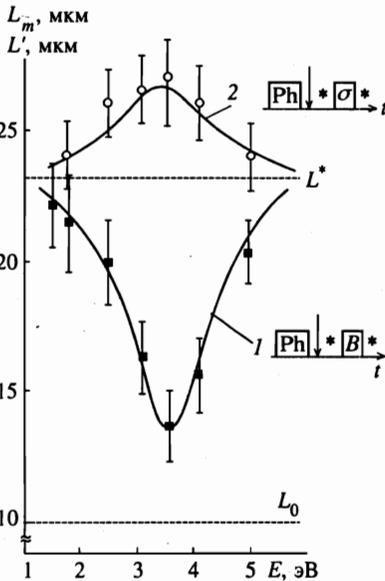


Рис. 8. Зависимости средних длин пробегов дислокаций, вызванных в кристаллах NaCl импульсом магнитного поля, L' (1), и механическим нагружением, L_m (2), от энергии квантов света E , используемого при предварительной фотоэкспозиции. Штрихом показаны значения длины пробега дислокаций L^* , вызываемого нагружением или импульсом магнитного поля в «темновых» кристаллах, и длины пробега L_0 , вызываемого травлением. Обозначения те же, что в подписи к рис. 5, Ph — фотоэкспозиция

Для проверки этого предположения в пятой серии опытов кристаллы NaCl, KCl и LiF в течение 15 мин освещались лампой ДКСШ-200 через решеточный монохроматор в диапазоне длин волн 200–800 нм. Затем в них вводили дислокации и подвергали действию импульса магнитного поля с $B = 7$ Тл. По окончании импульса кристаллы повторно протравливали для определения нового положения дислокаций. Установлено, что длина среднего пробега в фотоэкспонированных кристаллах L' немонотонно зависит от энергии световых квантов E и отличается от величины пробега L^* в «темновых» (не подвергавшихся фотоэкспозиции) кристаллах (рис. 8). Наибольшей величины разность $|L' - L^*|$ достигала при энергиях квантов возбуждающего света равных $E_1 = 2.8$ эВ для KCl, $E_2 = 3.6$ эВ для NaCl и, как установлено экстраполяцией гауссовской зависимости $L(E)$ в коротковолновую область спектра, $E_3 = 6.6$ эВ для LiF. Для всех типов кристаллов L' была существенно меньше, чем L^* . Следовательно, их освещение перед экспозицией в магнитном поле подавляло магнитопластический эффект.

Фотостимулированное изменение чувствительности кристаллов к магнитному полю можно объяснить либо общим снижением подвижности дислокаций независимо от причины их перемещения в кристалле (например, в результате изменения нечувствительных к магнитному полю стопоров), либо модифицированием магниточувствительных точечных дефектов. Очевидно, что в первом случае величины пробегов дислокаций, вызванных действием внешних механических напряжений, будут уменьшаться после фотоэкспозиции так же, как и вызванных магнитным полем. Во втором случае при механическом нагружении фотоэкспонированных кристаллов можно ожидать и увеличения L по сравнению с L^* .

Выбор между этими возможностями позволила сделать серия экспериментов, в которых последовательность процедур была аналогична, но импульс магнитного поля заменялся механическим импульсом сжатия. Величина нагрузки была подобрана так, чтобы вызываемый ею пробег дислокаций в «темновых» кристаллах L_m был равен L^* . Установлено, что в противоположность опытам, в которых движение дислокаций ини-

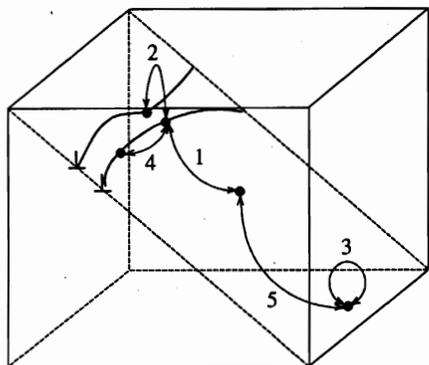


Рис. 9. Схематическое изображение типов реакций между дефектами кристалла, на протекание которых может влиять магнитное поле: 1) $R_D + R_P \leftrightarrow M_1$, 2) $R_{D1} + R_{D2} \leftrightarrow M_2$, 3) $R_{P'} + R_{P''} \leftrightarrow M_3$, 4) $R_{D'} + R_{D''} \leftrightarrow M_4$, $R_{P1} + R_{P2} \leftrightarrow M_5$ (R_D — парамагнитные центры, локализованные в ядре дислокации, R_P — парамагнитные точечные дефекты, в формулах индексам со штрихами соответствуют реагенты, принадлежащие одному и тому же, а с цифрами — разным структурным дефектам)

