

УДК 537.226

## ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ $\alpha$ -LiIO<sub>3</sub> И ИХ ПРИРОДА

Л. И. Исаенко, И. Ф. Канаев, В. К. Малиновский, В. И. Тюриков

На основе экспериментального материала доказано, что достаточно совершенным кристаллам  $\alpha$ -LiIO<sub>3</sub> присущи микроскопические дефекты в виде тонких (1–100 мкм) пористых каналов, вытянутых вдоль оси  $C_6$ . Предлагается модель, в которой учет электрических свойств каналов, заполненных электролитом, объясняет такие приведенные в работе экспериментальные характеристики как: зависимость величины проводимости вдоль оси  $C_6$  от поля; сильная анизотропия проводимости в области небольших полей; токовые повреждения объема кристалла; долговременные переходные токи; длительная генерация обратных токов; образование под электродами и вблизи них пленок из веществ кристалла и окружающей среды.

Ряд свойств широко используемых в квантовой электронике кристаллов  $\alpha$ -LiIO<sub>3</sub> остается малоизученным. Это является причиной отсутствия достаточно аргументированных объяснений такого уникального свойства, как, например, анизотропия проводимости.

В настоящей работе описаны эксперименты, вскрывающие новые и уточняющие уже известные характерные особенности токов, протекающих в  $\alpha$ -LiIO<sub>3</sub> под действием постоянного поля. Опыты проведены на большой партии кристаллов, что позволяет увидеть широкий диапазон изменений проводимости, характерные вольт-амперные характеристики, особенности в поведении переходных токов, разную степень токового повреждения и другие электрические свойства. Характеристики электропроводности, присущие только  $\alpha$ -LiIO<sub>3</sub>, объясняются наличием канальных дефектов.

### 1. М е т о д и к а

Исследовались кристаллы, выращенные методом изотермического испарения из растворов с различными  $pH$  (4–8) и примесными добавками (Ag, Ti), отличия были и в температуре растворов. Для облегчения регистрации оптических изменений объема и поверхности образцы для исследований вырезались из оптически однородных участков кристаллических буль и полировались. До проведения основных измерений было испытано несколько материалов, осуществляющих контакт измерительной цепи с кристаллами, жидких (вода, вода+NaCl, этиленгликоль, маточный раствор LiIO<sub>3</sub>) и твердых (In, In+Ga, графит). Испытания проведены на трех образцах, имеющих разную проводимость (от  $10^{-8}$  до  $10^{-10}$  (Ом·см)<sup>-1</sup>). Существенных различий в вольт-амперных и временных характеристиках токов при изменении материала контактов не обнаружилось. Основные измерения были проведены с более удобными индиевыми контактами. Индий помещался в отверстия на концах металлических электродов и с помощью специального устройства прижимался к образцу. В результате давления мягкий индий копирует профиль поверхности. Диаметр индиевого электрода 4 мм. Влияние поверхностной проводимости исключалось либо охранными кольцевыми электродами, либо соответствующими размерами образца (которые обеспечивают боль-

шую разность путей по поверхности и объему между электродами). Изменения токов проводились в направлениях вдоль ( $j_{\parallel}$ ) и поперек ( $j_{\perp}$ ) оси шестого порядка  $C_6$ . Из-за наличия длительных во времени изменений тока удобно классифицировать образцы по величине начальной проводимости  $\sigma_{\parallel}^H$ ,  $\sigma_{\perp}^H$ , измеренной в течение первых минут воздействия поля.

## 2. Экспериментальные результаты

1. Проводимость вдоль оси  $C_6$  ( $\sigma_{\parallel}$ ) более 30 исследованных образцов, полученных в основном из разных кристаллических булей, была в пределах  $10^{-6} \div 10^{-10}$  (Ом·см) $^{-1}$ . Однако строгой корреляции  $\sigma_{\parallel}$  с примесями и  $pH$  маточного раствора установить не удалось. Более того,  $\sigma_{\parallel}$  некоторых образцов, полученных из кристаллов, выращенных в одинаковых условиях, различалась на  $1 \div 2$  порядка. В частности, исследование того же ряда кристаллов, что в работе [1], не показало пика проводимости на кристаллах с примесью Ti ( $pH=2.5$ ) и беспримесных с  $pH=4$ . Необъяснен-

