

УДК 539.37 : 539.29

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КРИСТАЛЛАХ KCl

А. Н. Куличенко, С. В. Криштопов, Б. И. Смирнов

Исследовалось влияние напряженности внешнего электрического поля E на величину прямого электропластического эффекта (ЭПЭ) $\Delta\tau$ в кристаллах KCl и KCl : Ba. Установлено, что в чистых KCl зависимость $\Delta\tau(E)$ носит нелинейный характер во всем исследованном интервале полей (3—15) МВ/м. В кристаллах KCl : Ba наблюдается линейная зависимость $\Delta\tau(E)$, но только до некоторого критического значения E , после чего происходит отклонение $\Delta\tau(E)$ от линейной в сторону больших $\Delta\tau$. Показано, что при рассмотрении физической природы ЭПЭ в ШГК нельзя ограничиваться воздействием внешнего электрического поля на подвижные дислокации, а следует учитывать возможность движения или распада в сильных электрических полях краевых дислокационных диполей.

К настоящему времени известно [1-3], что внешнее электрическое поле может оказывать существенное влияние на напряжения пластического течения щелочно-галогидных кристаллов (прямой ЭПЭ). Согласно наиболее общепринятой модели, прямой ЭПЭ является результатом непосредственного электростатического взаимодействия внешнего электрического поля с подвижными заряженными краевыми дислокациями [4, 5]. В то же время имеются и альтернативные точки зрения [1, 6, 7]. По-видимому, существенный вклад в понимание физической природы ЭПЭ могли бы внести количественные данные о зависимости ЭПЭ от напряженности прикладываемого электрического поля E , однако систематических исследований влияния напряженности электрического поля на величину эффекта до сих пор не проводилось. В связи с этим в настоящей работе изучался прямой электропластический эффект на чистых и на легированных барием кристаллах KCl в широком интервале электрических полей.

1. Экспериментальная методика

Используемые в работе кристаллы выращивались методом Киропулоса на воздухе. Легирующая примесь вводилась в расплав в виде соли BaCl₂. В работе исследовалось два кристалла: исходный чистый KCl (предел текучести $\tau_y = 0.5$ МПа) и KCl с добавкой $7 \cdot 10^{-4}$ ат. % бария¹ ($\tau_y = 1.5$ МПа).

Рабочие образцы выкалывались по плоскостям спайности и имели размеры $2.5 \times 7 \times 10$ мм соответственно в направлениях [100], [010] и [001]. После приготовления образцы закаливались на воздухе с температуры 800 К. В закаленных кристаллах скопления примесей не успевают образовываться и большинство комплексов Me²⁺—вакансия остаются в диспергированном состоянии [9].

Методика исследования ЭПЭ была аналогична описанной в [10]. Деформирование образцов осуществлялось сжатием вдоль [001] с постоян-

¹ Концентрация примеси в твердом состоянии определялась по ее содержанию в исходном расплаве и по известному коэффициенту распределения примеси между расплавом и кристаллом [9].

ной скоростью, равной $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Электрическое поле прикладывалось вдоль направления [100]. Напряженность электрического поля E варьировалась в пределах (3—15) МВ/м.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

В более ранних работах [2, 3, 10] было показано, что величина ЭПЭ $\Delta\tau$ (значение, на которое снижаются напряжения течения τ в момент включения поля E) является немонотонной функцией деформации ϵ и напряжений течения τ . Поэтому при изучении влияния величины поля E на ЭПЭ для каждого кристалла были получены серии зависимостей $\Delta\tau$ (τ), где τ — напряжения течения в момент включения внешнего поля, снятые при разных значениях E . На рис. 1 приведены такие зависимости для чистого кристалла КСl. Видно, что при разных значениях E зависимости $\Delta\tau$ (τ) качественно сохраняют свой вид. Однако при увеличении E максимальное значение $\Delta\tau_{\text{max}}$ на кривых $\Delta\tau$ (τ) растет, а положение максимума

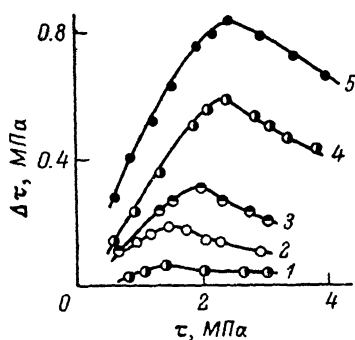


Рис. 1. Зависимости величины ЭПЭ $\Delta\tau$ от напряжений течения τ в момент включения электрического поля E для кристалла КСl при разных значениях E .
 E , МВ/м: 1 — 3.0, 2 — 5.5, 3 — 7.0, 4 — 10, 5 — 12.

