

Движение дислокаций в кристаллах NaCl при комбинированном воздействии механических и электромагнитных импульсов, создаваемых электронным пучком

© В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.А. Легеньков, В.А. Морозов*

Институт кристаллографии Российской академии наук,
117333 Москва, Россия

* Санкт-Петербургский государственный университет,
198904 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: alshits@mechan.incr.msk.su

E-mail: vaa@math.spbu.ru

(Поступила в окончательном виде 14 апреля 1999 г.)

Изучено влияние импульсного электромагнитного поля на подвижность краевых дислокаций в кристаллах NaCl при механическом нагружении посредством электронного пучка. Показано, что учет этого влияния снимает расхождение в определении коэффициента динамического торможения дислокаций двумя методами: посредством электронного пучка и механического ударного нагружения.

В процессе исследования подвижности краевых дислокаций в кристаллах LiF и NaCl при механическом импульсном нагружении, создаваемом электронным пучком [1], было обнаружено, что коэффициент динамического торможения B для кристаллов NaCl в 4.5 раза меньше, чем в опытах, использующих механическое ударное нагружение [2]. В то же время коэффициент торможения B для LiF в пределах ошибки эксперимента согласовывался с ударными экспериментами.

Изучение природы такого расхождения привело к обнаружению перемещения дислокаций в кристаллах NaCl под действием импульсного магнитного поля. Указание на этот факт содержится в работе [3]. Естественно было предположить, что в экспериментах [1], относящихся к кристаллам NaCl, дислокации двигались не только под действием механических сил, вызванных взаимодействием электронного пучка с мишенью, но и за счет собственного электромагнитного поля пучка.

В настоящей работе проведено экспериментальное разделение указанных двух эффектов и показана их адди-

тивность. В результате динамическая компонента пробегов дислокаций за время их надбарьерного движения под действием короткого механического импульса высокой амплитуды приводит к коэффициенту торможения B , совпадающему с значением, ранее измеренным в рамках принципиально другой методики [2]. Значительно больший интерес представляет измеренная независимо компонента дислокационных пробегов, индуцированная импульсом электромагнитного облучения образца. Последняя связывается с последующей достаточно медленной релаксацией дислокационной структуры в результате понижения локальных примесных барьеров в объеме кристалла, происходящего вследствие резонансных спин-зависимых переходов по механизму, описанному в работе [4].

Для измерения импульсного магнитного поля пучка электронов и перемещения дислокаций использовалась схема опытов, проводившихся в [1] (рис. 1). В экспериментах по исследованию движения дислокаций образец

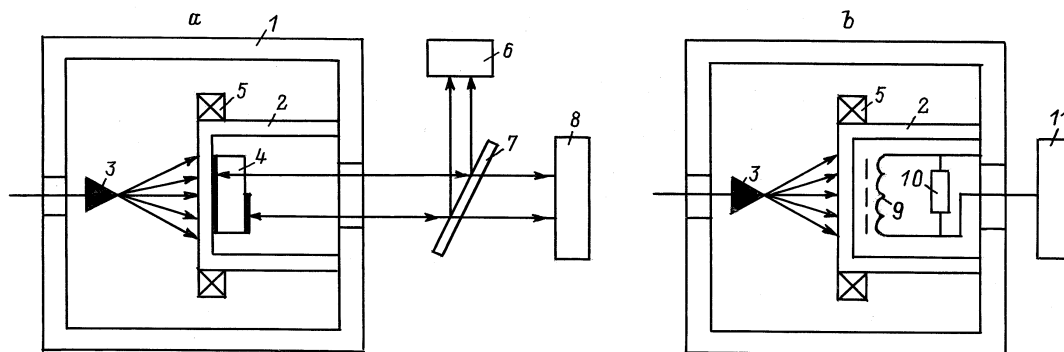


Рис. 1. Схема проведения экспериментов: *a* — при воздействии механического и магнитного импульсов на кристалл, *b* — при измерении индукции электромагнитного поля. 1 — ускоритель электронов, 2 — камера, 3 — источник электронного пучка, 4 — образец, 5 — измеритель тока пучка, 6 — фотоэлектронный умножитель, 7 — полупрозрачное зеркало, 8 — He-Ne-лазер, 9 — измерительная катушка, 10 — сопротивление нагрузки 50Ω , 11 — осциллограф.

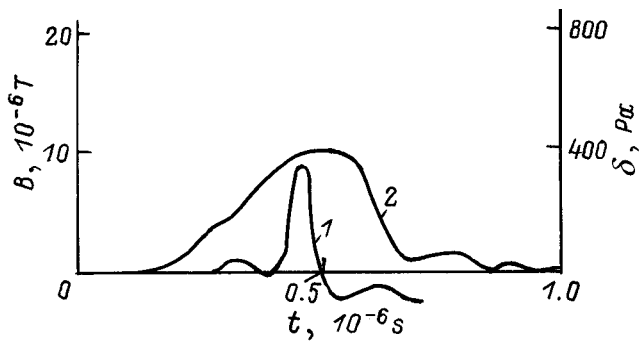


Рис. 2. Осциллограммы механического импульса и импульса индукции электромагнитного поля.