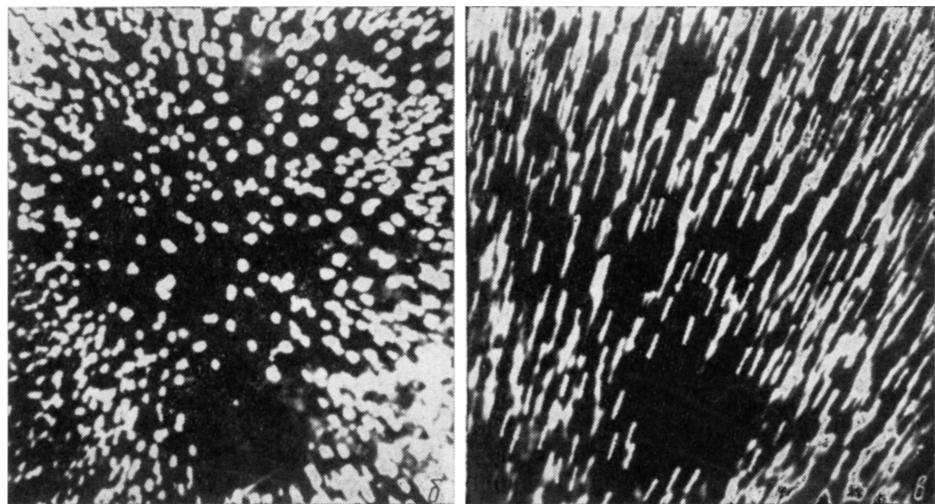


Рис. 1. Токковые повреждения.

б, в — вид вдоль  $C_6$  (б) и под углом  $20^\circ$  к  $C_6$  (в) фрагмента образца (поверхности после воздействия поля полировались; размер образца вдоль каналов и оси  $C_6$ , 6 мм).

ный пока разброс значений  $\sigma_{\parallel}$  имеется и в данных работ разных авторов, это отмечено в [2].

В нескольких экспериментах мы заметили, что образцы, вырезанные из разных областей були, имеют разные  $\sigma_{\parallel}$ . Большой (до двух порядков) проводимостью обладают образцы, полученные из областей, близких к затравочному кристаллу. На таких же образцах обнаружилось и различие (до двух порядков)  $\sigma_{\parallel}$  центральных и периферийных участков (образцы  $Z$  среза представляют собой сечение були): центральные области имели большую  $\sigma_{\parallel}$ . В наших исследованиях образцы выбирались лишь по признаку достаточно хорошего оптического качества и вырезались из произвольных областей кристаллических булей. Из отмеченных фактов следует, что наблюдаемый нами широкий диапазон изменения  $\sigma_{\parallel}$  в большой степени обусловлен зависимостью проводимости от местоположения области в ростовой буле. Эту зависимость, очевидно, необходимо учитывать при экспериментальных исследованиях и практическом применении  $\alpha\text{-LiIO}_3$ .

2. Ток  $j_{\parallel}$  в кристаллах  $\alpha\text{-LiIO}_3$  вызывает объемные и поверхностные изменения (токковые повреждения). По степени повреждения наблюдается

корреляция с  $\sigma_{\parallel}^{\text{н}}$ . В образцах с относительно малой  $\sigma_{\parallel}^{\text{н}}$  ( $\leq 10^{-9}$  (Ом·см) $^{-1}$ ) изменений показателя преломления ( $n$ ) объема (резрешение  $\Delta n = 10^{-3} n$ ) и нарушений поверхностей под электродами (визуальные наблюдения в микроскопе) не обнаруживается. Имеется относительно хорошая повторяемость токовых характеристик.

