

УДК 539.37; 537.221

МАГНИТОСТИМУЛИРОВАННОЕ ДВИЖЕНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

© Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, С.Е. Жуликов

Golovin Yu.I., Morgunov R.B., Zhulikov S.E. Magnetostimulated Dislocation Motion Under Intrinsic Mechanical Stresses. It is shown that intrinsic mechanical stresses, on the one hand create forces necessary to overcome dislocation obstacles and, on the other hand, form non-equilibrium states of point defects. The exposure of crystals in a magnetic field leads to the increase of relaxation velocity of point defects subsystem. It is unreasonable to suggest that the magnetic field should change spin-dependent reaction kinetics.

О смещении краевых дислокаций в ионных кристаллах при их экспозиции в постоянном магнитном поле (МП) впервые сообщалось в [1]. В [2] методом непрерывного травления выявлены кинетические параметры дислокационного движения, *in situ* в процессе действия поля. Однако, как показано авторами [3], дислокации продолжают смещаться в течение длительного времени и после отключения МП. Следовательно, статистики, полученной в [2], которая характеризует вероятности старта и остановки дислокаций в МП, может оказаться недостаточно для всестороннего анализа движения дислокаций. Кроме того, до сих пор остается открытым вопрос о силах, способных приводить к смещению дислокаций в ненагруженных кристаллах. В настоящее время *a priori* считается, что дислокации смещаются под действием внутренних механических напряжений, всегда имеющих в кристаллах. Надежные экспериментальные доказательства этому отсутствуют. Поэтому цель настоящей работы заключалась в установлении роли внутренних напряжений в магнитопластичности ионных кристаллов и исследовании кинетических закономерностей отрыва и закрепления дислокаций, движение которых происходит после окончания короткого импульса МП.

В экспериментах использовали номинально чистые кристаллы NaCl $3 \times 3 \times 10$ мм³. Введение свежих дислокаций осуществляли стандартным методом нанесения царапин на грани образца. Импульсы МП, имеющие форму полупериода синусоиды длительностью $\tau = 10^{-2}$ с и амплитудой $B = 7$ Т, создавали при помощи тиристорного генератора импульсов тока. Положение дислокаций фиксировали двумя способами: двойным избирательным травлением (продолжавшимся 1 с) с интервалом между травлениями от 1 до 60 мин и непрерывным травлением кристаллов в течение 1 мин. В последнем случае кристаллы со свежевведенными дислокациями помещали в ампулу с "медленным" травителем за 10 с до включения поля. В дальнейшем,

через 50 с после осуществления магнитной экспозиции, кристалл извлекался из травителя.

Как и в [1 - 3], экспозиция образцов в МП вызывала последующее смещение дислокаций на расстояния большие, чем в контрольных опытах в отсутствие поля. На рис. 1 представлено процентное отношение числа дислокаций, двигавшихся в каждом из четырех возможных направлений $[110]$, $[1\bar{1}0]$, $[\bar{1}10]$, $[\bar{1}\bar{1}0]$ к общему числу сместившихся в различных областях образца (~ 300). Из рис. 1 следует, что стимулированное импульсом МП передвижение дислокаций по всем вышеперечисленным направлениям в пределах точности эксперимента равновероятно, как и при их откреплении травителем в отсутствие поля. Это означает, что усредненное по кристаллу значение силы, движущей дислокации, равно нулю и подтверждает гипотезу о том, что причиной смещения дислокаций являются внутренние напряжения, отличные от нуля лишь локально. В дальнейших экспериментах это обстоятельство позволяло не разделять между собой дислокации, смещавшиеся в разных плоскостях скольжения, а при вычислении их средних пробегов складывать абсолютные значения перемещений всех индивидуальных дислокаций.

