

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КРИСТАЛЛАХ LiF

М. В. Галусташвили, Д. Г. Дриаев*,
А. А. Иашвили, В. Г. Квачадзе, В. М. Тавхелидзе

Институт физики им. Э. Андроникашвили
Тбилисский государственный университет им. И. Джавахишвили
Тбилиси, Грузия
* dria.dm@mail.ru

Принята 10 сентября 2020 года

Аннотация

Проведено исследование электромеханического эффекта – колебания кристалла LiF под действием переменного электрического поля. Изучено воздействие короткого импульса электрического поля высокой напряженности на величину эффекта – амплитуду колебаний кристалла под действием переменного поля и его модуль упругости. Прослежена температурная и временная зависимости эффекта после приложения импульса. Определена энергия миграции дефектов, закрепляющих дислокации в процессе возврата после воздействия импульса электрического поля.

Наличие заряда на дислокациях в ионных кристаллах в значительной степени влияет на их электрические и механические свойства [1, 2]. Кроме того, заряженные дислокации обуславливают ряд специфических явлений, которые предоставляют дополнительные возможности для исследования дислокаций, их взаимодействия с другими дефектами.

В настоящей работе с помощью кардинально модернизированного акустического спектрометра [3] проводится дальнейшее изучение обнаруженного нами ранее [4, 5] электромеханического эффекта – колебаний ионного кристалла LiF под действием переменного электрического поля. Большой объем и скорость получения информации в ходе эксперимента позволили проводить исследования на качественно более высоком уровне.

Величина эффекта – амплитуда a колебаний кристалла под действием переменного электрического поля ($E \approx 200$ В/см) – с высокой чувствительностью и точностью измерялась в непрерывном режиме на собственной частоте ($f \sim 3$ кГц) образца. В непрерывном режиме фиксировались также внутреннее трение Q^{-1} и собственная частота f образца и, тем самым, его динамический модуль упругости M (поскольку $f \sim M^{1/2}$).

Образцы LiF были выколоты по плоскостям спайности (100) из монокристаллического слитка и отожжены при температуре 750 °С. По данным спектрального анализа, использованные кристаллы содержат примесь Mg в количестве $2 \cdot 10^{-3}$ мол. %, суммарное количество Al, Si и Fe не превышает 10^{-3} мол. %. Кроме того, по данным инфракрасных спектров имеется довольно высокая концентрация ионов

гидроксила – 0.12 мол. %. В образцах пластической деформацией изгибом (~ 0.1 %) создавались краевые дислокации одного механического знака. Измерения проводились после окончания процесса релаксации, когда кристалл находился в равновесном состоянии. Детальное описание техники эксперимента дано в [3, 6].

В щелочногалоидных кристаллах воздействие электростатического поля напряженностью в несколько кВ/см приводит к макроскопическому перемещению заряженных дислокаций (которое обнаруживается методом ямок травления) [1, 2]. При этом происходит только отрыв дислокаций от точек закрепления – без увеличения плотности дислокаций.

Результат приложения к образцу импульсного электрического поля представлен на **Рисунке 1**. Импульс напряженностью 4 кВ/см и длительностью 10 мс приводит к резкому увеличению амплитуды колебаний a (более чем на порядок) и падению собственной частоты колебаний f , т.е. динамического модуля упругости M (дефект модуля составляет около $4 \cdot 10^{-4}$). С течением времени после приложения импульса амплитуда и модуль возвращаются к исходному значению.