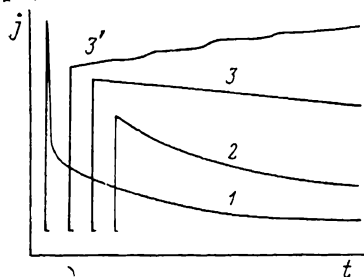


Рис. 2. Временные характеристики тока ( $j_{\parallel}$ ). 1, 2 — токи в высокоомных ( $\sigma_{\parallel}^{\text{н}} \leq 10^{-9}$  (Ом·см) $^{-1}$ ) и прошедших полевую тренировку относительно низкоомных ( $\sigma_{\parallel}^{\text{н}} \leq 10^{-7}$  (Ом·см) $^{-1}$ ) образцах; 3 — долго (5–50 часов) спадающий (характерный для кристаллов с  $10^{-9} < \sigma_{\parallel}^{\text{н}} \leq 5 \cdot 10^{-7}$ ) ток; 3' — токи в сильно повреждающихся (вплоть до разрушения) образцах.

Длительный (в некоторых случаях до двух суток) спад и резкие скачки (в основном в сторону увеличения) тока во времени сопутствуют образцам, у которых  $\sigma_{\parallel}^{\text{н}} \geq 10^{-8}$  (Ом·см) $^{-1}$ . После пропускания тока поверхности под электродами оказываются частично разрушенными и неоднородными по поглощению света. На поверхностях вблизи электродов образуется

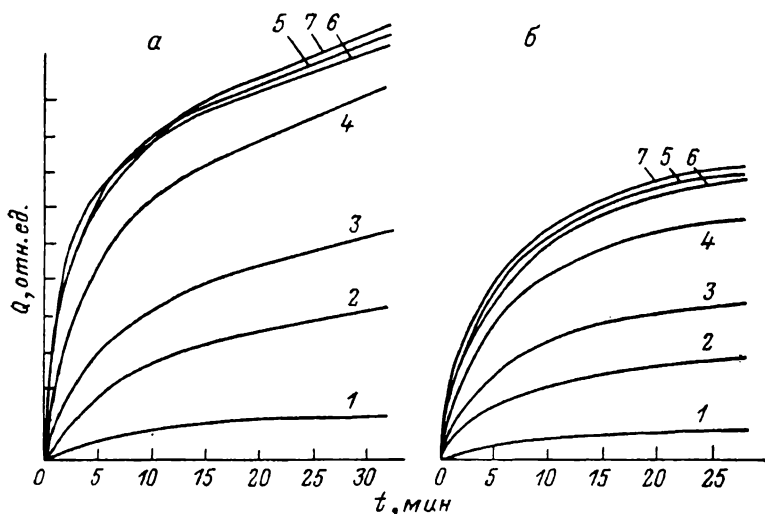


Рис. 3. Изменение во времени количества электричества  $Q = \int_0^t j_{\parallel} dt$ , протекающего через образец, прошедший полевую тренировку, при включении (а) и выключении (б) внешнего источника напряжения.

Кривые 1 ÷ 7 соответствуют внешнему полю 4, 10, 20, 40, 125, 220, 1000 В/см.

неоднородная по толщине пленка. Обнаруживаются и объемные изменения. Визуально они выглядят в виде тонких нитей, пронизывающих объем от одного электрода до другого (рис. 1). Пучок света, пропущенный через грани, не занятые электродами, рассеивается, образуя световую полосу, перпендикулярную нитевидным каналам. При использовании в качестве электрода графитовой пасты было установлено, что через нитевидные образования могут просачиваться мелкие ( $\leq 10$  мкм) частички графита. Подробного выяснения величин полей и длительностей пропускания тока, необходимых для появления описанных повреждений, не проводилось. В наших опытах повреждения обнаружены после воздействия полей 100–1000 В/см. В высокоомных кристаллах повреждений не было даже

в полях 10 кВ/см при протекании такого количества электричества, при котором наблюдается сильное повреждение низкоомного образца.

Протекание тока в направлении, перпендикулярном оси  $C_6$ , не вызывает изменений поверхности и объема.

