

## Влияние магнитных и электрических полей на состояние точечных дефектов в монокристаллах NaCl

© Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, А.В. Тютюнник, С.Е. Жуликов, Н.М. Афонина

Тамбовский государственный университет,  
392622 Тамбов, Россия

(Поступила в Редакцию 5 мая 1998 г.)

Установлено, что экспозиция кристаллов в импульсном электрическом поле с амплитудой  $\sim 10^3$  kV/m создает метастабильные состояния точечных дефектов, а магнитное поле с индукцией 7 Т вызывает их релаксацию.

В работах [1,2] было установлено, что одной из причин пластификации ионных кристаллов в слабом магнитном поле (МП) с индукцией  $B \sim 1$  Т может быть изменение состояния точечных дефектов в отсутствие свежевведенных дислокаций. Природа этих магниточувствительных центров (МЦ) в настоящее время неизвестна. Однако экспериментальные данные [3,4] позволяют предполагать, что они являются метастабильными долгоживущими комплексами, термодинамический потенциал которых может понижаться под действием МП, что в свою очередь отражается и на подвижности дислокаций. Эта гипотеза о необратимости изменений точечных дефектов в МП требует экспериментальной проверки.

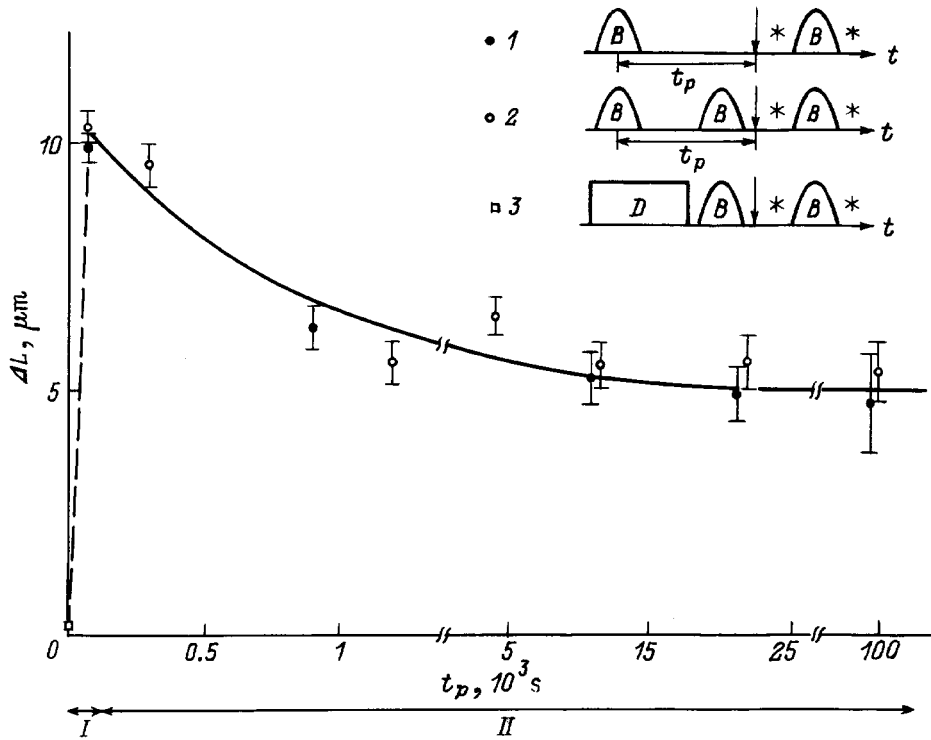
Кроме того, неясно, под действием каких факторов формируются эти метастабильные комплексы. Поскольку МЦ и отдельные дефекты, из которых они состоят, могут обладать зарядом, электрическим дипольным моментом или мультипольным моментом более высокого порядка, как и многие другие типы структурных дефектов в ионных кристаллах, представляется весьма вероятным, что внутренние нестационарные электрические поля, возникающие в процессе пластического деформирования ионных кристаллов [5], могут создавать "накачку" точечных дефектов в метастабильные состояния. Проверка этого предположения и установление зарядового состояния МЦ возможны в экспериментах, в которых кристаллы подвергаются воздействию не только МП, но и внешних электрических полей (ЭП). Первые опыты такого рода были осуществлены в [6,7], где было обнаружено, что совместное действие магнитного и электрического полей приводит к большей пластификации кристаллов, чем при их экспозиции в одном только ЭП или в МП. Как полагают авторы [6,7], роль ЭП в их экспериментах заключалась в силовом влиянии на заряженные дислокационные сегменты, в результате которого улучшаются условия для открепления дислокаций от локальных стопоров. В то же время в тех кристаллах, где точечные дефекты чувствительны к МП, может оказаться существенным, что и сами центры закрепления могут изменять свое состояние в ЭП путем переориентации [8], изменения степени агрегированности [9,10], ионизации [11] и другими способами.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании вопроса о возможном влиянии ЭП на состояние маг-

