

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ /
PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2025. Т. 28, № 1. С. 25—33.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202503.639

УДК 621.315.61:537.226

Зависимость токов короткого замыкания от температуры в кристаллах α -LiIO₃

© 2025 г. В. Е. Умылин✉, Н. С. Козлова, Е. В. Забелина,
А. В. Корчагин, В. С. Петраков

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: v.umlin@misis.ru

Аннотация. Исследованы особенности протекания токов короткого замыкания в образцах полярных срезов кристаллов α -LiIO₃ гексагональной модификации. В качестве токопроводящих покрытий выбраны индий и серебро с учетом их расположения в ряду электрохимической напряженности металлов. Эти материалы покрытий являются типичными представителями электрохимического ряда напряженности металлов до (индий) и после (серебро) водорода. Измерения проводили на программно-аппаратном комплексе «СКИП» в температурном интервале от $T_{\text{комн}}$ до 210 °С без приложения внешнего электрического поля. Исследуемые образцы предварительно не подвергали никаким стимулирующим внешним воздействиям: ни температурным, ни электрическим, ни радиационным и т. п. Получены графики зависимостей токов короткого замыкания от температуры с различными материалами токопроводящих покрытий и по различным схемам измерений. Проведено оптическое исследование поверхности токопроводящих покрытий до и после нагрева. Установлено влияние материала токопроводящих покрытий на величину и направление протекания токов короткого замыкания в образцах. В случае с симметричными токопроводящими покрытиями в зависимости от нанесения индия или серебра токи идут в разном направлении. В случае с несимметричными токопроводящими покрытиями в зависимости от стороны нанесения серебра с учетом полярности кристалла, токи имеют разное направление протекания и величину, отличающуюся более чем в 2 раза. Различие графиков температурных зависимостей нагрева и охлаждения, а также структурное изменение поверхности материалов токопроводящих покрытий может свидетельствовать об образовании новых фаз.

Ключевые слова: монокристаллы, иодат лития, полярный срез, деградация поверхности, короткозамкнутый полярный кристалл, ток короткого замыкания, неравновесное состояние, стабильность работы, приэлектродные процессы

Благодарности: Исследования проводились при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания вузам FSME–2023–0003. Измерения проведены в аккредитованной межкафедральной учебно-испытательной лаборатории полупроводниковых материалов и диэлектриков «Монокристаллы и заготовки на их основе» (ИЛМЗ) НИТУ МИСИС.

Для цитирования: Умылин В.Е., Козлова Н.С., Забелина Е.В., Корчагин А.В., Петраков В.С. Зависимость токов короткого замыкания от температуры в кристаллах α -LiIO₃. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2025; 28(1): 25—33. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202503.639>

Temperature dependence of short-circuit currents in α -LiIO₃ crystals

V. E. Umylin✉, N. S. Kozlova, E. V. Zabelina, A. V. Korchagin, V. S. Petrakov

*National University of Science and Technology "MISIS",
4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation*

✉ Corresponding author: v.umlin@misis.ru

Abstract. The features of short-circuit currents in polar cut samples of α -LiIO₃ crystals of the hexagonal modification are investigated. Indium and silver are chosen as conductive coatings taking into account their location in the series of electrochemical tension of metals. These coating materials are typical representatives of the electrochemical series of metal tension before (indium) and after (silver) hydrogen. The measurements were carried out using the SKIP hardware and software complex in the temperature range from Troom to 210 °C without applying an external electric field. The samples under study were not preliminarily exposed to any stimulating external effects: neither temperature, nor electrical, nor radiation, etc. Graphs of short-circuit current dependences on temperature were obtained with different materials of conductive coatings and according to different measurement schemes. An optical study of the surface of conductive coatings was carried out before and after heating. The effect of the material of the conductive coatings on the magnitude and direction of short-circuit current flow in the samples was established. In the case of symmetrical conductive coatings, depending on the application of indium or silver, the currents go in different directions. In the case of asymmetrical conductive coatings, depending on the side of silver application, taking into account the polarity of the crystal, the currents have different directions of flow and a magnitude that differs by more than 2 times. The difference in the temperature dependence graphs of heating and cooling, as well as the structural change in the surface of the materials of conductive coatings, may indicate the formation of new phases.

Keywords: single crystals, lithium iodate, polar cut, surface degradation, short-circuited polar crystal, short-circuit current, nonequilibrium state, operational stability, near-electrode processes

Acknowledgments: The studies were carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment to universities FSME-2023-0003. The measurements were carried out in the accredited interdepartmental educational and testing laboratory of semiconductor materials and dielectrics "Single Crystals and Stock on their Base" of NUST MISIS.