3. Относительно большое разнообразие временных характеристик тока (рис. 2) можно выразить соотношением

$$j_{\parallel}(t) = j_0 + j_1(t) + j_2(t) + j_3(t). \quad (1)$$

Здесь  $j_0$  — постоянный ток;  $j_1, j_2, j_3$  — переходные токи с увеличивающимся временем релаксации  $\tau_1 \ll \tau_2 \ll \tau_3$ . В тех образцах, в которых воздействие поля сопровождается либо разрушением, либо возникновением большой плотности повреждений, ток во времени был близок к по-

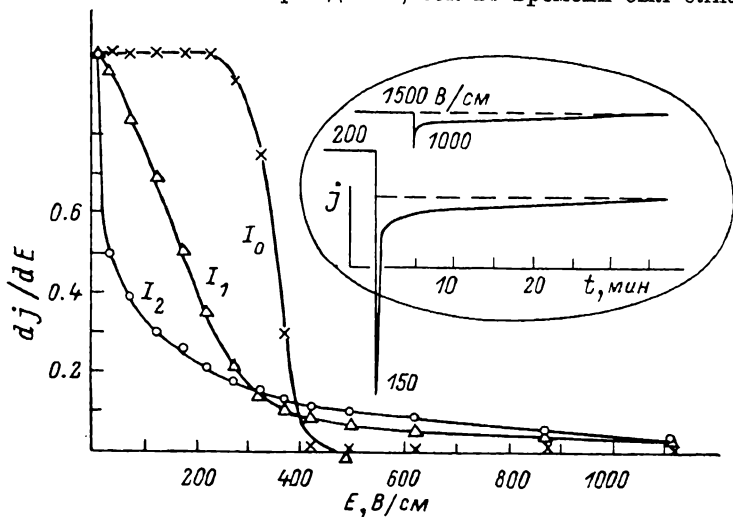


Рис. 4. Приращение токов ( $j_{\parallel}$ ) при разных значениях приложенного поля.

$I_0, I_1, I_2$  — соответственно постоянный ( $j_0$ ) и переходные  $j_1, j_2$  токи ( $I_0 : I_1 : I_2 = 1 : 9 : 2,7$ ); на вставке приведена экспериментальная кривая тока в моменты переключения поля с 1500 до 1000 и с 200 до 150 В/см (положение начальных уровней тока по вертикали выбрано произвольно).

стоянному или плавно и скачками возрастал (кривая  $3'$ , рис. 2). В таких образцах длительные измерения токов невозможны и (1) относится только к образцам, выдерживающим длительное воздействие поля (100–1000 В/см). В них поле возбуждает ток, долго спадающий во времени. Заряд, перенесенный током при включении и выключении поля, не одинаков. С увеличением времени воздействия поля начальная амплитуда  $j_{\parallel}(0)$  и временной ход  $j_{\parallel}(t)$  начинают повторяться. К  $j_3$  мы относим ток, исчезающий в процессе полевой тренировки. Величины  $j_3$  и  $\int_0^t j_3 dt$  возрастают

с ростом поля и температуры, и они больше в тех образцах, в которых больше токовых повреждений.

После полевой тренировки (а в образцах с  $\sigma_{\parallel}^n \ll 10^{-9}$  (Ом·см) $^{-1}$  без тренировки) ток описывается повторяющейся характеристикой

$$j_{\parallel}(t) = j_0 + j_1(t) + j_2(t).$$

Некоторые отличия в токах  $j_1$  и  $j_2$  можно увидеть на рис. 2, 3 и вставке рис. 4. Ток  $j_1$  наблюдается не во всех образцах. Времена  $\tau_1$  и  $\tau_2$  различаются в 10–30 раз. С ростом поля величины токов  $j_1, j_2$  и количества зарядов, перенесенных ими  $Q_{1,2} = \int_0^t j_{1,2} dt$ , стремятся к насыщению

(рис. 3, 4). Подчеркнем, что  $Q_2$  на 3-6 порядков превышает заряд, отвечающий геометрической емкости образца.

4. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) постоянного тока подробно исследованы на 14 образцах. Их типичный вид представлен на рис. 5 и 6.

