

© 1993

МАГНИТОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КРИСТАЛЛАХ NaCl, LiF и Al В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В. И. Альшиц, Р. Воска, Е. В. Даринская, Е. А. Петржик

Проведено экспериментальное исследование магнитоэластического эффекта в переменном магнитном поле на кристаллах NaCl с различной концентрацией примесей, LiF и Al. Обнаружена критическая частота ν_0 , выше которой эффект исчезает. Показано, что во всех случаях $\nu_0 \propto B^2$. На кристаллах NaCl измерения проводились при комнатной температуре и при температуре жидкого азота. Величина ν_0 не проявляет зависимости ни от температуры, ни от концентрации примеси (Ca). На кристаллах LiF найдено, что критическая частота ν_0 для винтовых дислокаций примерно в три раза выше, чем для краевых. Предложена интерпретация частоты ν_0 как меры вероятности спин-зависимого перехода в магнитном поле в системе парамагнитная примесь—дислокационное ядро.

В работах [1–5] подробно исследовался магнитоэластический эффект в ЦГК и немагнитных металлах (Zn и Al), заключающийся в перемещении дислокаций под действием постоянного магнитного поля. Было обнаружено, что средний пробег дислокаций пропорционален времени «магнитной обработки» ($\bar{l} \propto t$), квадрату магнитной индукции ($\bar{l} \propto B^2$) и обратному корню из концентрации парамагнитной примеси ($\bar{l} \propto 1/\sqrt{C}$). Кроме того, эффект обладает слабой чувствительностью к температуре (при $T = 4.2$ и $T = 77$ К пробеги примерно одинаковы, а при $T = 300$ К — больше на 10–30%) и отсутствует в кристаллах, в которых преобладают диамагнитные примеси (NaCl (Pb), NaCl (Cu)).

Одна из версий [4] связывает физическую природу эффекта с откреплением дислокаций от парамагнитных центров под действием магнитного поля в результате спин-зависимых переходов в системе примесь—ядро дислокации с последующим движением дислокаций в поле дальнедействующих внутренних напряжений в кристалле. В рамках этой модели происходит не преодоление локальных барьеров, а их разрушение за некоторое характерное время τ (или с вероятностью $W \approx 1/\tau$) с результирующим продвижением дислокаций до следующего парамагнитного центра, т. е. на расстояние $\sim 1/\sqrt{C}$. Скорость дислокации в этой схеме должна определяться величиной $v \sim W/\sqrt{C}$, где вероятность W должна быть пропорциональна B^2 и обладать слабой температурной зависимостью. Если этот процесс лимитируется синглет-триплетными переходами радикальной пары в системе примесь—дислокация (например, поперечной релаксацией [6, 7], приводящей к зависимости $W \propto B^2$), то следует ожидать специфического поведения магнитоэластического эффекта в переменном магнитном поле (по крайней мере в поле переменной ориентации). При малых частотах ($\nu\tau \ll 1$) все должно быть как в постоянном поле (с точностью до ориентационной зависимости эффекта), а при высоких частотах ($\nu\tau \gg 1$), напротив, эффект должен исчезать. Причем пороговая частота ν_0 исчезновения эффекта фактически имеет смысл вероятности W .

Именно такое поведение магнитоэластического эффекта в переменном поле, создаваемом вращением образца в постоянном магнитном поле, наблюдалось [4]

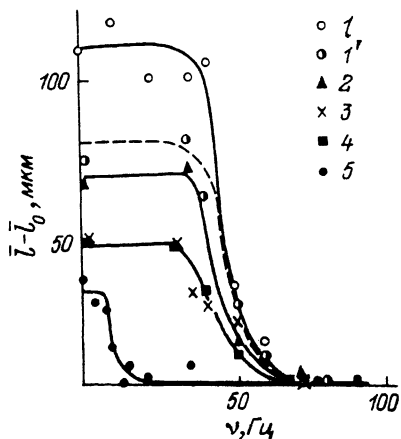


Рис. 1. Зависимость средней длины пробега дислокаций \bar{l} в магнитном поле от частоты ν вращения кристаллов NaCl.

1 — $B = 0.5$ Т, $T = 293$ К [4]; 1' — $B = 0.5$ Т, $T = 77$ К; 2 — NaCl (Ca), $c = 1$ ppm, $B = 0.5$ Т, $T = 293$ К; 3 — NaCl (Ca), $C = 10$ ppm, $B = 0.5$ Т, $T = 293$ К; 4 — NaCl (Li), $C = 100$ ppm, $B = 0.5$ Т, $T = 293$ К; 5 — $B = 0.3$ Т, $T = 293$ К [4]. \bar{l}_0 — средний пробег дислокаций при вращении образца без приложения магнитного поля.

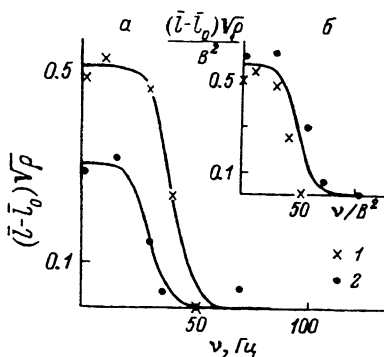


Рис. 2. Зависимость среднего пробега дислокаций \bar{l} от частоты ν вращения образца алюминия в магнитном поле для различных величин поля (а) и зависимости a в нормированных координатах (б).

$B = 1$ (1), 0.7 Т (2). \bar{l}_0 — средний пробег дислокаций при вращении образца без приложения магнитного поля.