For citation: Umylin V.E., Kozlova N.S., Zabelina E.V., Korchagin A.V., Petrakov V.S. Temperature dependence of short-circuit currents in α -LiIO₃ crystals. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki* = *Materials of Electronics Engineering*. 2025; 28(1): 25–33. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202503.639>

Введение

Величина и стабильность электрофизических параметров кристаллических элементов существенно влияют и даже определяют функциональные характеристики устройств и приборов, рабочими элементами которых они являются. В свою очередь, электрофизические параметры кристаллов сильно зависят от концентрации

и видов дефектных центров в них [1]. Измерение электрофизических параметров кристаллов и их температурных зависимостей в средневысоком (до 450 °C) и высоком (до 1000 °C) температурных диапазонах является необходимым для решения ряда задач:

– определение значений функциональных (рабочих) характеристик кристаллических элементов, в первую очередь таких, как удельное

электросопротивление $\rho_{эл}$ и удельная электропроводность σ [2];

- оценка стабильности и пределов работоспособности кристаллических элементов в различных температурных диапазонах;

- определение типа электропроводности и характеристик групп носителей зарядов в кристаллах [3].

Методы исследования этих параметров известны [1—4], их можно разделить на две группы: стационарные и релаксационные [3].

К стационарным относится, в частности, измерение температурных зависимостей удельной электропроводности (электросопротивления), к релаксационным — комплекс методов термоактивационной токовой спектроскопии. Эти методы позволяют исследовать диэлектрический кристалл непосредственно в том виде, в котором он входит в состав устройств: кристаллический срез с нанесенными на него токопроводящими покрытиями.

Термоактивационная токовая спектроскопия включают в себя следующие методы: приложение термостимулированного тока проводимости, термостимулированную поляризацию и термостимулированную деполяризацию. Эти методы осуществляются при нагреве с приложенным постоянным электрическим полем короткозамкнутого предварительно поляризованного или неполяризованного образца. В зависимости от метода изменение тока во внешней цепи обуславливается изменением концентрации неравновесных свободных носителей заряда или пространственным перераспределением подвижного заряда и ориентацией полярных молекул.

Как известно [5—8], в полярных кристаллах без дополнительных внешних воздействий на образцах, вырезанных перпендикулярно к полярной оси, при закорачивании электродов наблюдаются токи короткого замыкания (**ТКЗ**). При комнатной температуре значение ТКЗ составляет $\sim 10^{-15}$ А. В работах [9, 10] показано, что в процессе нагрева ТКЗ могут менять направление протекания и величину на порядки. Эти процессы могут влиять на рабочие характеристики готовых изделий и требуют дополнительного изучения.

Целью работы являлось исследование особенностей измерения электрофизических параметров в образцах полярных срезов кристаллов α -LiIO₃ и их анизотропию с различными материалами токопроводящих покрытий и по различным схемам измерений.

Образцы и методы исследования

Для измерения температурных зависимостей электрофизических параметров высокоомных ма-

териалов использовали программно-аппаратный комплекс «СКИП» со следующим оборудованием:

- электрометр высоких сопротивлений Keithley 6517A с возможностью измерения токовых сигналов от 10^{-16} А до 20 мА;

- высокотемпературная трубчатая электропечь ТК С0,55–1150.1ф с контроллером Термолукс–010 для автоматического регулирования температуры и скорости нагрева, рабочий диапазон печи до 1000 °С;

- термopара типа К в объеме печи;

- персональный компьютер с разъемами для подключения оборудования и специальным программным обеспечением «ИТКЗ–1.0».

Для исследования ТКЗ использовали модельный кристалл α -LiIO₃. Это известный материал [11—18], в твердой фазе которого могут существовать три модификации: орторомбическая γ , тетрагональная β и гексагональная α . α -LiIO₃ образует гексагональную кристаллическую решетку типа P6₃ (с двумя молекулами в элементарной ячейке). Структуру кристалла составляют ионы лития, окруженные шестью кислородными атомами в виде искаженного октаэдра LiO₆ и дискретные тригональные группы иодата IO₃ с симметрией 3. Рабочий интервал α -LiIO₃ ограничен 247 °С из-за реконструктивного фазового перехода из α - в γ -фазу, при которой кристалл полностью разрушается.

Были подготовлены образцы кристаллов α -LiIO₃, рабочие грани которых перпендикулярны оси шестого порядка (Z-срезы) — полярный пьезоактивный срез, толщина образцов составляет ~ 2 мм.

Полярность поверхностей образцов (+) или (–) определяли с помощью пьезотестера. Токопроводящие покрытия для измерений выбирали с учетом электрохимической напряженности металлов [19]. Образцы предварительно не подвергали никаким стимулирующим внешним воздействиям: ни температурным, ни электрическим, ни радиационным и т. п.

В качестве токопроводящих покрытий используются различные материалы [20—28]. Для измерений выбрали индий и серебро (In и Ag): индий — типичный представитель электрохимического ряда напряженности металлов до водорода, а серебро — после водорода.

Перед нанесением электродов каждый образец отмывали в ультразвуковой ванне с изопропиловым спиртом. Далее процесс нанесения токопроводящего покрытия зависел от металла, из которого оно изготавливалось.

Для серебряных токопроводящих покрытий использовали серебряную пасту, которую наносили на кристалл α -LiIO₃, а для индиевых токопроводящих покрытий — индиевую фольгу.