При непрерывном травлении на поверхности кристалла образовывались "дорожки" - последовательности плоскодонных дислокационных ямок травления разной величины. Эти дорожки наблюдаются как в кристаллах, подвергнутых действию поля, так и в контрольных опытах и свидетельствуют о прерывистом характере движения дислокаций. Размеры минимальной, разрешаемой в оптический микроскоп, ямки травления соответствовали задержке движения дислокации на время не меньшее, чем 10 с. Остановки на более короткое время в наших экспериментах не могли быть зарегистрированы, т.е. процессы открепления дислокаций и их остановки могли наблюдаться в частотном диапазоне 0,1 - 0,016 Гц.

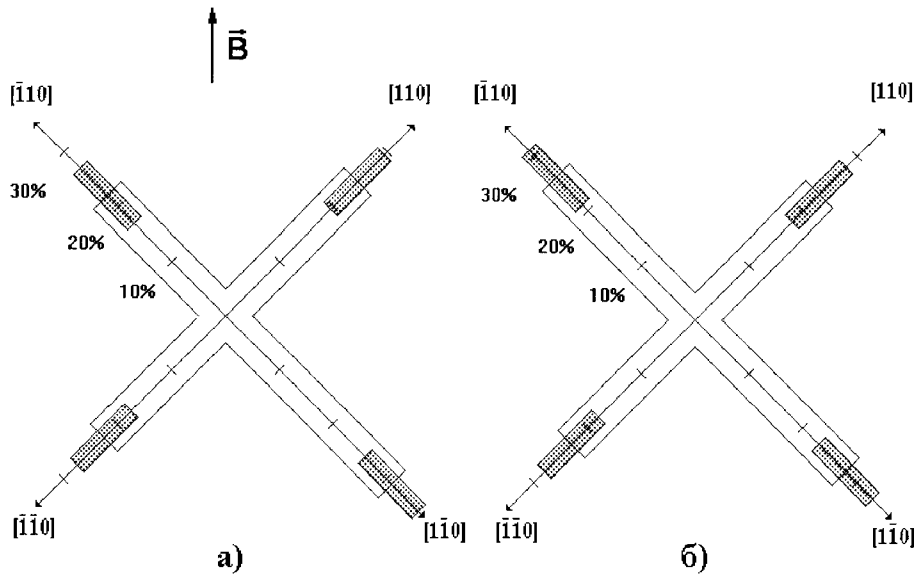


Рис. 1. Распределение движущихся дислокаций по возможным направлениям смещения: а - в образцах, подвергнутых действию импульса магнитного поля; б - в контрольных опытах без магнитного поля.

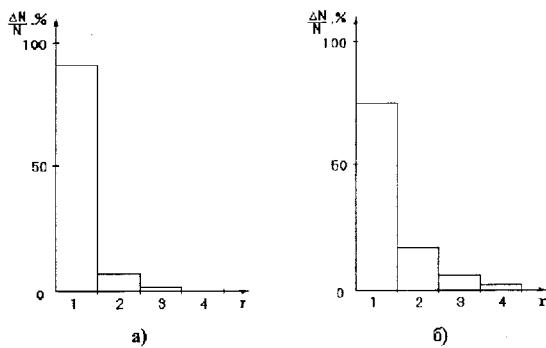


Рис. 2. Гистограмма распределения дислокаций по количеству сделанных ими остановок r : а - в кристаллах, подвергнутых действию импульса магнитного поля; б - в контрольных опытах без магнитного поля.

При обработке кристалла импульсом МП около 40 % сместившихся дислокаций двигались с одной и более промежуточными остановками, т.е. совершали не менее двух скачков. Гистограмма распределения движущихся дислокаций по количеству сделанных ими промежуточных остановок r (рис. 2) подчиняется экспоненциальному закону $\Delta N / N = \exp(-kr)$, где $k = 0,1 \pm 0,02$ в экспериментах с МП и $k = 0,04 \pm 0,02$ в контрольных опытах. Таким образом, в обоих случаях наблюдается релаксация внутренних напряжений, скорость которой различна в зависимости от того, подвергался ли кристалл действию поля.