Зависимость между деформацией ε и внешним механическим напряжением σ для идеального кристалла в области упругой деформации дается законом Гука: $\varepsilon^y = \sigma / M$. В реальном кристалле движение дислокационных сегментов вызывает дислокационную неупругую деформацию $\varepsilon^a = \Lambda b \xi$, где Λ – плотность дислокаций, b – вектор Бюргерса, ξ – среднее смещение дислокации длиной l от положения равновесия. Поэтому полная деформация кристалла, содержащего дислокации, $\varepsilon = \varepsilon^y + \varepsilon^a$, а модуль упругости ниже модуля упругости кристалла без дислокаций: $M^* = M - \Delta M$. Таким образом, для кристалла, содержащего дислокации будем иметь: $\varepsilon^y + \varepsilon^a = \sigma / (M - \Delta M)$. При $\varepsilon^a \ll \varepsilon^y$ это выражение принимает вид $\Delta M / M = \varepsilon^a / \varepsilon^y$. Отсюда следует, что падение модуля упругости (дефект модуля) свидетельствует о возрастании дислокационной деформации.

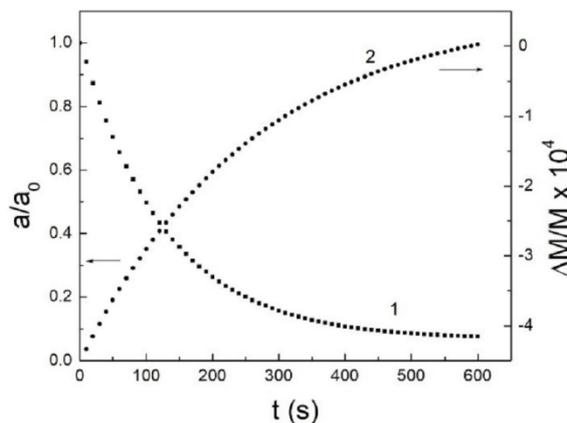


Рисунок 1. Зависимость нормированной амплитуды колебаний (1) и дефекта модуля упругости (2) кристаллов LiF от времени после приложения импульса электрического поля.

Измерения проводились при малых (~ 10^{-6}) амплитудах колебательной деформации (в области амплитудно-независимого внутреннего трения), когда дислокационные сегменты колеблются не отрываясь от центров закрепления. При воздействии импульса электрического поля они отрываются от закрепляющих точечных дефектов, в результате чего увеличивается длина сегмента l , возрастает ξ и, естественно, увеличивается ε^a , о чем

свидетельствует наблюдаемое в эксперименте (**Рисунок 1**) падение динамического модуля M . Со временем, вследствие диффузии точечных дефектов дислокации закрепляются, длина сегмента уменьшается, вызывая возврат модуля к первоначальному значению.

Сопутствующие изменению модуля упругости возрастание и последующий спад амплитуды колебаний кристалла под действием переменного электрического поля E (**Рисунок 1**) являются веским подтверждением дислокационного механизма наблюдаемого электромеханического эффекта: увеличение дислокационной деформации (возрастание дефекта модуля) вызывает возрастание амплитуды колебаний. Со временем, когда дислокационная деформация уменьшается (уменьшается дефект модуля), соответственно падает и амплитуда колебаний, возвращаясь к исходному значению.

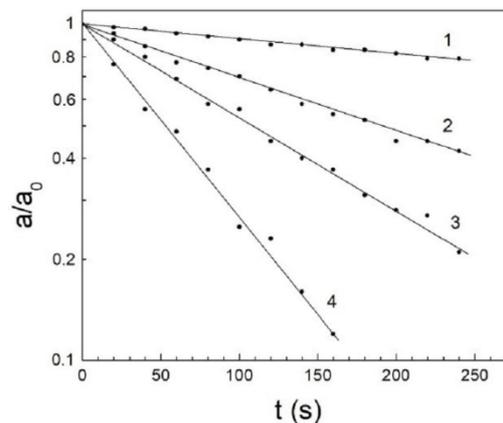


Рисунок 2. Зависимость нормированной амплитуды колебаний кристаллов LiF от времени после приложения импульса электрического поля для температур: **1** – 295, **2** – 310, **3** – 322 и **4** – 350 К.