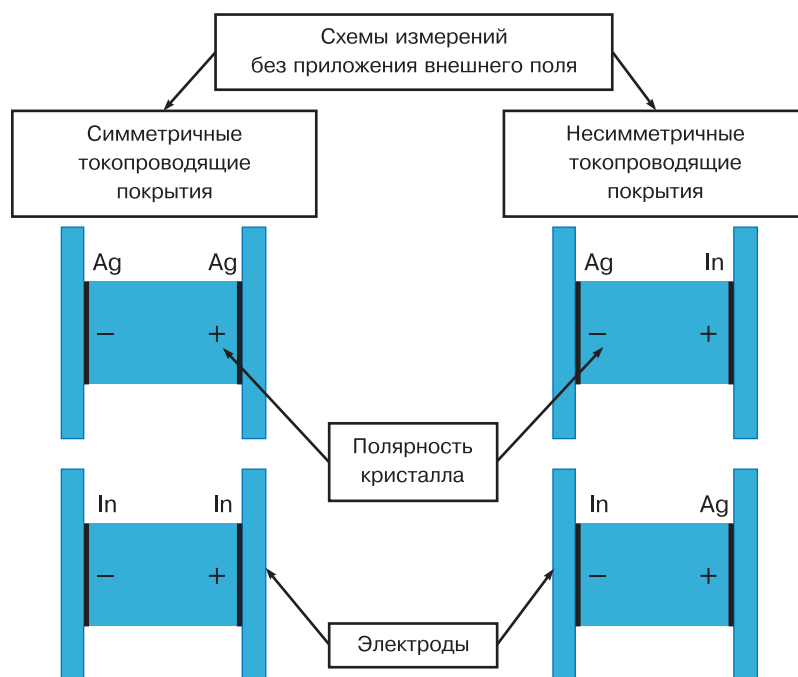


Рис. 1. Схемы измерения образцов без приложения внешнего поля
Fig. 1. Schemes for measuring samples without applying an external field

Токопроводящие покрытия наносили на образцы по двум схемам:

- симметричная, когда на обе стороны образца наносили одинаковые материалы токопроводящих покрытий: In(+) In(-), Ag(+) Ag(-);
- несимметричная, когда In и Ag наносили на разные стороны образца в зависимости от пьезоотклика поверхности: Ag(+) In(-), In(+) Ag(-).

Исследования ТКЗ проводили без приложения внешнего электрического поля в диапазоне температур от комнатной до 210 °С в силу наличия реконструктивного фазового перехода (рис. 1).

Результаты и их обсуждение

Симметричные токопроводящие покрытия. Результаты измерений температурных зависимостей ТКЗ образцов с симметричными токопроводящими In- и Ag- покрытиями без приложения внешнего электрического поля представлены на рис. 2.

При нагреве в образце с токопроводящими In-покрытиями (см. рис. 2, а) ТКЗ фиксируются, начиная с температуры ~197 °С, и уходят в положительную сторону, достигнув во время нагрева максимального значения 120 нА при температуре ~210 °С. В процессе охлаждения ТКЗ сначала растет, достигая величины 170 нА при ~204 °С, затем плавно снижается и перестает фиксироваться при температуре ~130 °С и ниже.

В образце с токопроводящими Ag-покрытиями (см. рис. 2, б) при нагреве ТКЗ фиксируются, начиная с температуры ~90 °С, и уходят в отрицательную сторону, достигая величины ~574 нА при температуре ~210 °С. Зависимость ТКЗ при ох-

лаждении практически совпадает с зависимостью при нагревании, однако, значения ТКЗ перестают фиксироваться при температуре ~130 °С.

В зависимости от выбранного материала токопроводящих покрытий при нагреве токи идут в разные стороны: с In в положительную, с Ag в отрицательную. При этом абсолютные значения токов на образце с токопроводящими Ag-покрытиями в 4 раза выше, чем на образце с токопроводящими In-покрытиями. На обоих образцах при схожих температурах ~200—210 °С наблюдаются максимумы значений ТКЗ, с последующим возвращением к исходным значениям при остывании образцов.

Несимметричные токопроводящие покрытия.

Результаты измерений температурных зависимостей ТКЗ на образцах α -LiIO₃ с несимметричными токопроводящими покрытиями по схеме Ag(+) In(-) и In(+) Ag(-) представлены на рис. 3.

При нагреве образца Ag(+) In(-) ТКЗ начинают фиксировать при температуре ~90 °С, токи протекают в положительную сторону и достигают значения ~132 нА при температуре ~170 °С, затем наблюдается резкое увеличение токов до ~380 нА при температуре ~176 °С, после этого токи снижаются до ~350 нА при 210 °С.

При охлаждении этого образца наблюдается резкий спад величины ТКЗ до ~110 нА при температуре ~198 °С, а затем ТКЗ плавно снижаются и перестают фиксироваться при температуре ~140 °С.