ниточувствительных точечных дефектов в отсутствие свежевведенных дислокаций, а также в установлении степени обратимости изменений, вносимых слабым МП в подсистему точечных дефектов.

Влияние ЭП и МП на состояние точечных дефектов исследовалось в номинально чистых монокристаллах, выдержанных в течение пяти суток при 700 К и охлажденных со средней скоростью 1–2 К/min, — NaCl(I), а также в кристаллах NaCl(II), которые отличались от NaCl(I) тем, что после термообработки были выдержаны в течение года при  $T = 293$  К. Свежие краевые дислокации вводились нанесением царапин на образец после его экспозиции в этих полях. Это исключало влияние ЭП и МП на сами дислокации и процесс их взаимодействия с точечными дефектами в этой фазе эксперимента. После введения дислокаций их смещение инициировалось одинаковым во всех опытах импульсом МП, имевшим форму одного полупериода синусоиды амплитудой 7 Т и длительностью  $10^{-2}$  s. Мерой изменения состояния точечных дефектов служила разность  $\Delta L = L_0 - L$  между пробегом дислокаций  $L_0$  в контрольных образцах, не подвергавшихся до введения дислокаций внешним воздействиям, и пробегом  $L$  в кристаллах, подвергавшихся предварительной экспозиции в ЭП и МП, включаемых в той или иной последовательности. Величины  $L_0$  и  $L$  определяли двойным химическим травлением, усредняя смещения 100–150 дислокаций для каждой точки на графиках. Для выяснения характера влияния МП и ЭП на эволюцию точечных дефектов проводились три серии экспериментов, отличавшихся набором и последовательностью процедур.

В первой серии опытов кристалл NaCl(I) обрабатывался импульсом МП, затем через время  $t_p$  в него вводились краевые дислокации и инициировалось их движение вторым (таким же как и первый) импульсом МП. Пробег дислокаций  $L$  в этом случае был меньше, чем пробег  $L_0$  в опытах, в которых кристалл не обрабатывался в МП до введения дислокаций. По мере увеличения паузы  $t_p$  между первым и вторым импульсом МП величина  $\Delta L = L_0 - L$  уменьшалась (рис. 1). Включение дополнительных импульсов МП непосредственно перед введением дислокаций не влияло на ход зависимости  $\Delta L(t_p)$  (рис. 1).