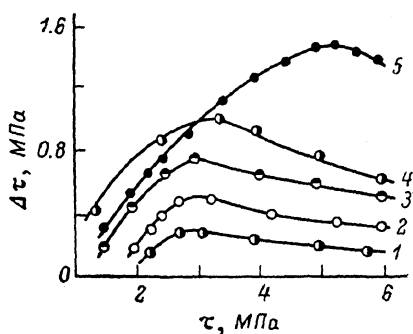


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для кристалла $\text{KCl} + 7 \cdot 10^{-4} \text{ ат.} \% \text{ Ba}^{2+}$.
 E , МВ/м: 1 — 3.0, 2 — 5.1, 3 — 7.5, 4 — 10, 5 — 12.

сдвигается в область больших напряжений. Аналогичные зависимости были получены и для кристалла $\text{KCl} + 7 \cdot 10^{-4} \text{ ат.} \% \text{ Ba}^{2+}$ (рис. 2), но здесь максимумы кривых $\Delta\tau$ (τ) при небольших E находятся примерно при одном и том же значении τ . Однако при достижении некоторого критического значения E_{1c} (для данного кристалла $E_{1c} \approx 10$ МВ/м) максимум зависимости $\Delta\tau$ (τ) резко смещается в область больших напряжений τ .

Если за меру электропластического эффекта при каждом данном значении E взять максимальное значение $\Delta\tau_{\text{max}}$ на кривой $\Delta\tau$ (τ), то получим, что для чистого кристалла КСl зависимость $\Delta\tau$ (E) является нелинейной функцией во всем исследованном интервале электрических полей (рис. 3, кривая 1). При этом экспериментальные точки достаточно удовлетворительно ложатся на квадратичную зависимость (рис. 3, кривая 2). В отличие от чистого для кристалла $\text{KCl} + 7 \cdot 10^{-4} \text{ ат.} \% \text{ Ba}^{2+}$ зависимость $\Delta\tau$ (E) при $E < E_{2c}$ является линейной (рис. 4), а при $E_{2c} \approx 10$ МВ/м наблюдается отклонение зависимости от линейной в сторону больших $\Delta\tau$. Следует отметить, что величины электрических полей, при которых наблюдается сдвиг кривых $\Delta\tau$ (τ) в область больших напряжений (E_{1c}) и отклонение зависимости $\Delta\tau$ (E) от линейной (E_{2c}) совпадают.

Как уже указывалось выше, наиболее общепринятой моделью ЭПЭ является непосредственное электростатическое взаимодействие подвижных заряженных краевых дислокаций с приложенным электрическим полем. Рассмотрим аналитически влияние внешнего электрического поля на параметры пластического течения ШГК, исходя из следующих соображений.

Известно, что скорость пластической деформации определяется выражением

$$\dot{\epsilon} = b\rho_s v_s + b\rho_e v_e, \quad (1)$$

где ρ_s , v_s и ρ_e , v_e — соответственно плотности и скорости подвижных винтовых и краевых компонент дислокаций; b — величина вектора Бюргера дислокаций. Поскольку в кристалле имеются краевые дислокации разных механических знаков,двигающиеся при нагружении в противоположные стороны, то

$$\dot{\epsilon} = b\rho_s v_s + b\rho_e^+ v_e^+ + b\rho_e^- v_e^-, \quad (2)$$

здесь ρ_e^+ , v_e^+ и ρ_e^- , v_e^- — плотности и скорости краевых дислокаций разных знаков, причем $\rho_e = \rho_e^+ + \rho_e^-$.