При нагреве образца In(+) Ag(-) ТКЗ начинают фиксировать при температурах ~100 °С, токи протекают в отрицательную сторону и достигают ~216 нА при температуре ~170 °С, затем наблюдается резкое увеличение токов до ~808 нА при тем-

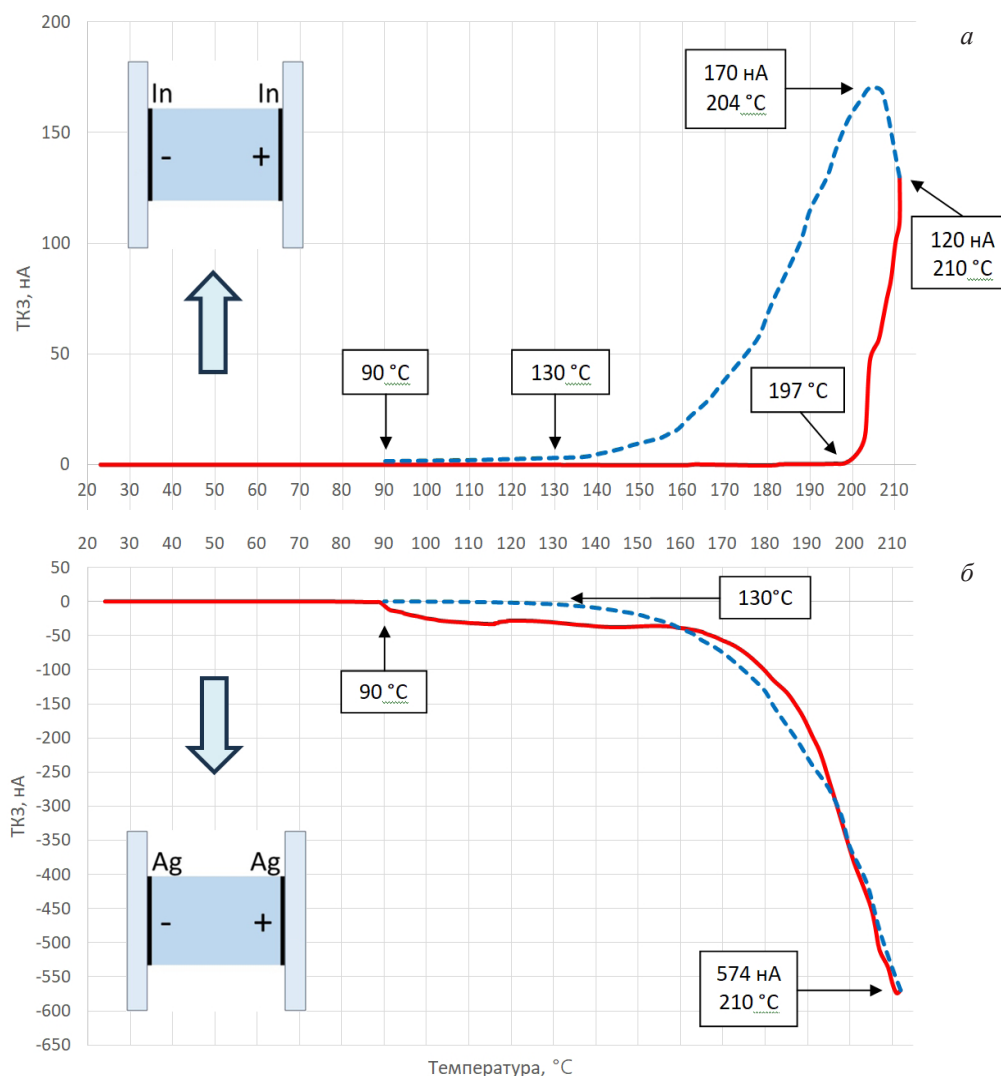


Рис. 2. Температурные зависимости ТКЗ образцов α -LiIO₃ с симметричными токопроводящими In- (а) и Ag- (б) покрытиями
Fig. 2. Temperature dependences of the short-circuit current of α -LiIO₃ samples with symmetrical conductive In- (a) and Ag- (б) coatings

пературе ~ 187 °C, после этого токи снижаются до ~ 520 нА при 210 °C.

При охлаждении сначала наблюдается незначительное повышение ТКЗ до ~ 570 нА при ~ 205 °C, затем снижение ТКЗ до ~ 100 нА при температуре ~ 185 °C, а затем ТКЗ плавно снижаются и перестают фиксироваться при температуре ~ 140 °C.

В зависимости от стороны нанесения токопроводящего Ag-покрытия и полярности образца ТКЗ имеют разное направление протекания. В случае Ag-покрытия на положительной стороне токи имеют положительное направление, а при Ag на отрицательной стороне токи имеют отрицательное направление.

Максимумы значений ТКЗ на обоих образцах совпадают, так как фиксировались при схожих температурах ~ 180 °C. При этом в случае нанесения Ag на отрицательную сторону абсолютное значение ТКЗ было в 2 раза больше, чем на образце с Ag на положительной стороне.

Температурные зависимости ТКЗ при нагреве и охлаждении не совпадают, что, по-видимому, свидетельствует об образовании в процессе нагрева новых фаз, которые теперь определяют процессы.

Токопроводящие покрытия до и после нагрева были исследованы с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Imager M1m при увеличении $\times 50$ и $\times 20$ в отраженном свете.