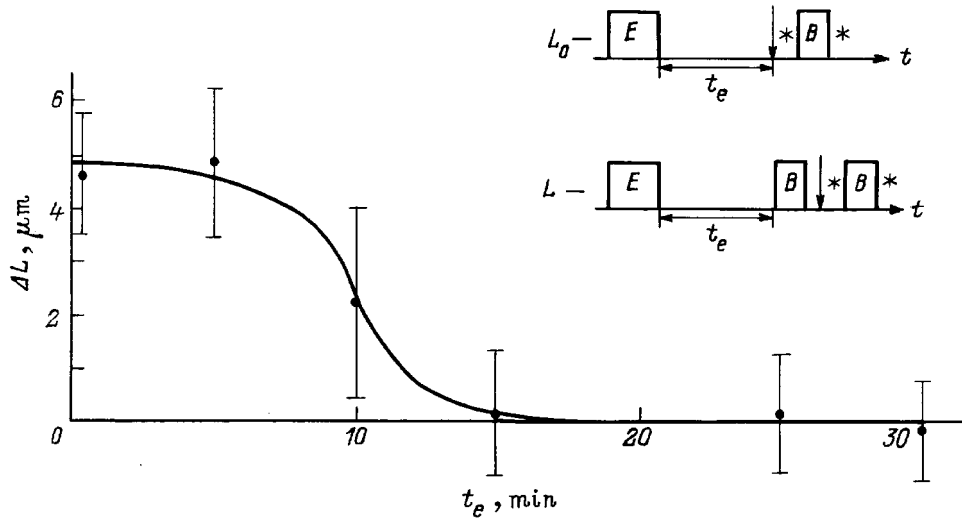
**Рис. 1.** Зависимость разности  $\Delta L = L_0 - L$  между средними пробегами дислокаций, инициированными импульсами МП в кристаллах NaCl(I), не подвергавшихся ( $L_0$ ) и подвергавшихся ( $L$ ) обработке в МП перед введением дислокаций, от длительности паузы  $t_p$  между первой обработкой кристаллов в МП и введением дислокаций (I); то же в условиях, когда перед введением дислокаций образец NaCl(I) подвергался действию дополнительного промежуточного импульса МП (2); величина  $\Delta L = L_0 - L$  в кристаллах NaCl(II) (3). I — первая стадия, II — вторая стадия. На врезке схематически изображены последовательности процедур в каждом типе опытов, в которых изучалось отклонение пробегов дислокаций от  $L_0$ . На схемах B — импульс МП, стрелка — введение дислокаций, звездочка — травление, D — старение.

В кристаллах NaCl(II)  $\Delta L$  была равна нулю при любом  $t_p$ , т.е. старение кристаллов приводило к потере чувствительности точечных дефектов к МП (рис. 1). Во второй серии опытов кристаллы NaCl(II) подвергались обработке в "сильном" импульсном ЭП (амплитуда  $\sim 3 \cdot 10^6$  V/m, длительность импульсов  $\sim 10 \mu s$ , средняя частота следования  $\sim 1$  kHz) в течение 15 min. Обнаружено, что после экспозиции кристаллов в ЭП значение  $\Delta L$ , измеренное тем же способом, что и в предыдущей серии опытов, отлично от нуля (рис. 2), т.е. под действием ЭП происходит сенсбилизация точечных дефектов к действию МП. Увеличение паузы между выдержкой кристаллов в ЭП и началом процедуры измерения  $\Delta L$  до 15 min приводит к исчезновению наведенной в ЭП чувствительности кристаллов к МП, т.е.  $\Delta L$  вновь становится равной нулю (рис. 2). Обработка кристаллов NaCl(II) в "слабом" синусоидальном ЭП с амплитудой  $\sim 10^5$  V/m не приводит к их сенсбилизации к МП.

В третьей серии опытов последовательность процедур и используемые образцы были теми же, что и в первой серии, за исключением того, что в паузе между первым импульсом МП и введением дислокаций кристаллы подвергались экспозиции в "слабом" синусоидальном ЭП (амплитудой  $\sim 10^5$  V/m и частотой 100 Hz) в течение

времени  $t_e$ . Обнаружено, что экспозиция кристаллов NaCl(I) в таком поле в паузе между двумя импульсами МП приводит к ускоренному (в  $\sim 10-100$  раз) восстановлению  $L$  (рис. 3).