цировалось импульсом магнитного поля, предварительная фотоэкспозиция кристаллов приводила к увеличению L_m (рис. 8). Следовательно, «механическая» подвижность дислокаций при этом возрастала, а восприимчивость к внешнему магнитному полю утрачивалась. С учетом сказанного выше это означает, что фотостимулированное изменение подвижности дислокаций является следствием влияния света именно на те точечные дефекты, преодоление которых дислокациями облегчается в магнитном поле.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В ионных кристаллах многие точечные дефекты и ядра дислокаций, содержащие оборванные связи или захваченные деформационным потенциалом электроны и дырки, как известно, обладают парамагнитными свойствами [24, 25]. Следовательно, между ними в процессе структурных перестроек могут устанавливаться и разрушаться ковалентные связи. В химии радикальных реакций известно множество примеров влияния слабых магнитных полей на кинетику и выход этих реакций [16–18]. Эти эффекты нашли непротиворечивое описание в рамках теории спин-зависимых интеркомбинационных переходов, наблюдающихся в реакционной ячейке в отсутствие термодинамического равновесия [19, 20]. В [11, 12] предлагалось использовать элементы этой теории при рассмотрении процесса взаимодействия дислокации с локальным стопором в кристалле. Очевидно, такой подход может быть применен лишь к тем экспериментальным условиям, при которых магнитное поле существует во время сближения дислокации с препятствием и в процессе его преодоления. Как вытекает из результатов, изложенных в предыдущем разделе, после отключения магнитного поля в кристалле сохраняются остаточные изменения, которые длительное время влияют на подвижность дислокаций. Поскольку эти изменения могут появиться, даже если экспозиция кристалла в магнитном поле проводится в отсутствие свежевведенных дислокаций, приходится расширить спектр возможных спин-зависимых реакций в кристалле, на которые может действовать магнитное поле. Возможные типы реакций, способные играть роль в формировании пластических свойств кристаллов в магнитном поле, схематически представлены на рис. 9. Из них только для двух типов реакций ($R_D + R_P \leftrightarrow M_1$ и $R_{D1} + R_{D2} \leftrightarrow M_2$) необходимо перемещение дислокаций по кристаллу (обозначения см. в подписях к рис. 9). Остальные могут протекать и в ненагруженном кристалле. Очевидно, для установления механизмов действия поля необходимо определить вклад каждой из реакций в об-

щий эффект разупрочнения кристаллов в магнитном поле. Результаты исследования влияния магнитного поля на подвижность индивидуальных дислокаций позволяют это сделать.

Обсудим сначала возможность влияния магнитного поля на состояние кристаллов в отсутствие свежевведенных дислокаций. В опытах I-го типа третьей серии (рис. 5), и в опытах четвертой серии (рис. 6), в которых экспозицию кристаллов в магнитном поле проводили до введения свежих дислокаций, это поле, в принципе, могло стимулировать открепление имеющихся в кристалле ростовых дислокаций от примесных атмосфер, повлияв тем самым на перераспределение дальнедействующих внутренних напряжений. Однако, если бы этот фактор мог сказываться на подвижности вводимых впоследствии дислокаций, нельзя было бы ожидать, что по мере увеличения длительности экспозиции кристалла в магнитном поле при ($t_f > 4 \cdot 10^3$ с) подвижность вводимых впоследствии дислокаций снова будет самопроизвольно восстанавливаться почти до исходного значения. В самом деле, уменьшение подвижности дислокаций при $t_f < 4 \cdot 10^3$ с и ее восстановление при $t_f > 4 \cdot 10^3$ с (рис. 6) не может быть объяснено одной и той же причиной — релаксацией внутренних напряжений при откреплении ростовых дислокаций.