Расстояние между соседними остановками в "дорожке" d в опытах одного и того же типа были примерно одинаковыми. В кристаллах, подвергнутых действию МП, d в среднем было в два раза больше, чем в контрольных опытах. В кристаллах, обработанных МП, увеличи-

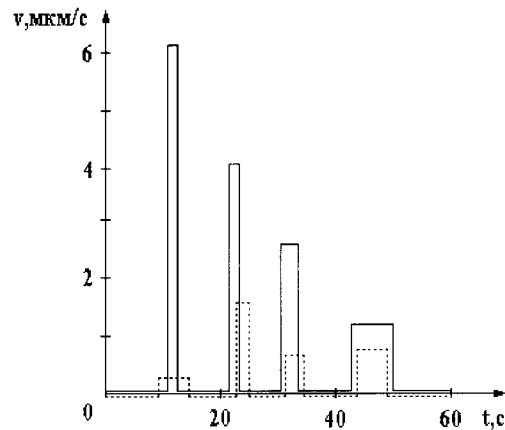


Рис. 3. Зависимость средней скорости дислокаций v от времени, прошедшего после начала "непрерывного" травления: сплошная линия - в кристаллах, подвергнутых действию импульса МП; пунктир - в контрольных опытах без магнитного поля.

валась и плотность подвижных дислокаций (в 2 - 3 раза по сравнению с контрольными образцами), т.е. МП стимулировало открепление дополнительного числа дислокаций, которые без обработки МП не двигались бы.

Внешние размеры сторон дислокационных ямок в "дорожках" L_{ex} и внутренние размеры плоского дна ямок травления L_{int} , образовавшегося после ухода дислокации из зафиксированного положения, в кристаллах, подвергнутых действию МП, в среднем отличались от контрольных замеров в отсутствие поля. По этим размерам можно было судить о времени нахождения дислокации в данном i -ом месте t_0^i ($i = 1, 2, \dots$), так как внешние границы ямки травления вытравливаются, начиная с момента остановки дислокации в данном месте до момента прекращения травления, а внутренние границы плоского дна ямки - только с момента