На поверхности индиевого (рис. 4) и серебряного (рис. 5) токопроводящих покрытий после температурных исследований наблюдаются структурные изменения, что может свидетельствовать об образовании новых фазовых соединений.

Заключение

Получены первые результаты измерений температурных зависимостей ТКЗ на образцах α -LiIO₃ с токопроводящими покрытиями. Установлено, что

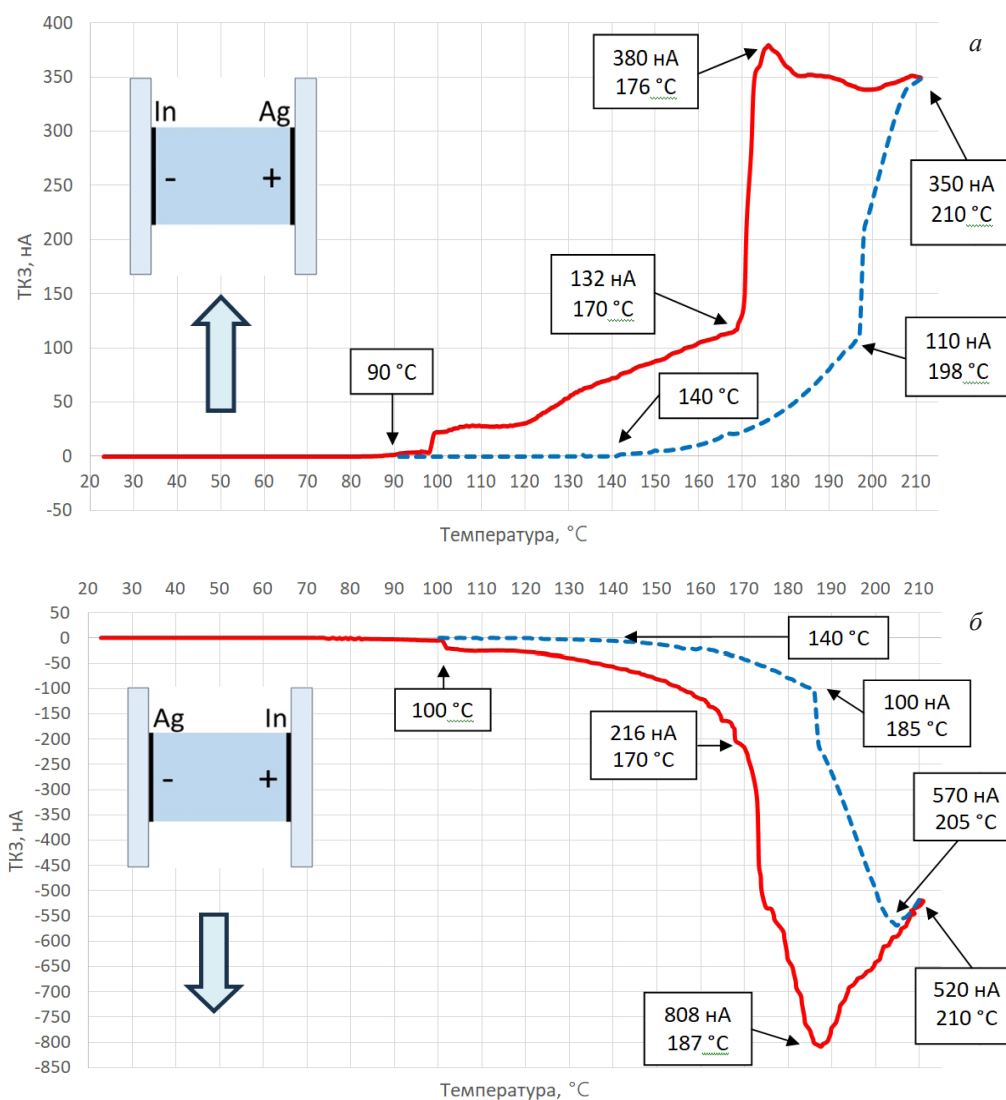


Рис. 3. Температурные зависимости ТКЗ образцов α -LiIO₃ с несимметричными токопроводящими покрытиями: а — при нанесении Ag на положительную сторону (+), а In на отрицательную сторону (-); б — при нанесении Ag на отрицательную сторону (-), а In на положительную сторону (+)

Fig. 3. Temperature dependences of the short-circuit current of α -LiIO₃ samples with asymmetric conductive coatings: (a) when applying Ag to the positive side (+), and In to the negative side (-); (б) when applying Ag to the negative side (-), and In to the positive side (+)