Это позволяет предполагать, что в опытах, в которых экспозицию кристаллов в магнитном поле проводили до введения свежих дислокаций, поле могло повлиять лишь на состояние точечных дефектов, поскольку во время экспозиции кристаллов в магнитном поле свежие дислокации отсутствовали, а наблюдаемые немонотонные изменения пластических свойств невозможно объяснить релаксацией внутренних напряжений при откреплении в магнитном поле ростовых дислокаций. Следовательно, действию магнитного поля могли быть подвержены следующие реакции в подсистеме точечных дефектов: $R_{P'} + R_{P''} \leftrightarrow M_3$ и $R_{P_1} + R_{P_2} \leftrightarrow M_5$ (рис. 9).

Несмотря на то что в опытах третьей серии (рис. 5) экспозиция кристаллов в магнитном поле приводила к временному повышению подвижности, а в опытах четвертой серии, проведенных в отсутствие внешней механической нагрузки, наблюдалось ее уменьшение (рис. 6), в дальнейшем она восстанавливалась с течением времени в обоих случаях. На первый взгляд это может означать, что реакции $R_{P'} + R_{P''} \leftrightarrow M_3$ и $R_{P_1} + R_{P_2} \leftrightarrow M_5$ обратимы, т.е. магнитное поле возбуждает точечные дефекты, которые затем релаксируют к исходному состоянию. Однако подвижность дислокаций восстанавливается до уровня меньшего, чем исходный, а восходящий участок зависимости $L(t_f)$ нечувствителен к наличию постоянного магнитного поля (рис. 6). Это может означать, что немонотонность вариаций длины пробега после воздействия магнитного поля может быть объяснена многостадийным релаксационным процессом в подсистеме точечных дефектов, в котором магнитное поле сыграло роль «спускового крючка», открыв возможность для протекания запрещенных в его отсутствие реакций.

Если бы это было не так, включение дополнительного промежуточного импульса магнитного поля сразу перед введением дислокаций в четвертой серии опытов (рис. 7) должно было бы сделать длину их пробега такой же, как и через короткое время после первого импульса магнитного поля. Однако эксперименты показывают, что промежуточный импульс не влияет ни на кинетику восстановления длины пробега, ни на уровень, на который выходит зависимость $L(t)$ (рис. 7). Следовательно, состояние точечных дефектов меняется необратимо, а восстановление чувствительности длины дислокационных пробегов к магнитному полю может быть следствием возбуждения точечных дефектов, создаваемого в процессе введения дислокаций или следствием движения заряженных дислокаций по кристаллу.

Наиболее правдоподобной причиной сенсбилизации точечных дефектов к магнитному полю при введении дислокаций представляется действие сильных электрических полей, возникающих при движении заряженных дислокаций в момент введения. Предварительные эксперименты показывают, что внешнее переменное электрическое поле напряженностью ~ 10 кВ/см приводит к возникновению чувствительности точечных дефектов к магнитному полю в тех кристаллах, в которых их чувствительность к полю была подавлена изотермическим отжигом.

Таким образом, при $B = 7$ Тл импульса магнитного поля длительностью 10^{-2} с оказывается достаточно для протекания первой стадии релаксационного процесса в подсистеме метастабильных точечных дефектов, которая в магнитном поле с $B = 1$ Тл протекает за $4 \cdot 10^3$ с. Вторая стадия, в процессе которой термодинамический потенциал кристалла с точечными дефектами также продолжает уменьшаться, протекает уже после окончания действия импульса магнитного поля. В результате протекания второй стадии точечные дефекты оказываются в таком состоянии, из которого они могут быть переведены в возбужденное магниточувствительное состояние при введении дислокаций.

В настоящее время широко известно об эффективном влиянии слабого в энергетическом масштабе магнитного поля на скорость релаксации различных систем из метастабильного состояния: на скорость химических реакций [16–18], на фотопроводимость [26], вязкость аморфных материалов [27] и др. Обнаруженная в наших экспериментах необратимость изменения состояний точечных дефектов в магнитном поле, а также необходимость предварительного возбуждения кристаллов с помощью введения дислокаций или закаливания для проявления в них магнитоэластического эффекта (рис. 3) ставят этот эффект в один ряд с вышеперечисленными явлениями и проясняют термодинамические аспекты влияния магнитного поля на пластичность. Закаливание или электрическое поле движущихся дислокаций создает в кристалле неравновесное распределение структурных дефектов по состояниям, а магнитное поле способствует их релаксации, ускоряя лишь темп релаксационных процессов, протекающих в подсистеме точечных дефектов и в отсутствие поля. Возможность влияния магнитного поля на состояние точечных дефектов в тех кристаллах, которые не подвергались какому-либо предварительному возбуждению, по-видимому, связана с наличием в них биографического неравновесного распределения по степени агрегированности, ориентации или др.