С повышением температуры скорость возврата увеличивается, что свидетельствует о диффузионном характере процесса, приводящего к возврату амплитуды колебаний. На **Рисунке 2** эти зависимости при температурах 295, 310, 322 и 350 К представлены в координатах $\ln(a/a_0) - t$, где a – амплитуда колебаний в момент времени t , a_0 – максимальная амплитуда после приложения импульса. Как видно, экспериментальные результаты в полулогарифмическом масштабе ложатся на прямые. Следовательно, возврат a протекает по простому экспоненциальному закону $a = a_0 \exp(-t/\tau)$, где τ – время релаксации.

Определенные из этих данных времена релаксации в зависимости от температуры T показаны на **Рисунке 3**. Видно, что график в координатах $\ln \tau - 1/T$ представляет собой прямую линию. Отсюда можно заключить, что зависимость времени релаксации от температуры описывается уравнением Аррениуса для термически активируемых процессов $\tau = \tau_0 \exp(H/kT)$, где k – постоянная Больцмана, τ_0 – предэкспоненциальный фактор, H – энергия активации, равная углу наклона графика к оси абсцисс. По данным, приведенным на **Рисунке 3**, энергия активации процесса возврата $H = 0.38 \pm 0.04$ эВ.

Как свидетельствуют параллельные измерения модуля упругости, возврат амплитуды колебаний обусловлен закреплением дислокаций точечными дефектами, которые мигрируют в результате диффузии. При этом необходимо учитывать то обстоятельство, что в общем случае между дислокацией и точечным дефектом существует

потенциал взаимодействия, который является функцией расстояния между ними. Благодаря взаимодействию точечные дефекты испытывают силу, пропорциональную градиенту потенциала, которая приводит к направленному потоку даже в отсутствие градиента концентрации и уменьшает эффективную энергию миграции.

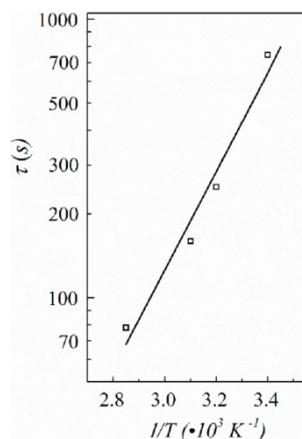


Рисунок 3. Зависимость времени релаксации амплитуды колебаний кристаллов LiF от обратной температуры после воздействия импульса электрического поля.

Энергия миграции, полученная нами в эксперименте (0.38 эВ), гораздо меньше известных из литературы значений энергии миграции различных дефектов в LiF: минимальная из них – энергия миграции катионных вакансий составляет примерно 0.7 эВ. Однако если учесть, что в результате воздействия импульса дислокации перемещаются на небольшие расстояния, то предположив, что происходит направленная диффузия вакансий, в свете вышесказанного 0.38 эВ можно интерпретировать как разность между энергией миграции и энергией взаимодействия катионных вакансий с дислокацией 0.3 – 0.4 эВ. Таким образом, можно заключить, что в кристаллах LiF диффундирующими точечными дефектами, закрепляющими дислокации после воздействия импульса электрического поля, являются катионные вакансии.

Настоящие эксперименты являются убедительным доказательством дислокационного механизма обнаруженного нами электромеханического эффекта: под действием переменного электрического поля дислокационные сегменты прогибаются, создавая знакопеременную дислокационную деформацию, приводящую к появлению эффективной силы, возбуждающей колебания кристалла.

Ссылки

- [1] Н. А. Тяпунина, Э. П. Белозерова. УФН, 1988, 156, 683.
- [2] R. W. Withworth. Phil. Mag., 1968, 17, 1207.
- [3] D. Driaev, A. Iashvili, L. Kankadze, S. Tsakadze. Rev. Sci. Instrum., 2017, 88, 054904.
- [4] Д. Г. Дриаев, В. А. Мелик–Шахназаров. ФТТ, 1966, 8, 3280.
- [5] В. И. Альшиц, Д. Г. Дриаев, В. А. Мелик–Шахназаров. Электронные и ионные процессы в твердых телах, 1973, 6, 68.
- [6] М. В. Галусташвили, Д. Г. Дриаев. Nano Studies, 2019, 19, 213.