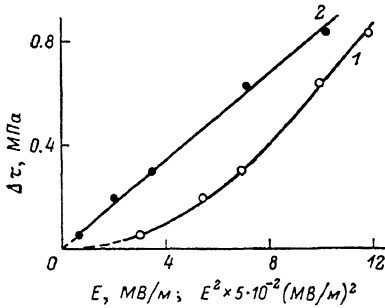


Рис. 3. Зависимости $\Delta\tau_{\max}$ на кривых $\Delta\tau(\tau)$ от E (1) и E^2 (2) для кристалла KCl.

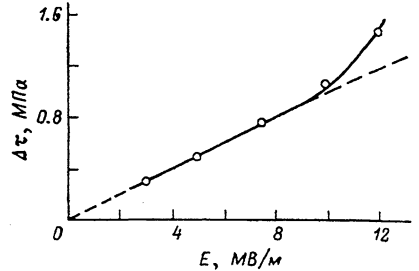


Рис. 4. Зависимость $\Delta\tau_{\max}$ на кривых $\Delta\tau(\tau)$ от E для кристалла KCl+7×10⁻⁴ ат.% Ba²⁺.

В качестве зависимости скорости дислокаций от приложенного напряжения τ может быть взято соотношение [11]

$$v = v_0 \left(\frac{\tau - \tau_i}{\tau_0} \right)^m = v_0 \left(\frac{\tau^*}{\tau_0} \right)^m, \quad (3)$$

где $\tau^* = \tau - \tau_i$ — эффективные напряжения (τ — внешние приложенные напряжения, τ_i — внутренние дальнедействующие поля напряжений), v_0 , τ_0 и m — константы для данных условий испытания.

Если деформирование кристалла осуществляется в электрическом поле напряженностью E (геометрия скольжения такова, что E составляет угол 45° с вектором b), а краевая дислокация обладает электрическим зарядом с линейной плотностью q , то на заряженную дислокацию будет действовать дополнительная сила

$$F_e = \pm qE/\sqrt{2} = \pm \tau_E b. \quad (4)$$

Здесь знак плюс или минус зависит от того, совпадает ли направление механической силы с направлением силы электростатического взаимодействия или является противоположным. При этом в условиях постоянной скорости деформации, как следует из эксперимента, внешние напряжения τ уменьшаются на величину $\Delta\tau$. Тогда скорость пластической деформации во внешнем электрическом поле будет определяться выражением

$$\dot{\epsilon}_E = b\rho_s v_0 \left(\frac{\tau^* - \Delta\tau}{\tau_0} \right)^m + b\rho_e^+ v_0 \left(\frac{\tau^* + \tau_E - \Delta\tau}{\tau_0} \right)^m + b\rho_e^- v_0 \left(\frac{\tau^* - \tau_E - \Delta\tau}{\tau_0} \right)^m. \quad (5)$$

Поскольку эксперимент осуществляется в условиях постоянной скорости деформации, то

$$\dot{\epsilon} = 2b\rho_e v_e = 2b\rho_s v_s = \dot{\epsilon}_E, \quad (6)$$

причем без поля $v_e \approx v_s$ и $\rho_e \approx \rho_s$ [12].

Если при включении внешнего электрического поля плотность дислокаций не изменяется, то должно выполняться соотношение

$$2b\rho v_0 \left(\frac{\tau^*}{\tau_0}\right)^m = b\rho_s v_0 \left(\frac{\tau^* - \Delta\tau}{\tau_0}\right)^m + b\rho_s^+ v_0 \left(\frac{\tau^* + \tau_E - \Delta\tau}{\tau_0}\right)^m + b\rho_s^- v_0 \left(\frac{\tau^* - \tau_E - \Delta\tau}{\tau_0}\right)^m. \quad (7)$$

Эффективные напряжения τ^* можно оценить исходя из [12], как

$$\tau^* = m d\tau/d \ln \dot{\epsilon} = m \nabla_{\dot{\epsilon}}, \quad (8)$$

где $\nabla_{\dot{\epsilon}} = d\tau/d \ln \dot{\epsilon}$ — скоростная чувствительность напряжений течения кристалла. Значения m , по данным [13], для кристалла КС1 лежат в пределах 4—5. Величины скоростной чувствительности $\Delta_{\dot{\epsilon}}$ были экспериментально измерены при изменении скорости деформации в 256 раз и были равны 0.02 и 0.03 МПа соответственно для кристаллов КС1 и КС1+7×10⁻⁴ ат. % Ва²⁺. Тогда в соответствии с (8) эффективные напряжения τ^* для данных кристаллов равны 0.08 и 0.12 МПа. Сами же величины наблюдаемого электропластического эффекта при $E \approx 10$ МВ/м равны 0.6 и 1.0 МПа.