Отметим, что другими авторами [6, 10] наблюдалось открепление дислокаций от стопоров в магнитном поле в хорошо отожженных кристаллах как на микро-, так и на макропластическом уровнях. Это свидетельствует о том, что обнаруженный нами канал пластификации кристаллов в магнитном поле не единственный. В отсутствие магниточувствительных точечных дефектов магнитное поле может вызывать изменение кинетики протекания и других перечисленных в подписи к рис. 9 реакций, что также приводит к изменению пластичности.

Рассмотрим теперь опыты, в которых действию магнитного поля могли подвергаться и дислокации, и точечные дефекты одновременно (опыты II-го типа, см. рис. 4). Еще большее, по сравнению с опытами I-го типа, разупрочнение кристаллов, возникавшее в таких экспериментах (рис. 4), свидетельствует о том, что и состояние дислокаций может быть подвержено влиянию магнитного поля, т. е. реакции типа $R_{D'} + R_{D''} \leftrightarrow M_4$ могут иметь место и быть чувствительными к наличию магнитного поля. Альтернативным объяснением этого может быть влияние магнитного поля на открепление дислокаций от стопоров на старте и, как следствие, их облегченное движение при последующем

нагружении. Определить, в какой мере каждый из этих факторов может давать вклад в добавочное разупрочнение кристаллов в магнитном поле, можно из анализа экспериментальных данных о движении дислокаций, полученных методом непрерывного травления.

Если бы открепление в магнитном поле на старте большего числа дислокаций, чем в контрольных опытах, приводило бы к заметному перераспределению внутренних механических напряжений и коллективному эффекту возрастания подвижности, то следовало бы ожидать, что движение дислокаций должно быть в значительной степени скоррелированным — открепление и закрепление каждой дислокации должно влиять на скорость остальных, а время ожидания на старте для каждой дислокации было бы взаимосвязано с параметрами ее дальнейшего движения.

Измерение размеров дислокационных ямок позволило определить времена ожидания для 90 дислокаций на стопорах и времена их движения между остановками по методике, описанной в [21]. Установлено, что коэффициент корреляции Γ_1 между временем, прошедшим от начала травления до первого открепления, и полной длиной пробега дислокаций близок к нулю ($\Gamma_1 = -0.11$). Низкое значение имеет также и коэффициент корреляции между временем ожидания до первого открепления и временем движения дислокации до первой остановки $\Gamma_2 = -0.03$. Это позволяет предполагать, что стимулированное магнитным полем открепление дислокаций на старте практически не оказывает существенного влияния на их последующее движение. Кроме того для 90% движущихся дислокаций первое открепление происходит уже после окончания импульса магнитного поля. Все это позволяет предполагать, что увеличенная скорость дислокаций на больших расстояниях от места их исходного расположения является следствием «запоминания» структурными дефектами факта их экспозиции в магнитном поле. В пользу такой точки зрения свидетельствует также и запаздывание скачка макропластической деформации, вызываемого коротким импульсом магнитного поля (рис. 3).

Таким образом, влияние магнитного поля на открепление дислокаций от парамагнитных стопоров (на реакцию типа $R_D + R_P \leftrightarrow M_1$), обнаруженное в [1], может оказаться не единственной причиной смещения дислокаций в ненагруженных кристаллах. Другой причиной может быть изменение состояний изолированных структурных дефектов: точечных дефектов и ядер дислокаций. Следовательно, наиболее полное рассмотрение магнитопластического эффекта в ионных кристаллах должно учитывать по меньшей мере три типа магниточувствительных реакций: 1) между точечными дефектами в объеме кристалла, 2) между точечными центрами в дислокационном ядре и 3) между точечным дефектом и парамагнитным центром в ядре дислокации.