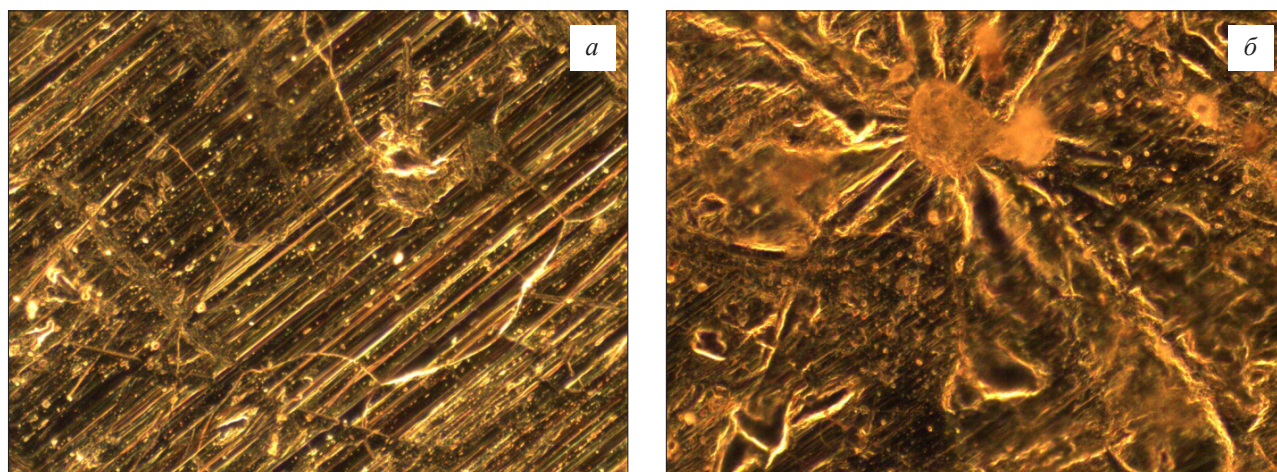


Рис. 4. Поверхность индиевого (In) токопроводящего покрытия до (а) и после (б) нагрева при увеличении $\times 50$ в отраженном свете

Fig. 4. Surface of indium (In) conductive coating before (a) and after (б) heating at $\times 50$ magnification in reflected light

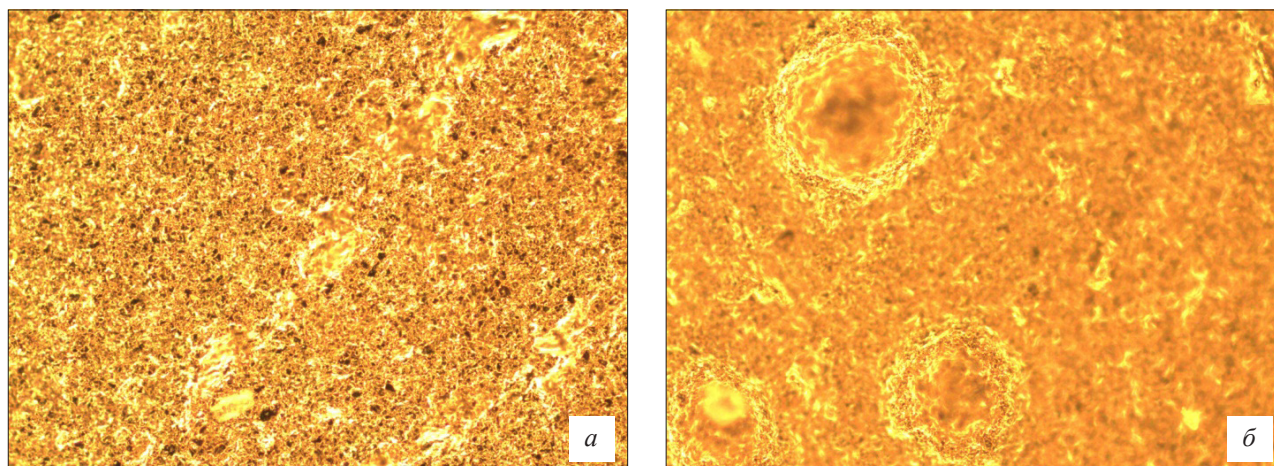


Рис. 5. Поверхность серебряного (Ag) токопроводящего покрытия до (а) и после (б) нагрева при увеличении $\times 20$ в отраженном свете

Fig. 5. Surface of silver (Ag) conductive coating before (a) and after (b) heating at $\times 20$ magnification in reflected light

величина и направление протекания токов зависят от материала токопроводящего покрытия и полярности стороны их нанесения на образец.

В образцах с несимметричными токопроводящими покрытиями характер температурных зависимостей ТКЗ для In- и Ag-покрытий различный, при этом для образцов с серебряным покрытием наблюдается существенно более высокие значения ТКЗ.

Температурные зависимости охлаждения и нагрева не совпадают, что свидетельствует, по-видимому, об образовании новых фаз и невоспроизводимости процессов. После нагрева и охлаждения кристаллы не возвращаются в исходное состояние.

Исследование образцов методами оптической микроскопии показало изменение состояния поверхности токопроводящих покрытий, что, в свою очередь, может также свидетельствовать об образовании новых фаз.