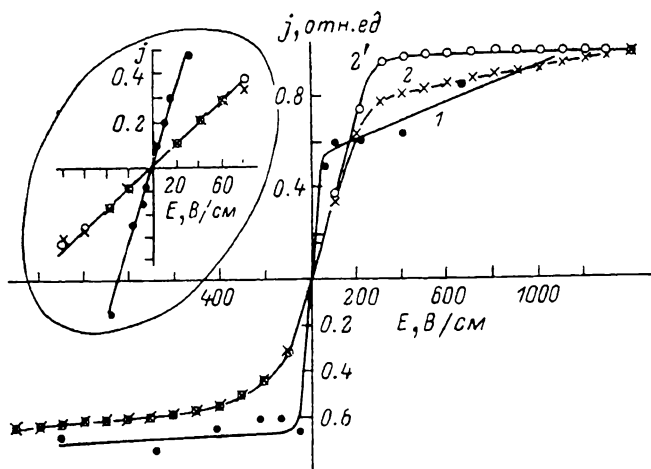


Рис. 5. ВАХ постоянного тока на образцах из разных кристаллических булль (1 — без примеси,  $pH=1.8$ ; 2 — с примесью  $Ti$ ,  $pH=8$ ): при получении каждой точки кривой 1 необходимое напряжение включалось от нуля до номинального; кривые 2 и 2' получены соответственно при ступенчатом увеличении и уменьшении напряжения; на вставке приведена область малых полей.

В области небольших полей зависимость  $j_0$  от  $E$  линейна. Начиная с некоторого поля  $E_n$ , меняющегося от образца к образцу, ток насыщается. Во многих образцах  $E_n$  зависит от знака поля. В полях  $E > E_n$   $j_0(E)$  либо постоянна, либо медленно возрастает, причем неодинаково в полях раз-

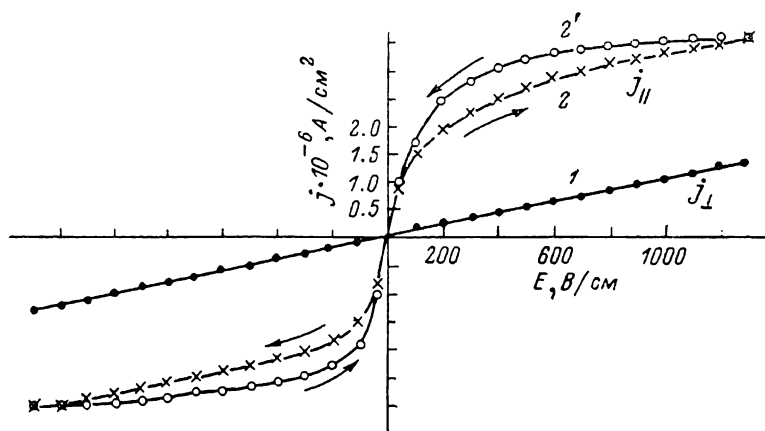


Рис. 6. ВАХ постоянного тока на образцах, полученных из одной кристаллической булль, вдоль (кривые 2', 2) и поперек (кривая 1) оси  $C_6$ .

ного знака. Возрастание, как правило, наблюдается в образцах с долго спадающим переходным током  $j_3$ .

5. Во временных характеристиках токов, текущих в направлении, перпендикулярном  $C_6$ , переходные токи  $j_1, j_2, j_3$  отсутствуют. Лишь в одном из пяти исследованных образцов при относительно высоком напряжении мы видели переходной ток типа  $j_3$ . ВАХ стационарного тока  $j_{\perp}(E)$  линейна (рис. 6).

Отдельными фрагментами вышеприведенные данные имеются и в работах других авторов. Например, в [3] действие поля на исследуемый образец сводилось к появлению неоднородностей в объеме в виде полос и рассеянию лазерного луча; повреждение поверхностей с образованием дендритов Li наблюдали в [4]; образование пленок  $\text{LiCO}_3$ ,  $\text{HIO}_3$ , Li обнаружено в [5]; насыщение ВАХ при относительно небольших полях можно увидеть в данных работ [3, 6]. Наблюдались и длительные спады тока [7, 8] и накопления кристаллами большого заряда [8]. Совпадения результатов показывают, что выделенные выше на основе статистических исследований особенности характерны всему классу кристаллов, а не отдельным образцам. Совокупность данных позволяет сделать ряд выводов, которые необходимо учитывать как при практическом использовании кристаллов, так и при построении моделей роста, строения, проводимости.