Конкретизировать эти общие представления о влиянии магнитного поля на пластичность позволяют данные о типах дефектов, на которые может влиять магнитное поле, и о кинетике процессов, протекающих в подсистеме точечных дефектов после экспозиции кристаллов в магнитном поле. Экспериментальные данные о кинетике магнито-стимулированных процессов и качественные оценки позволяют устанавливать направление реакции $R_{P'} + R_{P''} \leftrightarrow M_3$. Процессы, которые могли происходить с точечными дефектами после экспозиции в магнитном поле, условно можно разбить на две группы: 1) мономолекулярные — взаимонезависимые локальные реакции, к которым относятся переориентации дефектов, диссоциация пар, переходы на другой электронный уровень внутри дефекта и т. д., 2) бимолекулярные — взаимообусловленные процессы, примером которых может служить рекомбинация блуждающих дефектов в пары, захват в ловушки электронов из зоны проводимости и другие реакции, требующие встречи реа-

гентов одного и того же или разных типов. При протекании мономолекулярных процессов число стопоров, изменивших свое состояние к моменту времени t после окончания возбуждения, выражается формулой $N(t) = N_0(1 - \exp(-t/\tau))$. Бимолекулярные процессы подчиняются гиперболическому закону изменения концентрации возбужденных дефектов во времени $N(t) \sim 1/(1 + ct^n)$, $n > 0$ [28]. Известная связь между L и N ($L \propto N^{-1/2}$) [29] позволяет определить, к какому из этих типов процессов относятся реакции, инициированные в кристаллах после выключения магнитного поля.

Аппроксимация зависимости величины $(L - L^*)/L^*$ от t_f на первой стадии релаксационного процесса (рис. 6) прямой линией в полулогарифмических координатах дает среднеквадратическую ошибку на 30% меньшую, чем в двойных логарифмических координатах. На второй стадии, напротив, среднеквадратическая ошибка в двойных логарифмических координатах в четыре раза меньше чем в полулогарифмических. В связи со сказанным выше, это может означать, что на первой стадии в подсистеме точечных дефектов в магнитном поле протекает мономолекулярная реакция типа $M_3 \rightarrow R_{P'} + R_{P''}$, а на второй — бимолекулярная (например, $R_{P1} + R_{P2} \rightarrow M_5$). Дополнительным аргументом в пользу этого предположения являются результаты, полученные в [30], где было установлено, что импульсное магнитное поле способно приводить к такому изменению картины декорирования поверхности ионных кристаллов, которое соответствует диссоциации агрегированной примеси. Бимолекулярностью реакций на второй стадии преобразования точечных дефектов могут объясняться диффузионные времена их релаксации после отключения магнитного поля, которые, по-видимому, необходимы для осуществления встреч хаотически блуждающих реагентов. В пользу этой точки зрения свидетельствует также увеличение скорости перехода дефектов в новое состояние при повышении температуры [31], которое, по-видимому, связано с ростом подвижности реагентов R_{P1} и R_{P2} .

Таким образом, имеются основания предполагать, что в магнитном поле происходит мономолекулярный процесс образования реагентов путем диссоциации составных точечных дефектов (магнитное поле стимулирует реакцию $M_3 \rightarrow R_{P'} + R_{P''}$). Продукты распада рекомбинируют друг с другом или с другими дефектами после отключения магнитного поля.

Перейти от феноменологического рассмотрения магнитопластического эффекта к установлению механизмов действия магнитного поля позволяют результаты экспериментов по оптическому гашению чувствительности кристаллов к магнитному полю. Так как для атомной перестройки конфигурации точечных дефектов, происходящей непосредственно под действием света, необходимы энергии квантов, близкие или большие рентгеновского диапазона, а для совпадения частоты внешнего воздействия с резонансной частотой собственных локальных колебаний дефектов обычно используется излучение из далекой инфракрасной области, с большой долей уверенности можно предполагать, что свет оптического диапазона с энергией квантов меньшей ширины запрещенной зоны приводит к перестройке электронной структуры магниточувствительных центров. Следовательно, объяснение магнитопластического эффекта может быть получено с учетом влияния магнитного поля на электронные свойства дефектов. Это позволяет предполагать, что к магнитному полю чувствителен процесс электронного взаимодействия между дефектами, т.е. описанные выше реакции, по-видимому, имеют химическую природу и заключаются в установлении обменной спин-зависимой связи между парамагнитными дефектами. О существенной роли твердотельных химических реакций между структурными дефектами в формировании оптических и электрических свойств

кристаллов известно давно [32, 33]. Однако при рассмотрении пластических свойств кристаллов, как правило, учитывается лишь упругое или электростатическое взаимодействие между дефектами [34]. Такой подход, очевидно, не позволяет объяснить всю совокупность экспериментальных данных о влиянии магнитного поля на подвижность дислокаций в ионных кристаллах.