Зависимость  $\Delta L(t_p)$ , полученная в первой серии опытов (рис. 1), отражает кинетику магнитостимулированных преобразований точечных дефектов, которую можно охарактеризовать двумя последовательными стадиями. Первая стадия протекает во время первого импульса МП, а ее результатом является снижение пробегов дислокаций, стимулированных вторым импульсом МП (рис. 1). В результате протекания второй стадии, которая реализуется уже после окончания первого импульса МП, пробеги дислокаций, вызванные действием повторного импульса МП, возрастают по мере увеличения паузы между импульсами МП. Анализ кинетики процесса, стимулированного МП в подсистеме точечных дефектов, показывает, что на первой стадии протекает мономолекулярная, а на второй — бимолекулярная реакция [12]. Это может означать, что на первой стадии происходит распад комплексов дефектов, а на второй — рекомбинация продуктов распада друг с другом или с другими точечными дефектами.

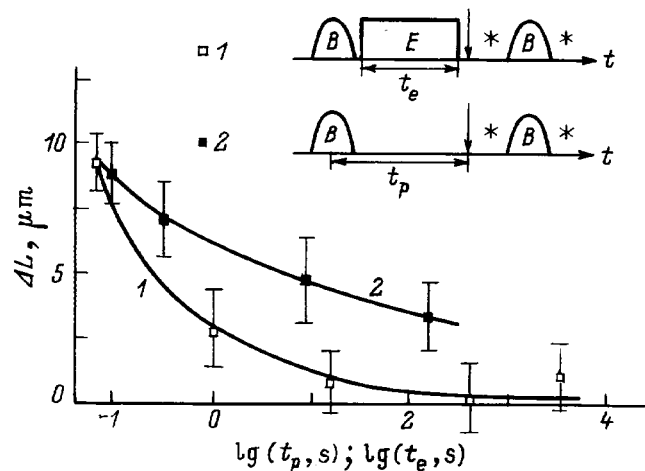


**Рис. 2.** Зависимость разности  $\Delta L = L_0 - L$  между средними пробегами дислокаций, инициированными импульсами МП в кристаллах NaCl(II), не подвергавшихся ( $L_0$ ) и подвергавшихся ( $L$ ) обработке в МП перед введением дислокаций, от длительности паузы  $t_e$  между предварительной экспозицией образцов в импульсном ЭП и процедурой измерения  $\Delta L$ . На врезке схематически изображены последовательности процедур в опытах, в которых определялись величины  $L$  и  $L_0$  в кристаллах, предварительно обработанных в "сильном" импульсном ЭП в течение 15 min. Обозначения те же, что на рис. 1;  $E$  — экспозиция в ЭП.

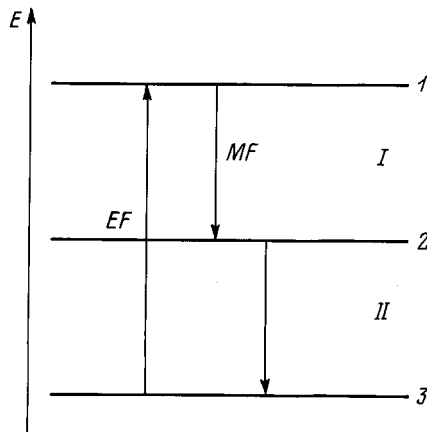
Нечувствительность зависимости  $\Delta L(t_p)$  к включению дополнительных импульсов МП на второй стадии означает, что 1) первый импульс МП изменяет состояние точечных дефектов необратимо; 2) импульс МП, с помощью которого инициировалось смещение дислокаций, не приводит к дополнительным изменениям состояний точечных дефектов по сравнению с теми, которые были достигнуты во время первого импульса. Следовательно, одной из причин изменения пластических свойств кристаллов NaCl(I) в МП является его влияние на скорость релаксации метастабильных точечных дефектов. Поскольку пробег дислокаций в МП и после релаксации МЦ не равен нулю, другой причиной, вероятно, следует считать влияние поля на процесс открепления дислокаций от стопоров, впервые обнаруженное в [13]. В кристаллах NaCl(II) эта причина пластификации, возможно, является единственной, как и в [12]. Наложением двух каналов влияния МП на подвижность дислокаций в кристаллах NaCl(I), по видимому, и объясняется ее сложный многостадийный характер.