1) Различие проводимостей на несколько порядков практически беспримесных кристаллов, сильные физические изменения объема и поверхности под действием даже небольших полей и токов являются свойствами, выделяющими  $\alpha\text{-LiIO}_3$  из ряда кристаллических материалов.

2)  $\alpha\text{-LiIO}_3$  выделяется наличием переходных токов  $j_1$ ,  $j_2$ . Их особенность заключается в переносе большой величины заряда, наличии насыщения в относительно небольших полях и в том, что они протекают только в направлении, параллельном  $C_6$ .

3)  $\sigma_{\parallel}$  является функцией поля, тогда как  $\sigma_{\perp}$  от него не зависит. Считается, что проводимости  $\alpha\text{-LiIO}_3$  свойственна анизотропия  $\sigma_{\parallel} \gg \sigma_{\perp}$  [7, 8]. Это не совсем правильная трактовка экспериментов. Из данных по ВАХ (рис. 6) видно, что  $\sigma_{\parallel}$  падая, а  $\sigma_{\perp}$  оставаясь постоянной с ростом  $E$ , стремятся к одинаковой величине. В наших опытах свойство  $\sigma_{\parallel} \gg \sigma_{\perp}$  можно было приписать группе образцов с сильным токовым повреждением. Однако в них за время проведения эксперимента превалирует ток  $j_3$ , который является переходным и определять по нему проводимость, очевидно, нельзя.

4) Утверждения об ионной проводимости  $\alpha\text{-LiIO}_3$  [4, 8, 9] пока не подтверждаются опытом. Ионная проводимость к настоящему времени аргументируется двумя фактами: длительным спадом тока во времени и образованием пленок нового вещества (в частности дендритов Li [4] под электродами). Эти факты, как следует из описанных нами опытов, являются частным случаем. Например, длительного спада тока практически нет в образцах с малой  $\sigma_{\parallel}$ , его нет и при измерениях  $j_{\perp}$ .

Далее опыт показывает, что при одинаковом количестве перенесенных током зарядов образцы с большой  $\sigma_{\parallel}$  оказываются практически разрушенными, а в образцах с малой  $\sigma_{\parallel}$  изменений объема и поверхности не обнаруживается. Из оценок следует, что перенесенного заряда недостаточно для осуществления таких больших повреждений, которые мы видим в ряде образцов. Вероятно, вынос вещества током из повреждающихся областей происходит за счет движения крупных комплексов.

Длительно спадающий ток, который в нашей интерпретации является током  $j_3$ , или исчезает при длительном действии поля, или отсутствует. Он течет, как будет показано ниже, по дефектным областям кристалла, поэтому вопрос о носителях тока основной матрицы  $\alpha\text{-LiIO}_3$  является открытым.

#### 4. Модель токовых процессов

1) Как показывает опыт ряда работ, из объема кристалла под действием поля происходит вынос вещества (Li, I, O, H), вследствие этого, очевидно, и меняется показатель преломления объема. Изменения  $n$  указывают, в какой области протекал большой ток. Эти области, как отмечалось, имеют форму тонких каналов. Конечное количество образовавшихся ка-

налов и устойчивая повторяемость токовых характеристик после полевой тренировки образца показывают, что в кристалле изначально существуют каналовые (К) дефекты. В образцах, не подвергающихся действию поля, они не видны из-за того, что  $n$  основной матрицы и дефекта близки. Из однородности  $n$  до воздействия поля следует, что К-дефекты заполнены. Заполнителем, вероятно, является и маточный раствор, и молекулярные комплексы. Каналы пропускают частички графита, служащие электродами, но не просматриваются насквозь даже при относительно большом (10—50 мкм) размере, что можно объяснить пористым строением К-дефекта.