Приведем экспериментальные факты, прямо свидетельствующие о необходимости учета обменных короткодействующих сил при рассмотрении взаимодействия между точечным дефектом и дислокацией. Если гипотеза о спиновой природе магнитоэластического эффекта верна, то совместное действие слабого постоянного и высокочастотного (СВЧ) магнитных полей при определенных условиях может приводить к магнитному резонансу в комплексах дефектов, влиять на эффективность образования вторичных продуктов реакций и, таким образом, отражаться на подвижности дислокаций. Проверка этого предположения заключалась в исследовании подвижности индивидуальных краевых дислокаций в условиях одновременного действия слабого постоянного и скрещенного с ним высокочастотного магнитных полей. Такая постановка эксперимента аналогична РИДМР, известному методу исследования химических реакций в скрещенных магнитных полях по конечному выходу продуктов [35–37].

В экспериментах использовали отожженные при 700 К и охлажденные до 293 К за 1 ч монокристаллы NaCl с примесью двухвалентных металлов (в основном Ca) на уровне 0.01 ат.%. Образцы со свежевведенными краевыми дислокациями помещались внутрь прямоугольного волновода типа H_{10} , соединенного с клистроном, который работал на частоте 9.5 ГГц и генерировал поток электромагнитного поля мощностью ~ 10 мВт через образец. Волновод находился между полюсами электромагнита, который мог создавать постоянное магнитное поле с индукцией B_0 от 0.2 до 0.8 Тл в области расположения кристалла. Длины пробегов индивидуальных краевых дислокаций, которые выполняли роль индикатора магниточувствительных процессов в кристалле, измерялись традиционным методом двойного химического травления. Каждая точка на графиках строилась путем усреднения 100–400 пробегов отдельных дислокаций, измеренных в одинаковых условиях. Двойное травление образцов в отсутствие внешних воздействий вызывало среднее смещение дислокаций $L_0 = 12 \pm 1$ мкм. Таким же по величине было смещение дислокаций в кристаллах, подвергнутых в течение 15 мин действию СВЧ в отсутствие постоянного магнитного поля, т. е. обработка кристаллов в одном только переменном магнитном поле не влияла на подвижность дислокаций (рис. 10).

В отсутствие СВЧ-поля экспозиция кристаллов в постоянном магнитном поле в течение 15 мин приводила к увеличению длины пробегов дислокаций по сравнению с L_0 . Как видно из рис. 10, в отсутствие СВЧ-поля наблюдалась монотонно возрастающая зависимость $L(B_0)$.

Экспозиция кристаллов в постоянном магнитном поле при одновременном действии СВЧ-излучения в течение 15 мин (в конфигурации $\mathbf{V}_1 \perp \mathbf{B}_0$, где \mathbf{V}_1 — вектор индукции магнитного СВЧ-поля) приводила к появлению пика на зависимости $L(B_0)$ при $B_{res} = 0.33 \pm 0.01$ Тл (рис. 10).

Аналогичный результат получается при частоте переменного поля 152.2 МГц, на которой при $B'_{res} \approx 0.005$ Тл также обнаруживается, хотя и более слабое, но вполне различимое, резонансное увеличение пробегов дислокаций. Если постоянное и СВЧ поля были приложены в конфигурации $\mathbf{V}_1 \parallel \mathbf{B}_0$, пик на зависимости $L(B_0)$ исчезал, а сама зависимость становилась близка к той, которая наблюдалась в отсутствие СВЧ-поля. Таким образом, в широком диапазоне частот СВЧ при подборе индукции постоянного