На первый взгляд "самопроизвольное" восстановление пробегов дислокаций с увеличением паузы между импульсами МП (рис. 1) кажется противоречащим предположению о необратимости изменения состояний МЦ. Однако в процессе введения дислокаций они приобретают заряд и могут создавать электрические поля, "очувствляющие" точечные дефекты к действию МП, т.е. сенсбилизация кристалла к МП может происходить не самопроизвольно, а под действием внешнего возмущения. Это предположение подтверждается результатами второй серии опытов (рис. 2), которые свидетельствуют о

том, что ЭП способно осуществлять "накачку" точечных дефектов в метастабильные состояния, чувствительные к МП. Это позволяет предполагать существенную роль электрических полей, возникающих при введении дислокаций, в формировании чувствительности пластических свойств кристаллов к МП.



**Рис. 3.** Зависимость разности  $\Delta L = L_0 - L$  между средними пробегами дислокаций, инициированными импульсами МП в кристаллах NaCl(I), не подвергавшихся ( $L_0$ ) и подвергавшихся ( $L$ ) обработке в МП перед введением дислокаций, от длительности экспозиции образцов  $t_e$  в "слабом" синусоидальном ЭП в паузе между первой обработкой в МП и введением дислокаций (1); зависимость  $\Delta L$  от длительности паузы  $t_p$  между первой обработкой в МП и введением дислокаций в условиях, когда ЭП в паузе отсутствовало (2). Обозначения на врезке те же, что на рис. 1.



**Рис. 4.** Схематическое изображение энергетических уровней подсистемы магниточувствительных точечных дефектов и переходов между ними, вызываемых действием ЭП или МП. Цифрами обозначены номера уровней, стрелками показаны переходы. I — первая стадия, II — вторая стадия.

Обобщая полученные результаты, можно предложить следующую термодинамическую схему, описывающую переходы между уровнями энергии подсистемы точечных дефектов, изменение состояния которых при переходах может заключаться в диссоциации, рекомбинации или внутрицентровых преобразованиях. В результате протекания двух стадий МЦ из исходного магнито чувствительного состояния I (рис. 4) переходят в более низкие по энергии состояния: сначала в состояние 2, при котором подвижность дислокаций в МП уменьшается, а затем в еще более низкое по энергии состояние 3, при котором подвижность дислокаций снова возрастает до уровня, несколько меньшего, чем в состоянии I. Процедура введения дислокаций (или экспозиция кристаллов в сильном ЭП), по-видимому, способствует переходу типа  $3 \rightarrow I$ , частично возвращая точечные дефекты в магнито чувствительное состояние. Если принять, что процедура введения дислокаций не влияет на точечные дефекты, пребывающие в состоянии 2, необходимость паузы  $t_p$  для восстановления чувствительности пробегов дислокаций к МП (рис. 1) можно объяснить ожиданием перехода дефектов в состояние 3. О том, что точечные дефекты не могут быть сенсibilизированы к МП при введении дислокаций, если они не находятся в определенном состоянии, подобном 3, косвенно свидетельствуют также опыты, проведенные в [4], где было установлено, что наиболее ярко разупрочнение кристаллов в МП при их макропластическом деформировании проявляется в закаленных кристаллах.

В настоящей работе чувствительность точечных дефектов к МП обнаруживается после термообработки кристаллов при 700 К, а последующее старение при 293 К ведет к исчезновению влияния МП на точечные дефекты, что также подтверждает изложенные выше соображения. Отметим, что механизм возбуждения и тип формирующихся МЦ при термообработке и экспозиции

в ЭП могут быть различными, поскольку времена релаксации наведенных метастабильных состояний в этих случаях (1 год и 15 минут соответственно) отличаются на много порядков.