Библиографический список

1. Гороховатский Ю.А., Бордовский Г.А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука; 1991. 244 с.
2. ГОСТ 30501–97. Материалы электроизоляционные твердые. Метод измерения электрического сопротивления и удельного электрического сопротивления при повышенных температурах. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; 2001. 7 с.
3. Поплавко Ю.М. Физика диэлектриков. Киев: Вища школа; 1980. 399 с.
4. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. М.: Радио и связь; 1989. 287 с.
5. Блистанов А.А., Козлова Н.С., Гераськин В.В. Влияние поверхностных состояний на особенности фазовых превращений и формирование структурных дефектов в кристаллах иодата лития. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1996; (4): 66–71.
6. Blistanov A.A., Kozlova N.S., Geras'kin V.V. The phenomenon of electrochemical self-decomposition in polar dielectrics. *Ferroelectrics*. 1997; 198(1): 61–66. <https://doi.org/10.1080/00150199708228338>
7. Йовчева Т.А. Влияние переноса заряда на деградации кристалла α -LiIO₃. Автореф. дисс. канд физ-мат. наук. М.; 1992. 21 с.
8. Блистанов А.А., Козлова Н.С., Гераськин В.В. Явление электрохимического разложения полярных диэлектрических кристаллов. В: *Сб. кратких описаний научных открытий – 2002 г., Выпуск 2. Диплом № 216*. М.: НИТУ «МИСиС»; 2002.
9. Бузанов О.А., Забелина Е.В., Козлова Н.С. Приэлектродные процессы в кристаллах лантан-галлиевого танталата. *Кристаллография*. 2008; 53(5): 903–907.
10. Козлова Н.С., Забелина Е.В., Быкова М.Б., Козлова А.П. Особенности проявления поверхностных электрохимических процессов в сегнетоэлектрических кристаллах с низкотемпературными фазовыми переходами. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2018; 21(3): 146–155. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2018-3-146-155>
11. Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСиС; 2000. 432 с.
12. Портнов О.Г. Технология объемных монокристаллов полупроводников и диэлектриков. Выращивание технологичных монокристаллов иодата лития для устройств нелинейной оптики. М.: Изд. Дом НИТУ «МИСиС»; 2015. 143 с.
13. Авдиенко К.И., Богданов С.В., Архипов С.М., Кидяров Б.И. Иодат лития: Выращивание кристаллов, их свойства и применение. Под ред. С.В. Богданова. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние; 1980. 144 с.
14. De Boer J.L., Van Bolhuis F., Olthof-Hazekamp R.V. Re-investigation of the crystal structure of lithium iodate. *Acta Crystallographica*. 1966; 21(5): 841–843. <https://doi.org/10.1107/S0365110X66004031>
15. Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Переломова Н.В. Акустические кристаллы. Под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука; 1982. 356 с.

16. Переломова Н.В., Тагиева М.М. Кристаллофизика. М.: Изд. Дом НИТУ «МИСиС»; 2013. 408 с.
17. Пирозерский А.Л., Чарная Е.В., Залесский В.Г., Лебедева Е.Л., Филиппов К.В. Диэлектрические исследования кристаллов α -LiIO₃, выращенных из нейтральных и щелочных растворов. *Физика твердого тела*. 2009; 51(4): 670—674.
18. Корольков Д.В. Основы неорганической химии. М.: Просвещение; 1982. 271 с.
19. Шпортенко А.С., Кубасов И.В., Кислюк А.М., Туртин А.В., Малинкович М.Д., Пархоменко Ю.Н. Влияние контактных явлений на измерение электропроводности восстановленного ниобата лития. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2021; 24(3): 199—210. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-3-199-210>
20. Jen S., Bobkowsky R. Black lithium niobate SAW device fabrication and performance evaluation. In: *Proc. IEEE ultrasonics symposium. October 22–25, 2000 San Juan, PR, USA*; 2000. P. 269—273. <https://doi.org/10.1109/ultrsym.2000.922554>
21. Palatnikov M.N., Sandler V.A., Sidorov N.V., Markarova O.V., Manukovskaya D.V. Conditions of application of LiNbO₃ based piezoelectric resonators at high temperatures. *Physics Letters A*. 2020; 384(14): 126289. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126289>
22. Singh K. Electrical conductivity of non-stoichiometric LiNbO₃ single crystals. *Ferroelectrics*. 2004; 306(1): 79—92. <https://doi.org/10.1080/00150190490457348>
23. Yatsenko A.V., Pritulenko A.S., Yevdokimov S.V., Sugak D.Y., Syvorotka I.I., Suhak Y.D., Solskii I.M., Vakhiv M.M. The influence of annealing in saturated water vapor on LiNbO₃ crystals optical and electrical properties. *Solid State Phenomena*. 2015; 230: 233—237. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.230.233>
24. Ахмадуллин И.Ш., Голенищев-Кутузов В.А., Мигачев С.А., Миронов С.П. Низкотемпературная электропроводность кристаллов ниобата лития конгруэнтного состава. *Физика твердого тела*. 1998; 40(7): 1307—1309.
25. Schröder M., Haußmann A., Thiessen A., Söergel E., Woike T., Eng L.M. Conducting domain walls in lithium niobate single crystals. *Advanced Functional Materials*. 2012; 22(18): 3936—3944. <https://doi.org/10.1002/adfm.201201174>
26. Yatsenko A.V., Yevdokimov S.V., Pritulenko A.S., Sugak D.Y., Solskii I.M. Electrical properties of LiNbO₃ crystals reduced in a hydrogen atmosphere. *Physics of the Solid State*. 2012; 54(11): 2231—2235. <https://doi.org/10.1134/S1063783412110339>
27. Esin A.A., Akhmatkhanov A.R., Shur V.Y. The electronic conductivity in single crystals of lithium niobate and lithium tantalate family. *Ferroelectrics*. 2016; 496(1): 102—109. <https://doi.org/10.1080/00150193.2016.1157438>