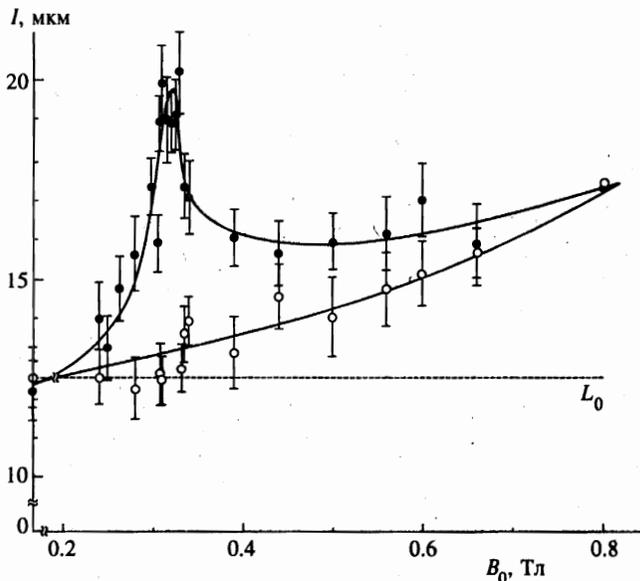


Рис. 10. Зависимость средней длины пробега дислокаций L , вызванного постоянным магнитным полем B_0 , приложенным в течение 15 мин при одновременном действии перпендикулярно направленного высокочастотного магнитного поля ($\nu = 9.5$ ГГц) (•), в отсутствие СВЧ-поля (o). Штрихом показано значение длины пробегов L_0 , вызванных травлением в кристаллах, не подвергавшихся воздействию внешних полей

магнитного поля можно наблюдать пики на зависимости $L(B_0)$.

Как при совместном действии СВЧ и постоянного магнитного полей, так и при экспозиции кристаллов в постоянном магнитном поле в отсутствие СВЧ в среднем по кристаллу наблюдается равновероятный характер движения дислокаций в кристаллографических направлениях $[110]$, $[\bar{1}10]$, $[1\bar{1}0]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$ на всех гранях образца. Следовательно, роль внешних полей в наших опытах сводится к откреплению дислокаций от стопоров, а движение дислокаций происходит под действием случайных внутренних механических напряжений.

Не затрагивая конкретных механизмов открепления дислокаций от стопоров, обсудим общие выводы, вытекающие из полученных результатов. Экспериментально найденное значение $B_{res} = 0.33 \pm 0.01$ Тл соответствует полю $B_{th} = h\nu/\mu_B g$, при котором на частоте СВЧ $\nu = 9.5$ ГГц происходят резонансные переходы между расщепленными в постоянном магнитном поле спиновыми подуровнями электрона с фактором Ланде $g = 2.06 \pm 0.05$. Возможность регистрации резонансного увеличения подвижности дислокаций на частоте $\nu = 152.2$ МГц при соответствующем значении B_0 является дополнительным свидетельством резонансной природы обнаруженного явления.

Обычно роль резонансного СВЧ-поля заключается в увеличении интенсивности переходов между синглетным и триплетными подуровнями неравновесной пары, состоящей из парамагнитных частиц [37]. Интенсификация таких переходов в короткоживущей паре $D + T$, как было теоретически показано в [38], способна отразиться на подвижности дислокаций. Таким образом, совместное влияние постоянного и высокочастотного магнитных полей на пластичность позволяет вычленить спин-зависимую

короткодействующую часть сил, тормозящих движение дислокаций, из суммы упругого, электростатического и обменного взаимодействий с точечными дефектами.

5. ВЫВОДЫ

Таким образом, экспериментально установлено, что одним из необходимых условий влияния магнитного поля на структурные дефекты является их пребывание в метастабильном состоянии. Это проясняет термодинамические аспекты влияния слабых электромагнитных полей на физические свойства материалов. Обнаружено, что в магнитном поле может измениться как состояние комплексов точечных дефектов, так и дислокационных ядер. Выявлены типы и порядок реакций между различными дефектами и внутри одного и того же типа дефектов, на протекание которых влияет магнитное поле. Обнаружена возможность селективного модифицирования магниточувствительных точечных дефектов светом оптического диапазона, а также совместным действием постоянного и высокочастотного магнитных полей, позволяющая создать экспериментальные условия для их идентификации. Показано, что для объяснения чувствительности внутрикристаллических реакций к магнитному полю необходимо учесть электронные степени свободы дефектов, участвующие в образовании химических связей между ними. Это свидетельствует о значимой роли обменных сил в формировании пластических свойств ионных кристаллов. Предполагаемые механизмы влияния магнитного поля на состояние дефектов в ионных кристаллах не обладают спецификой, связанной с конкретным типом материалов, и в определенных условиях могут быть применены для объяснения магнитопластических эффектов в металлах, полупроводниках и полимерах. Созданные экспериментальные ситуации могут играть роль модельных для изучения более сложных объектов, чувствительных к магнитному полю: полимерных и белковых макромолекул, а также биологических систем.

Авторы выражают признательность профессору Альшицу В. И. и профессору Молоцкому М. И. за плодотворное обсуждение работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 97-02-16074).