Из исследований дефектности  $\alpha\text{-LiIO}_3$  [2] следует, что количество и размеры макроскопических дефектов зависят от скорости и других условий выращивания, а также от места расположения в кристалле. Такие зависимости, очевидно, свойственны и К-дефектам.

2) Изолированные от электрода каналы не могут быть очищены полем. Вероятность очистки больше в тех участках образца, в которых каналы образуют почти непрерывную цепь. Число таких участков пропорционально количеству и размеру дефектов. Поле возбуждает в канальной жидкости электролитические процессы (изменение концентрации растворенных веществ, химического состава), что в конечном итоге приводит к разрушению перегородок между близко расположенными дефектами. Долго спадающий ток  $j_3$ , по-видимому, обеспечивается участками образца с непрерывным и близким расположением К-дефектов. Изменение количества и размеров дефектов от условий выращивания обуславливает изменение тока  $j_3$  от кристалла к кристаллу и его отсутствие в более совершенных образцах. Уменьшение и исчезновение  $j_3$  в процессе полевой тренировки происходит вследствие очистки каналов от электрически активных элементов. Поскольку каналы вытянуты вдоль оси  $C_6$ , что в поперечных направлениях вероятность образования сплошного дефекта мала и токовые повреждения, а также переходной ток  $j_3$  должны отсутствовать.

3) Для объяснения анизотропного влияния поля на стационарную проводимость проанализируем процессы, происходящие в изолированном от электродов канале. Под действием поля  $E$  ионы разного знака электролитического раствора двигаются к противоположным концам канала. Торцы канала служат электродами и ионы, обмениваясь с ними электронами (что возможно при электронной проводимости торцов), нейтрализуются. Вследствие этого концентрация заряженных частиц уменьшается, но увеличивается число нейтральных частиц. Те компоненты электролита, которые в нейтрализованном состоянии не образуют твердые комплексы (например,  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ), за счет градиента концентрации будут двигаться к противоположному электроду. Достигая последнего, они вновь заряжаются. Только такие компоненты электролита поддерживают постоянный ток.

В стационарном состоянии потоки нейтральных и заряженных частиц одинаковы

$$DdB/dz = Nv. \quad (2)$$

Здесь  $D$  и  $B$  — коэффициент диффузии и концентрация нейтральных частиц;  $N$ ,  $v$  — скорость и концентрация заряженных частиц;  $v = \mu E$ ,  $\mu$  — подвижность. Равенство потоков по всей длине канала возможно при линейной зависимости  $B$  от  $z$ ,  $B = B_1 z/L$ . Для определения  $B_1$  запишем условие постоянства полного числа частиц данного сорта (при начальной концентрации  $N_0$ )

$$N_0 L = N L + \int_0^L B dz. \quad (3)$$

Из (2) и (3) найдем

$$N = 2N_0 D / (\mu L E + 2D). \quad (4)$$

Отсюда видно, что концентрация заряженных частиц  $N$  с ростом поля уменьшается. Предполагая, что проводимость ( $\sigma$ ) пропорциональна  $N$ ,

$\sigma = \alpha N$ , а  $D = \mu kT/q$  ( $q$  — заряд,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура) [10], получим выражение для тока

$$j = \sigma E = 2\alpha N_0 \frac{EkT}{qEL + 2kT}. \quad (5)$$

При малых полях, т. е.  $E \ll 2kT/qL$ , ток линейно зависит от поля

$$j = \alpha N_0 E. \quad (6)$$

В случае  $E > 2kT/qL$  ток не зависит от  $E$ , наступает насыщение

$$j = 2\alpha N_0 kT/qL. \quad (7)$$

Мы видим, что (6) и (7) качественно описывают кривую ВАХ стационарного тока вдоль оси  $C_6$ . Количественную оценку поля насыщения найдем из равенства  $E_n L = 2kT/q = 0.24$  В. На участках кристалла с малой общей длиной каналов ток определяется сопротивлением бездефектных областей. Основной вклад в ток опять внесут те участки, на которых суммарная длина каналов близка к толщине образца  $d$ . Здесь число каналов стремится к  $d/L$  и насыщение наступит при подаче на образец напряжения  $U = E_n d = 0.05d/L$ . В наших экспериментах  $E_n = (100 \div 1000$  В/см), что соответствует  $L = (5 \div 0.5)$  мкм.