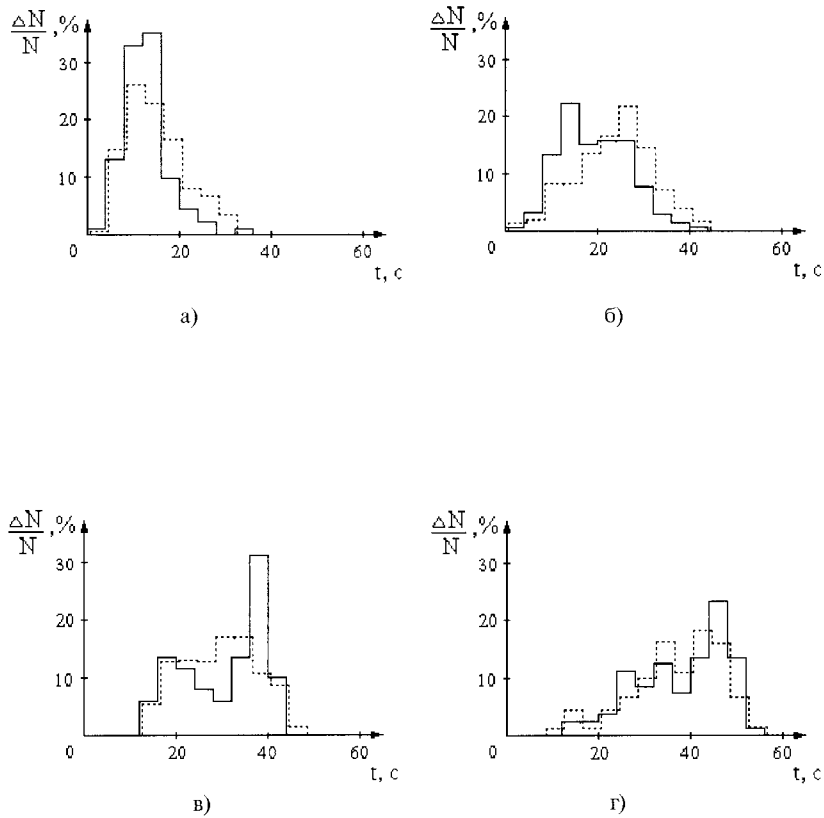


Рис. 4. Гистограммы распределения дислокаций по времени, прошедшему от начала “непрерывного травления” до: а - первого открепления (от положения с $i = 1$); б - закрепления в положении $i = 2$; в - до открепления от положения с $i = 2$; г - до закрепления в положении с $i = 3$ (i - номер положения дислокаций, регистрируемого “непрерывным” травлением).

ухода дислокации из этого положения [4]. Таким образом, зная величину скорости горизонтального травления V , которая в наших опытах была постоянна и равна $0,21 \pm 0,03$ мкм/с, можно найти время t_0^i :

$$t_0^i = (L_{ex}^{(i)} - L_{int}^{(i)}) / V.$$

Кроме того, по размерам ямок, соответствующих движению одной дислокации, можно судить и о времени t_1^i перемещения дислокации из i -го положения в $(i + 1)$ - е, так как внутренний размер i -й ямки $L_{int}^{(i)}$ образовался с момента ухода дислокации из i -го положения до конца травления, а внешний $L_{ex}^{(i+1)}$ - момент ее прихода в следующее $(i + 1)$ - е положение:

$$t_1^i = (L_{int}^{(i)} - L_{ex}^{(i+1)}) / V.$$

Анализ размеров дислокационных ямок травления в “дорожках” позволил установить характер движения дислокаций (рис. 3). Видно, что основной прирост в длине пробега дислокаций, связанный с воздействием МП, возник уже после окончания импульса поля. Сред-

няя скорость дислокаций между остановками в опытах с магнитным полем снижалась по мере их перемещения по кристаллу. В контрольных опытах средние скорости дислокаций между остановками в пределах точности экспериментов не зависели от времени, прошедшего после импульса МП, в исследуемом частотном диапазоне событий.

Поскольку средняя продолжительность движения между остановками и длительность самих остановок дислокаций в опытах с МП имели примерно те же значения, что и в контрольных опытах, а расстояния между остановками различались, можно считать, что обработка кристаллов в МП приводила к увеличению средней скорости перемещения дислокаций между остановками по сравнению с контрольными опытами. Это означает, что МП создает в кристалле остаточные изменения, которые способствуют облегченному преодолению стопоров, встречающихся дислокациям между остановками, регистрируемыми травлением.

Движение дислокаций в кристаллах после импульса МП может быть охарактеризовано не только скоростью их движения между остановками, но и моментами времени, прошедшего между импульсом МП и откреплением от крупных стопоров, обеспечивающих задержку движения, достаточную для регистрации поло-

жения дислокаций. Эти стопоры, по-видимому, нечувствительны к предварительной обработке кристалла полем, так как небольшие (на 10 - 20 %) изменения моментов открепления дислокаций от них после импульса МП не могут объяснить заметную разницу в пробегах (100 - 150 %). Однако эти изменения косвенно характеризуют процесс движения дислокаций между остановками после обработки кристаллов в МП и могут быть использованы для частотного анализа процессов преодоления магниточувствительных стопоров, расположенных между остановками, регистрируемыми в наших опытах.