Литература

1. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Т. М. Перекалина, А. А. Урусовская, ФТТ **29**, 467 (1987).
2. Ю. И. Головин, О. Л. Казакова, Р. Б. Моргунов, ФТТ **35**, 1384 (1993).
3. А. Е. Смирнов, А. А. Урусовская, ФТТ **29**, 852 (1987).
4. Yu. I. Golovin, R. B. Morgunov, D. V. Lopatin, and A. A. Baskakov, Phys. Stat. Sol. (a), **160**, R3 (1997).
5. Э. П. Белозерова, А. А. Светашев, В. Л. Красников, Известия АН, серия физическая **61**, 291 (1997).
6. А. А. Урусовская, В. И. Альшиц, А. Е. Смирнов, Н. Н. Беккауер, Письма в ЖЭТФ **65**, 6, 471 (1997).
7. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Е. А. Петржик, Известия ВУЗов, Черная металлургия **10**, 85 (1990).

8. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, Письма в ЖЭТФ **61**, 583 (1995).
9. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, О. Л. Казакова, Письма в ЖЭТФ **62**, 352 (1995).
10. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, О. Л. Казакова, ЖЭТФ **111**, 615 (1997).
11. М. И. Молоцкий, ФТТ **33**, 3112 (1991).
12. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Е. А. Петржик, ФТТ **33**, 3001 (1991).
13. M. I. Molotskii and V. N. Fleurov, Phys. Rev. Lett. **78**, 1 (1997).
14. M. I. Molotskii and V. N. Fleurov, Phys. Rev. (B) **52**, 15829 (1995).
15. M. I. Molotskii, R. E. Kris, and V. N. Fleurov, Phys. Rev. (B) **51**, 12531 (1995).
16. А. Л. Бучаченко, Р. З. Сагдеев, К. З. Салихов, *Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях*, Наука, Новосибирск (1978).
17. А. Л. Бучаченко, УФН **62**, 1139 (1993).
18. А. Л. Бучаченко, И. В. Худяков, Успехи химии **60**, 1105 (1991).
19. Я. Б. Зельдович, А. Л. Бучаченко, Е. Л. Франкевич, УФН **155**, 3 (1988).
20. A. L. Buchachenko and I. V. Berdinsky, Chem. Phys. Lett. **1**, 43 (1968).
21. Ю. П. Пшеничнов, *Выявление тонкой структуры кристаллов*, Металлургия, Москва (1974).
22. Ю. А. Осипьян, И. Б. Савченко, Письма в ЖЭТФ **7**, 130 (1968).
23. Ю. А. Осипьян, В. Ф. Петренко, М. Ш. Шихсаидов, Письма в ЖЭТФ **20**, 363 (1974).
24. P. W. M. Jacobs, J. of Phys. and Chem. of Solids **51**, 35 (1990).
25. С. З. Шмурак, Ф. Д. Сенчуков, ФТТ **15**, 2976 (1973).
26. Е. Л. Франкевич, ЖЭТФ **50**, 1226 (1966).
27. С. Д. Савранский, Физика и химия стекла **13**, 659 (1987).
28. Ю. Р. Закис, Л. Н. Канторович, Е. А. Котомин, *Модели процессов в широкощелевых твердых телах с дефектами*, Зинатне, Рига (1991).
29. Ж. Фридель, *Дислокации*, Наука, Москва (1966).
30. Г. И. Дистлер, В. М. Каневский, В. В. Москвин и др., ДАН СССР **268**, 591 (1983).
31. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, ФТТ **37**, 1239 (1995).
32. С. З. Шмурак, Известия АН СССР, серия физическая **40**, 1886 (1976).
33. И. А. Парфианович, Э. Э. Пензина, *Электронные центры окраски в ионных кристаллах*, Вост.-Сиб. кн. изд., Иркутск (1977).
34. Дж. Хирт, И. Лоте, *Теория дислокаций*, Атомиздат, Москва (1972).
35. E. L. Frankevich, A. I. Pristupa, and V. I. Lesin, Chem. Phys. Lett. **47**, 304 (1977).
36. Е. Л. Франкевич, В. И. Лесин, А. И. Приступа, ЖЭТФ **75**, 415 (1978).
37. Е. А. Ермакова, С. И. Кубарев, Хим. физика **11**, 73 (1992).
38. M. I. Molotskii and V. Fleurov, Phil. Mag. Lett. **73**, 11 (1996).