Детальное сравнение с экспериментом требует более строгих расчетов. Выше мы не учитывали различия подвижностей нейтральных и ионизированных атомов, степени диссоциации и нелинейности проводимости от концентрации электролитического вещества и ряд других факторов.

4) В изолированных каналах изменения концентрации носителей могут быть обратимы. В поле концентрации падает за счет электролиза, при выключении поля она восстанавливается в результате растворения продуктов электролиза. Обратимые изменения  $N$ , очевидно, и приводят к переходным токам  $j_1, j_2$ . Эффективное действующее в последовательной цепи каналов напряжение складывается из внешнего ( $U$ ) и гальванического  $U_r = d/L$ . Последнее, как известно, возникает вследствие различия электрохимических потенциалов нейтрализованных веществ и жидкости.  $U_r$  представляет гальваническую разность потенциалов на одном канале. Мы приходим к выводу, что эквивалентная электрическая схема цепочки каналов представляет собой цепь последовательно соединенных аккумуляторов. При  $U > U_r$ , как известно, количество нейтрализованного вещества и, следовательно, перенесенного заряда насыщается.

Объяснение двух переходных токов, по-видимому, тоже надо искать в свойствах электролитов. Подвижности заряженных компонент электролитов, в которых растворителем является вода, как правило, близки, исключение составляют ионы  $H^+$  и  $OH^-$  [10]. Их подвижность на порядок выше подвижностей остальных ионов. Последние, по-видимому, обуславливают переходный ток с меньшим временем релаксации.

Таким образом, соответствие модельных выводов экспериментальным характеристикам заставляет признать реальность каналовых дефектов. Влияние этих дефектов значительно шире, чем рассмотрено в работе. Их наличием можно объяснить и увеличение проводимости с ростом частоты поля, и асимметрию проводимости вдоль оси  $C_6$ , и релаксационную поляризацию, вызывающую аномалию диэлектрической постоянной и ряд других, не нашедших объяснения особенностей  $\alpha$ - $LiIO_3$ . Кристаллов, не содержащих  $K$ -дефектов, пока не существует, на это указывает сходство характеристик в работах разных авторов. Ознакомление с  $K$ -дефектом только начинается, и, по-видимому, активные исследования позволят найти пути их устранения и выращивания бездефектных образцов.

#### Л и т е р а т у р а

[1] Якушев В. Г., Исаенко Л. И., Канаев И. Ф., Денькина Л. С. Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по росту кристаллов. Ереван: АН АССР, 1985. 178 с.



- [2] Иодат лития. Выращивание кристаллов, их свойства и применение. / Под общ. ред. С. В. Богданова. Новосибирск: Наука, 1980. 144 с.
- [3] Данилов А. А., Семенов А. В., Сидоров В. А. Вопросы радиоэлектроники (серия Общие вопросы радиоэлектроники). 1983, № 5, с. 107—109.
- [4] Блох О. Г., Величко И. А., Ладько Л. А. Кристаллография, 1975, т. 20, № 2, с. 430—432.
- [5] Litze R., Glesko W., Schroter M. Sol. St. Commun., 1977, vol. 23, N 1, p. 215—217.
- [6] Zhang Andung, Zhao Shifu, Xie Anyun, Xu Zheng-Yi. Acta physica sinica, 1980, vol. 29, N 9, p. 1159—1163.
- [7] Zhu Yung, Zhang Daojan. Acta physica sinica, 1980, vol. 29, N 4, p. 454—460.
- [8] Haussuhl S. Phys. St. Sol., 1968, Bd 29, N 1, S. K159—K162.
- [9] Yin-Yuan Li. Ferroelectrics, 1981, vol. 35, N 1, p. 167—172.
- [10] Робинсон Р., Стокс Р. Растворы электролитов. М.: ИЛ, 1963. 646 с.

Институт автоматизации и электрометрии  
СО АН СССР  
Новосибирск

Поступило в Редакцию  
24 июня 1987 г.