Развитая выше термодинамическая схема позволяет предполагать, что в третьей серии опытов было обнаружено влияние слабого ЭП на кинетику протекания второй (рекомбинационной) стадии релаксационного процесса, стимулированного МП в подсистеме точечных дефектов. Увеличение скорости сенсibilизации кристалла к МП в слабом ЭП (рис. 3) в принципе может объясняться двумя способами: ускорением перехода типа  $2 \rightarrow 3$  или "накачкой" точечных дефектов из состояния 2 в состояние I (рис. 4). Последнее представляется маловероятным, так как при напряженности ЭП, используемого в третьей серии опытов,  $E \sim 10^5$  V/m энергия, сообщаемая полем точечным дефектам при их переориентации, диссоциации, ионизации и других известных способах возбуждения, оказывается на несколько порядков меньше средней энергии термических флуктуаций. В то же время известно, что слабое ЭП способно стимулировать релаксационные процессы в подсистеме точечных дефектов: агрегирование примесно-вакансионных диполей в комплексы [9,10], облегченную диффузию [14], переориентацию и диссоциацию примесно-вакансионных компонентов при совпадении частоты внешнего поля с частотой собственных термоактивированных перескоков комплексов в эквивалентные по энергии положения [8] и др.

Конкретный механизм влияния слабых и сильных ЭП на точечные дефекты пока не ясен, однако полученные результаты позволяют предложить простую феноменологическую схему процессов, происходящих в кристалле при их макропластическом деформировании в МП [15,16]. В процессе движения заряженных краевых дислокаций вокруг них создается изменяющееся ЭП, которое поддерживает точечные дефекты вокруг дислокации в метастабильном состоянии. Известно, что эффективность преодоления точечных стопоров дислокацией зависит от состояния, в котором они находятся [17]. Включение МП приводит к релаксации метастабильных состояний, наведенных электрическим полем движущихся дислокаций, и, следовательно, к изменению эффективности торможения дислокаций точечными дефектами. Корреляция между зарядом дислокаций и величиной эффекта разупрочнения кристаллов в постоянном МП, обнаруженная в [15], подтверждает эту точку зрения.

Таким образом установлено, что МП способствует релаксации метастабильных точечных дефектов. Такие дефекты могут образовываться в результате термической обработки или под действием импульсного электрического поля. Это проясняет механизмы создания неравновесности, необходимой для чувствительности точечных дефектов к МП, и позволяет предполагать, что исследуемые МЦ и продукты их релаксации обладают нескомпенсированным зарядом или дипольным моментом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 97-02-16074).

## Список литературы

- [1] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. Письма в ЖЭТФ **58**, 3, 189 (1993).
- [2] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, С.Е. Жуликов, Д.Ю. Головин. ФТТ **38**, 10, 3047 (1996).
- [3] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов. ФТТ **39**, 11, 2016 (1997).
- [4] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов. Изв. вузов. Физика, **4**, 117 (1998).
- [5] R.W. Whitworth. Adv. Phys. **24**, 2, 203 (1975).
- [6] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик. ФТТ **38**, 8, 2426 (1996).
- [7] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, O.L. Kazakova, E.Yu. Mikhina, E.A. Petrzhik. J. Alloys Compounds **211/212**, 548 (1994).
- [8] D.W. Dreyfus, R.B. Laibowitz. Phys. Rev. **115**, 5A, 1413 (1964).
- [9] О.К. Царев, А.Н. Нарожный, Л.Б. Зуев, С.А. Дацук. Пробл. прочности **32**, 1, 111 (1977).
- [10] Л.Б. Зуев. Физика электропластичности щелочно-галлоидных кристаллов. Наука, Новосибирск (1990). 120 с.
- [11] J. Frenkel. Phys. Rev. **54**, 647 (1938).
- [12] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, С.Е. Жуликов, В.А. Киперман, Д.В. Лопатин. ФТТ **39**, 4, 634 (1997).
- [13] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 2, 467 (1987).
- [14] Б.А. Зон. Изв. вузов. Физика **33**, 11, 131 (1974).
- [15] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. Письма в ЖЭТФ **61**, 7, 583 (1995).
- [16] А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауер. Письма в ЖЭТФ **65**, 6, 471 (1997).
- [17] C. Zaldo, J. Garcia Sole, F. Agullo-Lopez. J. Mater. Sci. **17**, 1465 (1982).