на кристаллах NaCl. В частности, было показано, что $\nu_0 \propto B^2$. Если действительно $\nu_0 \approx W$, то наряду с этим должна наблюдаться независимость пороговой частоты ν_0 от температуры и концентрации примеси, а также возможная чувствительность этой величины к типу примеси и структуре ядра дислокации. Экспериментальной проверке этих предположений и посвящена эта работа.

Исследования проводились при комнатной и азотной температурах. Изучались кристаллы NaCl [2] с примесью кальция (1 ppm и 10 ppm) и лития (100 ppm), LiF (общее содержание примесей менее 10^{-3} вес.%) и монокристаллы Al [5]. Пробеги фиксировались методом избирательного травления. Частота ν вращения образцов задавалась источником тока и определялась часовым тахометром. Использовались частоты от 4 до 70 Гц и поля B от 0.3 до 1 Т. Были также проведены контрольные измерения по вращению кристаллов без приложения магнитного поля.

На рис. 1 показана зависимость средней длины пробега дислокаций от частоты вращения кристаллов NaCl (Ca) и NaCl (Li) в магнитном поле при комнатной температуре. Видно, что при низких частотах средний пробег дислокаций постояен и не отличается от пробега в постоянном магнитном поле [2]. При достижении критической частоты ν_0 происходит резкое уменьшение средней длины пробега до уровня пробега при вращении без магнитного поля \bar{l}_0 . Оказалось, что в пределах ошибки эксперимента критическая частота ν_0 не зависит ни от времени вращения образцов в магнитном поле, ни от концентрации парамагнитной примеси. Кроме того, ν_0 не изменяется при понижении температуры до жидкого азота (рис. 1).

Исследования парамагнитных монокристаллов Al показали, что движение дислокаций в переменном магнитном поле в металле аналогично движению в диамагнитном NaCl [4]. Зависимости $\bar{l}(\nu)$ имеют тот же характер — магнитоупругий эффект при низких частотах не меняется по сравнению со статическим случаем, а при $\nu > \nu_0$ исчезает, причем критическая частота ν_0 пропорциональна квадрату магнитной индукции (рис. 2). Аналогичная картина

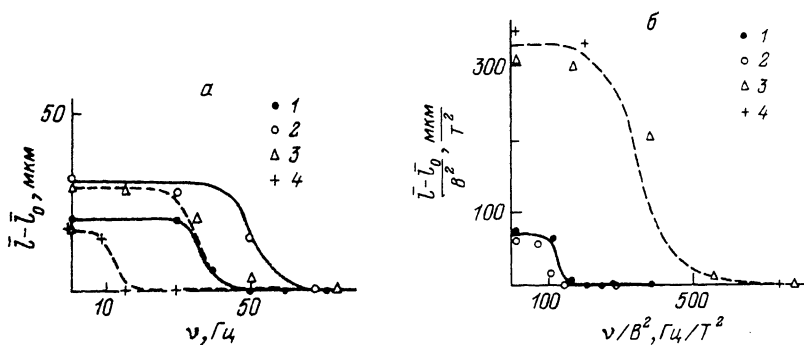


Рис. 3. Зависимость среднего пробега дислокаций \bar{l} от частоты ν вращения образца LiF в магнитном поле для различных величин поля и типа дислокаций (а) и зависимость \bar{l} в нормальных координатах (б).

1, 2 — краевые дислокации; 3, 4 — винтовые дислокации. $B = 0.5$ (1), 0.7 (2), 0.3 (3), 0.2 Т (4).

наблюдается для винтовых и краевых дислокаций в кристаллах LiF (рис. 3). Однако величина критической частоты ν_0 для винтовых дислокаций при прочих равных условиях оказалась выше, чем для краевых примерно в три раза, что, по-видимому, связано со структурой ядра дислокаций. Естественно было бы ожидать и различия величины ν_0 в зависимости от типа парамагнитной примеси. С этой точки зрения, совпадение в пределах ошибки измерений значений ν_0 для NaCl (Ca) и NaCl (Li) может оказаться случайным, а не общим результатом, но для разрешения этого вопроса потребуются новые эксперименты на кристаллах с другим набором парамагнитных примесей.

Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствуют в пользу приведенной выше гипотезы о спин-зависимой природе магнитоэластического эффекта. Если она соответствует действительности, то в наших руках изложенный в этой статье метод прямого измерения вероятности спиновых переходов в магнитном поле в системе парамагнитный центр—дислокация.

В заключение авторы выражают благодарность В. Л. Инденбому и Б. И. Гречушникову за полезное обсуждение полученных результатов, В. С. Боброву за предоставление монокристаллов Al, Л. М. Соيفеру за предоставление кристаллов LiF, В. М. Чернову и В. П. Киселю за помощь в работе.

Список литературы

- [1] Альшиц В. И., Даринская Е. В., Перекалина Т. М., Урусовская А. А. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 2. С. 467—471.
- [2] Альшиц В. И., Даринская Е. В., Петржик Е. А. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1990. № 10. С. 85—87.
- [3] Альшиц В. И., Даринская Е. В., Гектина И. В., Лаврентьев Ф. Ф. // Кристаллография. 1990. Т. 35. № 4. С. 1014—1016.
- [4] Альшиц В. И., Даринская Е. В., Петржик Е. А. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 10. С. 3001—3009.
- [5] Альшиц В. И., Даринская Е. В., Петржик Е. А. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 1. С. 155—158.
- [6] Бучаченко А. А., Сагдеев Р. З., Салихов К. З. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. Новосибирск, 1978.
- [7] Керрингтон А., Мак-Лечлан Э. Магнитный резонанс и его применение в химии. М., 1970. 447 с.

Институт кристаллографии
РАН
Москва

Поступило в Редакцию
15 июля 1992 г.