Далее, сравнивая абсолютные значения эффективных напряжений τ^* с величиной электропластического эффекта $\Delta\tau$, можно сделать следующие заключения. Поскольку скорость краевых дислокаций, направление движения которых не совпадает с направлением силы электростатического взаимодействия, определяется выражением

$$v_s^- \sim \left(\frac{\tau^* - \tau_E - \Delta\tau}{\tau_0}\right)^m, \quad (9)$$

а $\tau^* < \tau_E + \Delta\tau$, то при включении электрического поля они перестают вносить вклад в деформацию. То же можно сказать и о вкладе винтовых дислокаций, поскольку

$$v_s \sim \left(\frac{\tau^* - \Delta\tau}{\tau_0}\right)^m, \quad (10)$$

а $\tau^* < \Delta\tau$. Исходя из этого выражение (7) значительно упрощается и принимает вид

$$2\rho \left(\frac{\tau^*}{\tau_0}\right)^m = \rho_s^+ \left(\frac{\tau^* + \tau_E - \Delta\tau}{\tau_0}\right)^m. \quad (11)$$

Поскольку $\rho_s^+ = 1/2 \rho_s$, из (11) следует, что

$$4(\tau^*)^m = (\tau^* + \tau_E - \Delta\tau)^m \quad (12)$$

или

$$\Delta\tau = \tau_E - (4^{1/m} - 1)\tau^*. \quad (13)$$

Учитывая (4) и (8), (13) можно переписать в виде

$$\Delta\tau = \frac{qE}{b\sqrt{2}} - m\nabla_{\dot{\epsilon}}(4^{1/m} - 1). \quad (14)$$

Проведенное рассмотрение показывает, что в области исследованных электрических полей (3—15) МВ/м и реально наблюдаемых значений $\Delta\tau$ и τ^* зависимость величины ЭПЭ от напряженности электрического поля должна быть линейной. Аналогичный вывод следует также и из [4]. Однако в эксперименте на чистых кристаллах КС1 зависимость $\Delta\tau(E)$ нелинейна во всем интервале полей. В легированных кристаллах КС1+7·10⁻⁴ ат. % Ва²⁺ наблюдается линейная зависимость $\Delta\tau(E)$, но только до некоторого критического значения E_{2c} , после чего происходит отклонение $\Delta\tau(E)$ от линейной в сторону больших $\Delta\tau$. Здесь следует иметь в виду то, что изложенный анализ был проведен в предположении, что электропластический эффект в ЦГК полностью определяется взаимодействием электрического поля с подвижными краевыми дислокациями. Вместе с тем в [14, 15]

при изучении движения дислокаций в ненагруженных кристаллах под действием только внешнего электрического поля было показано, что в полях, превышающих некоторое критическое поле E_y , наблюдается движение краевых дислокаций, причем движутся в основном не отдельные дислокации, а краевые дислокационные диполи [15]. Для кристаллов KCl и KCl + $7 \cdot 10^{-4}$ ат. % Ba^{2+} величина E_y соответственно оказалась равной 2.5 и 10 МВ/м. В свою очередь зависимость $\Delta\tau(E)$ для KCl + $7 \cdot 10^{-4}$ ат. % Ba^{2+} линейна именно до значений $E_{2c} \approx E_y \approx 10$ МВ/м. Известно также [12], что среди краевых компонент дислокаций только небольшая их часть является подвижными (порядка 10 %). Остальные представляют собой не отдельные дислокации, а краевые дислокационные диполи, упругое взаимодействие которых с подвижными дислокациями определяет деформационное упрочнение в ЩГК.

В связи с этим в соответствии с величиной прикладываемого внешнего электрического поля ЭПЭ в ЩГК можно разделить на две области и дать им следующую трактовку.