Наиболее заметно обработка кристалла в МП отражалась на распределении дислокаций по времени, прошедшему от начала травления, до их первоначального ($i = 1$) открепления (рис. 4а). Из этой гистограммы, в соответствии со сделанными выше выводами, следует, что основная доля дислокаций откреплялась примерно через 5 с после импульса МП. Движение дислокаций после первого открепления происходило с повышенной скоростью по сравнению со скоростью в контрольных опытах (рис. 3). Этим, по-видимому, и были обусловлены изменения среднего времени, прошедшего после импульса МП до следующего ($i = 2$) закрепления движущихся дислокаций (рис. 4б). Среднее время ожидания повторных откреплений дислокаций не зависело от факта обработки кристалла полем, однако гистограмма распределения дислокаций по моментам их отрыва от точки второго закрепления существенно отличалась от опытов без МП наличием двух острых пиков (рис. 4в). В дальнейшем (для $i > 2$), несмотря на повышенную скорость движения дислокаций между остановками, гистограммы распределения дислокаций по моментам отрыва и закрепления не отличались от полученных в контрольных опытах (рис. 4г).

Методом двойного травления установлено, что хотя различие в кинетике перемещения дислокаций в опытах с МП и без него переставало быть заметным уже через 1 - 2 мин после импульса поля (рис. 3), повышенный процент прерывисто движущихся дислокаций был зарегистрирован в течение часа после экспозиции кристалла в МП.

Полученные результаты позволяют считать доказанным, что движение дислокаций, стимулированное МП, осуществляется под действием внутренних напряжений. Роль МП заключается в таком изменении состояния кристалла, которое и после отключения поля сказывается на подвижности дислокаций и приводит к облегченному преодолению дислокациями части стопоров. Это позволяет предполагать, что эффекты стимулированного импульсом МП смещения дислокаций в ненагруженных кристаллах могут быть объяснены изменением состояний точечных дефектов и дислокаций, обнаруженным в [5].

Возможность эффективного влияния столь слабого, в энергетическом масштабе, МП на подвижность дислокаций в ионных кристаллах может быть понята из общих термодинамических соображений. Конечно, МП с $B = 7$ Т не способно сколь-нибудь заметно изменить энергию кристалла в целом и равновесное заполнение энергетических уровней. Однако реальные кристаллы всегда обладают полями внутренних напряжений, наличие которых связано с присутствием в нем неравновесных дефектов. Помимо неравновесности, связанной с избыточной энергией упругих полей напряжений в кристаллах, возможны нарушения равновесного распределения по состояниям в электронной подсистеме дефектов, конфигурационного равновесия дефектов и другие. В принципе МП способно стимулировать релаксацию кристалла по каждому из этих каналов. Возможность подавления магнитоупругого эффекта светом оптического диапазона, обнаруженная в [6], свидетельствует о его электронной природе. Поэтому электронные состояния и точечных дефектов, и ядер дислокаций могут быть далекими от равновесных, а МП изменяет лишь кинетику их релаксации к равновесию. Примеры подобного влияния на кинетику электронных процессов хорошо известны из химии магниточувствительных реакций между радикалами [7].

Таким образом, роль внутренних напряжений в магнитоупругом эффекте, по-видимому, не сводится только к силовому влиянию на дислокации. Долгоживущие внутренние напряжения могут обеспечивать неравновесную заселенность точечных дефектов по энергетическим состояниям, что, в свою очередь, приводит к чувствительности подсистемы точечных дефектов к МП даже и в отсутствие в кристалле свежевведенных дислокаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Перекалина Т.М., Урусовская А.А. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 2. С. 467.
2. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Петржиц Е.А. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 10. С. 3001.
3. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е. // Изв. РАН (серия физическая). 1997. Т. 61. № 5. С. 965.
4. Пиеничнов Ю.П. Выявление тонкой структуры кристаллов. М.: Металлургия, 1974. 528 с.
5. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 58. № 3. С. 189.
6. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е., Бадыевич М.В., Дмитриевский А.А. // Вестн. ТГУ. Сер. Естеств. и технич. науки. Тамбов, 1997. Т. 2. № 1. С. 101.
7. Бучаченко А.Л., Сагдеев Р.З., Салихов К.З. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. Новосибирск, 1978. 350 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкомитета РФ по высшему образованию (грант № 95-0-7.1-58), а также Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 97-02-16074).

Поступила в редакцию 25 апреля 1997 г.