УДК 620.179.13:548.0

# О МЕХАНОЭМИССИИ В ИОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

© Л.Г. Карыев, В.А. Федоров, А.П. Занина, С.В. Васильева

*Ключевые слова*: работа выхода иона с поверхности; ионный кристалл; монокристаллические наросты; пластические сдвиги; электрическое поле; диффузия; механоэмиссия.

Рассмотрены структурные превращения на поверхности ионных кристаллов при нагреве в электрическом поле. Структурные превращения обусловлены эмиссионным ионным током, механоэмиссией ионов, рекомбинационной кристаллизацией. Проведена оценка работы выхода иона в зонах пластических сдвигов.

Для ионных кристаллов экспериментально установлена возможность [1] залечивания трещин скола ионным током при одновременном нагреве. На ранних стадиях такого воздействия на поверхностях трещины появляются локальные необратимые изменения в виде дислокационных розеток [2] и монокристаллических наростов в температурных интервалах примесной и собственной проводимости соответственно. Во всех случаях наслоения появлялись на положительно заряженных поверхностях в местах, где предварительно были сформированы дислокационные розетки. Вблизи наростов наблюдали полигональные стенки, что связано с процессами пластической деформации (рис. 1) в этой области.

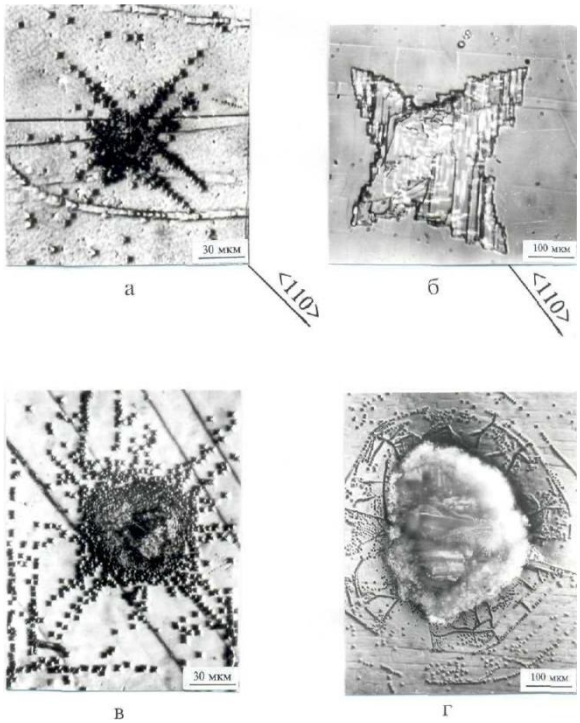


**Рис. 1.** Дислокационные розетки (а, в) и соответствующие им монокристаллические наросты (б, г): а, б – вблизи вершины трещины; в, г – в удалении от вершины. Полигональные стенки вблизи нароста – г, LiF ($10^{-3}$ вес.%)

За определенное время термоэлектрического воздействия развивающийся нарост перемыкал берега трещины, приводя к восстановлению сплошности (рис. 2).

На поверхностях трещины в условиях термоэлектрического воздействия протекают различные процессы. В части кристалла, контактирующей с положительным электродом в направлении внешнего электрического поля, перемещаются более подвижные катионы.

Анионы практически неподвижны до предплавильных температур [3]. Поверхность трещины при этом заряжается положительно без разрушения кристаллической решетки. Являясь энергетическим барьером для катионов, поверхность препятствует, до некоторой степени, сублимации последних в полость трещины. В противоположность этому отрицательно заряженная поверхность трещины обедняется катионами, дрейфующими к отрицательному электроду, что способствует уменьшению энергии сублимации анионов в полость трещины. Анионный эмиссионный ток, бомбардируя положительно заряженную поверхность, приводит к деформационным сдвигам на ней. Ток возникает в первую очередь в участках концентрации электрического поля (например, ступеньки скола). При этом в зонах пластических сдвигов имеет место механоэмиссия катионов [4], приводящая в результате рекомбинационной кристаллизации на положительно заряженной поверхности трещины к образованию монокристаллических наростов.

Целью данной работы является аналитическая оценка работы выхода $Q_B$ катионов с поверхности кристалла в области развивающихся деформационных сдвигов.

**Рис. 2.** Участок восстановившейся сплошности в русле трещины, LiF·$10^{-3}$ вес.%

Для достижения поставленной цели были проведены эксперименты по определению времени, необходимого для перемыкания наростом полости трещины.

В экспериментах использовали монокристаллы LiF, суммарный состав примесей в которых по $Ca^{+2}$, $Mg^{+2}$, $Ba^{+2}$ не превышал $10^{-3}$ вес.%. Трещину скола вводили лезвием ножа. Расстояние между берегами трещины в области ее вершины ~ $2\cdot10^{-5}$ м. Эксперименты проводили в воздушной среде. Напряженность электрического поля в кристалле $E_0 \sim 10^5$ В/м. Опыты проводили по схеме плоского конденсатора: кристалл с введенной трещиной скола помещали между плоскими электродами, обеспечивая надежный контакт. При этом поверхности трещины были параллельны плоскостям электродов. Температура кристаллов, при которой на электроды подавалось постоянное напряжение $U = 400$ В, составляла $T \sim 873$ К.

В ходе опытов установлено, что монокристаллические наросты, образующиеся на положительно заряженной поверхности трещины, перемыкали ее русло при упомянутых параметрах примерно за 90–95 с. Значение этого времени было использовано в расчетах работы выхода $Q_B$.