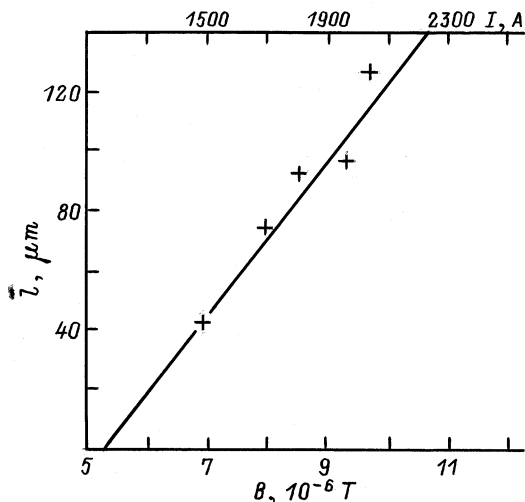


Рис. 3. Зависимость средней длины пробега дислокаций l в кристаллах NaCl от индукции электромагнитного поля B и тока пучка электронов I .

находился в камере из диамагнитного материала (Al) и тем самым обеспечивалась возможность воздействия на него магнитного поля. Механический импульс возбуждался электронным пучком в алюминиевой пластинке, служившей передней стенкой камеры, и далее передавался в образец. Акустический контакт образца с пластинкой осуществлялся за счет тонкого слоя силиконового масла. При устранении акустического контакта пластинки с образцом обеспечивались условия для изучения воздействия на кристалл только электромагнитного поля. При этом в контрольных экспериментах, когда образец помещался в камеру из ферромагнитного материала, движение дислокаций не фиксировалось. Была предусмотрена также возможность воздействия на образец только механического импульса. В этом случае кристалл находился в стальной камере, передняя стенка которой облучалась электронным пучком и служила генератором механического импульса, передаваемого в образец. Длительность такого импульса в процессе проведения опытов изменялась в небольших пределах и составляла

$\sim 5 \cdot 10^{-8}$ s (кривая 1 на рис. 2). При этом амплитуда импульса за счет варьирования тока электронного пучка изменялась примерно в 1.5 раза.

Для измерения магнитного поля в камере, где ранее помещался образец из NaCl, располагалась измерительная катушка с ферритовым сердечником. Катушка была нагружена на сопротивление 50 Ω . Сигнал с нее подавался на высокочастотный осциллограф С1-75 и далее фотографировался. Осциллограмма приведена на рис. 2 (кривая 2). Для определения величины индукции поля производилась калибровка катушки. При этом калибровочные импульсы напряжения длительностью 100 ns пропускались по коаксиальной линии, нагруженной на волновое сопротивление. Катушка помещалась на фиксированном расстоянии от центрального провода линии, где и измерялось индуцированное в ней напряжение. Таким способом устанавливалась зависимость напряжения в катушке от индукции поля $U = f(B)$. В экспериментах по исследованию движения дислокаций ток пучка контролировался, поэтому была известна магнитная составляющая индукции поля: $B = kI$, где $k = 4.5 \cdot 10^{-9}$ и все величины предполагаются выраженными в системе СИ. В условиях наших экспериментов магнитная индукция изменялась в пределах $B = (7-11)10^{-6}$ T.

На рис. 3 представлена зависимость длины среднего пробега дислокаций в кристаллах NaCl от индукции магнитного поля и тока электронного пучка в отсутствие механического воздействия. Ширина импульса магнитной индукции определялась длительностью тока пучка и была $\sim 30 \cdot 10^{-8}$ s (кривая 2 на рис. 2), что существенно больше длительности механического импульса нагружения. Такая разница в длительностях этих импульсов, действовавших на образец NaCl в пределах одной экспозиции, определяется спецификой механизма образования механического импульса [1].

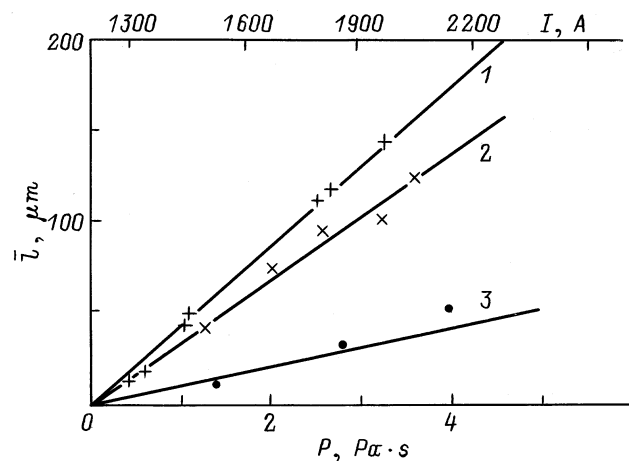


Рис. 4. Средняя длина пробега дислокаций l в кристаллах NaCl в функции от импульса давления механического поля и тока электронного пучка. 1 — при суммарном воздействии механического и магнитного импульсов; 2 — при воздействии импульсов электромагнитного поля; 3 — при воздействии механических импульсов давления.