Первая область — $E < E_y$. Здесь электропластический эффект определяется в основном взаимодействием электрического поля с подвижными краевыми дислокациями, т. е. ситуация должна соответствовать всем следствиям, вытекающим из соотношения (14). В частности, зависимость $\Delta\tau(E)$ должна быть линейной при $E < E_y$, что действительно наблюдается на кристаллах KCl + $7 \cdot 10^{-4}$ ат. % Ba^{2+} .

Вторая область — $E > E_y$. При таких полях возможно воздействие не только на подвижные дислокации, но уже и движение краевого дислокационного диполя как целого. Кроме того, при совместном воздействии на кристалл механической нагрузки и сильного электрического поля вполне возможен развал краевого диполя. Иначе говоря, в полях, превышающих E_y , ЭПЭ в ЩГК может определяться двумя причинами: взаимодействием электрического поля с подвижными дислокациями, а также увеличением числа подвижных дислокаций и уменьшением деформационного упрочнения в результате распада краевых дислокационных диполей или движения их по кристаллу как целого. Этим, по-видимому и объясняется отклонение зависимости $\Delta\tau(E)$ от линейной при $E > 10$ МВ/м в кристаллах KCl + $7 \cdot 10^{-4}$ ат. % Ba^{2+} . В чистых KCl величина E_y очень мала (порядка 2.5 МВ/м), поэтому в данных кристаллах кривая $\Delta\tau(E)$ нелинейна во всех исследованных полях (3—15 МВ/м), т. е. всегда имеет место условие $E > E_y$.

Таким образом, из настоящей работы следует, что при рассмотрении физической природы прямого ЭПЭ в ЩГК нельзя ограничиваться воздействием внешнего электрического поля на подвижные дислокации, а следует учитывать возможность движения или распада в сильных полях краевых дислокационных диполей. Следует также отметить, что неучет последнего обстоятельства может привести к заведомо завышенной оценке линейной плотности дислокационного заряда q , сделанной на основании выражения (14).

Л и т е р а т у р а

- [1] Kataoka T., Sakamoto M., Yamada T. Jap. J. Appl. Phys., 1975, vol. 14, N 10, p. 1609—1610.
- [2] Brissenden S., Gardner J. W., Illingworth J., Kovacevic I., Whitworth R. W. Phys. St. Sol. (a), 1979, vol. 51, N 2, p. 521—526.
- [3] Куличенко А. Н., Смирнов Б. И. ФТТ, 1983, т. 25, № 5, с. 1523—1525.
- [4] Whitworth R. W. Phys. St. Sol. (a), 1976, vol. 38, N 1, p. 299—304.
- [5] Whitworth R. W. Adv. Phys., 1975, vol. 24, N 2, p. 203—304.
- [6] Зуев Л. Б., Громов В. Е., Нарожный А. Н. ФТТ, 1974, т. 16, № 2, с. 471—475.
- [7] Сергеев В. П., Зуев Л. Б. ФТТ, 1980, т. 22, № 6, с. 1766—1770.
- [8] Андреев Г. А., Бурейко С. Ф. ФТТ, 1967, т. 9, № 1, с. 79—82.
- [9] Соуфер Л. М. В сб.: Физика конденсированного состояния. Харьков: ФТИНТ АН УССР, 1973, вып. 24, с. 45—64.
- [10] Куличенко А. Н., Смирнов Б. И. ФТТ, 1981, т. 23, № 4, с. 1029—1033.

- [11] *Gilman J. J., Johnston W. G. Sol. St. Phys.*, 1962, vol. 13, p. 147—222.
- [12] *Смирнов Б. И. Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. Л.: Наука, 1981. 235 с.*
- [13] *Li J. C. M. In: Dislocation dynamics, Washington, 1—6 May 1967. New York a. o., 1968, p. 87—116.*
- [14] *Kataoka T., Colombo L., Li J. C. M. Phil. Mag., A.*, 1984, vol. 49, N 3, p. 395—407.
- [15] *Куличенко А. Н., Смирнов Б. И. ФТТ, 1986, т. 28, № 9, с. 2796—2801.*

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
23 января 1987 г.