Результирующая вероятность $P_p$ того, что ион $Li^+$ окажется на положительно заряженной поверхности трещины при термоэлектрическом воздействии на кристалл, определяется выражением [5–6]:

$P_p = P_1 - P_2$;

$P_1 = \nu \exp(S_m/kT) \exp[-(Q_B - ½E_0qa)/kT]$ – вероятность выхода иона $Li^+$ с положительно заряженной поверхности в полость трещины;

$P_2 = \nu \exp(S_m/kT) \exp[-(Q + ½E_0qa)/kT]$ – вероятность перехода поверхностного иона $Li^+$ в направлении, противоположном направлению внешнего электрического поля $E_0$ (вглубь кристалла),

где $\nu$ – собственная частота колебания иона (~$10^{13}$ Гц); $S_m$ – энтропия активации при миграции иона; $E_0$ – напряженность внешнего электрического поля; $q$ – заряд иона; $a$ – межионное расстояние; $k$ – постоянная Больцмана; $T$ – абсолютная температура кристалла; $Q$ – величина энергетического барьера при диффузии иона $Li^+$ вглубь кристалла.

В связи с тем, что поверхность трещины и прилегающие к ней области кристалла со стороны анода положительно заряжены, переход поверхностного иона $Li^+$ вглубь образца маловероятен, следовательно, $P_p \approx P_1$. Внешнее электрическое поле $E_0$ способствует выходу иона $Li^+$ с поверхности.

В первом приближении, пренебрегая энтропией активации при миграции иона $S_m$, получаем выражение для средней скорости перемещения $v_{ср}$ поверхностного иона $Li^+$ по направлению внешнего электрического поля к отрицательно заряженной поверхности трещины:

$$v_{ср} = a\,\nu \exp[-(Q_B - ½E_0qa)/kT]. \quad (1)$$

Величина $v_{ср}$ коррелирует со скоростью перемещения вершины растущего монокристаллического нароста к противоположному берегу трещины.

Очевидно, напряженность $E_0$ между вершиной нароста и отрицательно заряженным берегом трещины по мере их сближения не изменяется, т. к. это напряженность на участке локального микроскопического пробоя (напряженность между берегами трещины, соответствующая началу пробоя (~$8\cdot10^6$ В/м) [7].

Из выражения (1) получаем: $Q_B \le kT \ln(a\nu/v_{ср}) + ½E_0qa \approx 1{,}7$ эВ.

Предположение о том, что рекомбинационная кристаллизация начинается в области развивающихся деформационных сдвигов, проверено экспериментально. Между поверхностями скола помещали микроиндентор – частицу керамики (~$5\cdot10^{-5}$ м), которая обеспечивала локальную деформацию во время термоэлектрического воздействия на кристалл. В результате в зонах деформационных сдвигов образовывались монокристаллические наросты.

Таким образом, механоэмиссия катионов характеризуется меньшей работой выхода $Q_B$ ионов с поверхности в области развивающихся деформационных сдвигов, в сравнении с работой выхода тех же ионов на недеформируемых участках (~5 эВ [8]).

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Иванов В.П., Карыев Л.Г., Федоров В.А.* // Кристаллография. 1995. Т. 40. № 1. С. 117-121.
2. *Федоров В.А., Карыев Л.Г., Иванов В.П.* // Физика прочности и пластичности металлов и сплавов: тез. докл. 13 Междунар. конф. Самара, 1992. С. 304-305.
3. *Лидьярд А.* Ионная проводимость кристаллов. М.: Наука, 1962. 222 с.
4. *Молоцкий М.И.* Рекомбинационный механизм эмиссии электронов Дерягиной–Кротовой–Карасева после скола // ДАН СССР. 1978. Т. 243. № 6. С. 1438-1441.
5. *Бюрен Ван* Дефекты в кристаллах. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962. 584 с.
6. *Павлов П.В., Хохлов А.Ф.* Физика твердого тела. М.: Высш. шк., 1985. 384 с.
7. *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958. 231 с.
8. *Федоров В.А., Карыев Л.Г., Иванов В.П.* Влияние одновременного воздействия теплового и электрических полей на залечивание трещин скола в щелочногалоидных кристаллах // Физика и химия обработки материалов. 1998. № 5. С. 64-68.


БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-41-03166.

Поступила в редакцию 15 сентября 2015 г.

Karyev L.G., Fedorov V.A., Zanina A.P., Vasilyeva S.V. ABOUT MECHANOEMISSION IN IONIC CRYSTALS

The structural changes on the surface of ionic crystals by heating in an electric field. Structural transformations are due to emission ion current mechanoemission of ions recombination crystallization. The evaluation of the work function of the ion in the areas of plastic slips is carries out.

*Key words:* work function of the surface of the ion; ion crystal; single crystal growths; plastic slip; electric field; diffusion; mechanoemission.

Карыев Леонид Геннадьевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры довузовской подготовки института педагогики, e-mail: karyev@list.ru

Karyev Leonid Gennadyevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of Pre-University Training Institute of Pedagogy, e-mail: karyev@list.ru

Федоров Виктор Александрович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Fedorov Viktor Aleksandrovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Honored Worker of Science of Russian Federation, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Занина Анна Павловна, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская федерация, аспирант, кафедра теоретической и экспериментальной физики, e-mail: annettzanw@gmail.com

Zanina Anna Pavlovna, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Postgraduate Student, Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: annettzanw@gmail.com

Васильева Светлана Васильевна, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, зав. лабораторией кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Vasilyeva Svetlana Vasilyevna, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Head of Laboratory of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: feodorov@tsutmb.ru