Полученные экспериментальные данные по движению краевых дислокаций в кристаллах NaCl под действием импульсного электромагнитного поля могут быть использованы для интерпретации результатов, полученных ранее в работе [1]. В этом исследовании при каждом акте воздействия электронного пучка на образец фиксировался ток электронов, поэтому нетрудно было найти средние длины пробегов дислокаций, которые в [1] определялись только электромагнитным полем (прямая 2 на рис. 4). На рис. 4 (прямая 1) приведена взятая из [1] зависимость длин пробегов дислокаций в кристаллах NaCl при суммарном воздействии импульсов механического и электромагнитного полей в функции от импульса давления механического поля. Вычитая из суммарных длин пробегов для каждого опыта те пробеги, которые обязаны электромагнитному полю, получаем зависимость длин пробегов от механических импульсов давления (прямая 3 на рис. 4). Точками на этой зависимости показаны экспериментальные данные только по механическому воздействию. Тот факт, что они хорошо ложатся на прямую 3, указывает на аддитивность двух эффектов: механического и электромагнитного. Вычисленный по зависимости 3 (рис. 4) коэффициент динамического торможения краевых дислокаций B оказался равным $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ Р, что в пределах ошибки эксперимента согласуется с данными по динамическому нагружению материалов механическими способами. Тем самым снимается парадокс, отмеченный в [1].

Впрочем, значительно более принципиальной и куда менее тривиальной представляется физическая интерпретация наблюдаемого движения дислокаций, стимулированного электромагнитной "накачкой". Фактически указанная компонента дислокационной подвижности была обнаружена авторами еще в 1986 г. Эти данные, стимулировавшие последующие исследования магнитопластического эффекта, упомянуты в работе [3], но отдельно не публиковались, поскольку авторы не смогли предложить хоть какую-нибудь физическую гипотезу, объясняющую столь сильное влияние таких слабых вихревых магнитных полей. Между тем, в недавней работе [4] было обнаружено резонансное влияние СВЧ поля на подвижность дислокаций в кристаллах NaCl, помещенных в постоянное магнитное поле. Условие резонанса фактически совпадает с условием наблюдения ЭПР сигнала, сводящегося к равенству энергии $h\nu$ кванта СВЧ поля величине зеемановского расщепления уровней $g\mu_B V$, где g — фактор Ланде, μ_B — магнетон Бора. Возможно, в наших экспериментах 1985–1986 гг. мы имели дело с тем же самым эффектом, причем роль постоянного поля играло поле Земли $B_3 \approx 5 \cdot 10^{-5}$ Т, а СВЧ поле с характерной частотой $\nu_0 \sim 1$ МГц создавалось электронным пучком (рис. 2). Нетрудно убедиться, что в наших условиях также выполнялось условие резонанса $h\nu_0 \approx g\mu_B B_3$. В свете результатов систематического исследования [4] предлагаемая версия представляется не слишком экстравагантной и, по-видимому, имеет право на существование.

Предполагается, что вслед за резонансным спиновым переходом снимается квантовый запрет на определенный электронный переход в примесном центре на дислокации или в объеме кристалла, что приводит к понижению локальных барьеров и порождает релаксацию дислокационной структуры в поле внутренних напряжений.

Следует иметь в виду, что при типичных скоростях релаксационного движения дислокаций в несколько $\mu\text{m}/\text{s}$ время, необходимое для перемещения на расстояния порядка $100 \mu\text{m}$, составляет несколько минут. Это значит, что дислокации движутся спустя длительное время после импульса, что свидетельствует о воздействии электромагнитного импульса непосредственно на точечные дефекты в объеме кристалла, как это имеет место и в опытах [4]. Линейный рост этой компоненты пробега с током отражает, по-видимому, увеличение вероятности соответствующего перехода на данном примесном центре с повышением интенсивности электромагнитной накачки кристалла.

Авторы признательны Б.И. Смирнову за ценные замечания и полезные обсуждения результатов работы, В.П. Киселю и В.М. Чернову за помощь в подготовке образцов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 97-02-16327).

Список литературы

- [1] Е.В. Даринская, И.П. Макаревич, Ю.И. Мещеряков, В.А. Морозов, А.А. Урусовская. ФТТ **24**, 5, 1564 (1982).
- [2] Е.В. Даринская, А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, Ю.И. Мещеряков, В.А. Алехин, Р. Воска. ФТТ **25**, 3536 (1983).
- [3] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 467 (1987).
- [4] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов, С.Е. Жуликов, А.А. Дмитриевский. Письма в ЖЭТФ **68**, 5, 400 (1998).