References

1. Gorokhovatskii Yu.A., Bordovskii G.A. Thermally activated current spectroscopy of high-resistance semiconductors and dielectrics. Moscow: Nauka; 1991. 244 p. (In Russ.)
2. GOST 30501–97. Solid electrical insulating materials. Method of measuring electrical resistance and resistivity at elevated temperatures. Minsk: Mezhsudarstvennyi sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii; 2001. 7 p. (In Russ.)
3. Poplavko Yu.M. Physics of dielectrics. Kiev: Vishcha shkola; 1980. 399 p. (In Russ.)
4. Rez I.S., Poplavko Yu.M. Dielectrics. Basic properties and applications in electronics. Moscow: Radio i svyaz; 1989. 287 p. (In Russ.)
5. Blistanov A.A., Kozlova, N.S., Geras'kin V.V. The influence of surface states on the features of phase transformations and the formation of structural defects in lithium iodate crystals. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 1996; (4): 66—71. (In Russ.)
6. Blistanov A.A., Kozlova N.S., Geras'kin V.V. The phenomenon of electrochemical self-decomposition in polar dielectrics. *Ferroelectrics*. 1997; 198(1): 61—66. <https://doi.org/10.1080/00150199708228338>
7. Iovcheva T.A. Effect of charge transfer on the degradation of α -LiIO₃ crystal. Sum. of Diss. Cand. (Phys.–Math.). Moscow; 1992. 21 p. (In Russ.)
8. Blistanov A.A., Kozlova N.S., Geras'kin V.V. Phenomenon of electrochemical decomposition of polar dielectric crystals. In: *Proceed. of brief descriptions of scient. discoveries – 2002. Issue 2. Diplom No. 216*. Moscow: NITU "MISIS"; 2002.
9. Buzanov O.A., Zabelina E.V., Kozlova N.S., Sagalova T.B. Near-electrode processes in lanthanum–gallium tantalate crystals. *Crystallography Reports*. 2008; 53(5): 853—857.
10. Kozlova N.S., Zabelina E.V., Bykova M.B., Kozlova A.P. Features of manifestation of surface electrochemical processes in ferroelectric crystals with low-temperature phase transitions. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2018; 21(3): 146—155. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2018-3-146-155>
11. Blistanov A.A. Crystals of quantum and nonlinear optics. Moscow: MISIS; 2000. 432 p. (In Russ.)
12. Portnov O.G. Technology of bulk single crystals of semiconductors and dielectrics. Growing technological single crystals of lithium iodate for nonlinear optics devices. Moscow: Izd. Dom NITU "MISIS"; 2015. 142 p. (In Russ.)
13. Bogdanov S.V. (ed.). Avdienko K.I., Bogdanov S.V., Arkhipov S.M.; Kidyarov B.I. Lithium iodate: Growing crystals, their properties and applications. Novosibirsk: Nauka: Sib. otd.-nie; 1980. 144 p. (In Russ.)
14. De Boer J.L., Van Bolhuis F., Olthof–Hazekamp R.V. Re-investigation of the crystal structure of lithium iodate. *Acta Crystallographica*. 1966; 21(5): 841—843. <https://doi.org/10.1107/S0365110X66004031>
15. Shaskol'skaya M.P. (ed.). Blistanov A.A., Bondarenko V.S., Perelomova N.V. Acoustic crystals. Moscow: Nauka; 1982. 356 p. (In Russ.)
16. Perelomova N.V., Tagieva M.M. Crystal physics. Moscow: Izd. Dom NITU "MISIS"; 2013. 408 p. (In Russ.)
17. Pirozerski A.L., Charnaya E.V., Lebedeva E.L., Filippov K.V., Zaleski V.G. Dielectric studies of α -LiIO₃ crystals grown from neutral and alkaline solutions. *Physics of the Solid State*. 2009; 51(4): 708—713.
18. Korol'kov D.V. Fundamentals of inorganic chemistry. Moscow: Prosveshchenie; 1982. 271 p. (In Russ.)
19. Shportenko A.S., Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Turutin A.V., Malinkovich M.D., Parkhomenko Yu.N. The effect of contact phenomena on the measurement of electrical

conductivity of reduced lithium niobate. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2021; 24(3): 199—210. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-3-199-210>

20. Jen S., Bobkowski R. Black lithium niobate SAW device fabrication and performance evaluation. In: *Proc. IEEE ultrasonics symposium. October 22–25, 2000 San Juan, PR, USA*; 2000. P. 269—273. <https://doi.org/10.1109/ultrsym.2000.922554>

21. Palatnikov M.N., Sandler V.A., Sidorov N.V., Markarova O.V., Manukovskaya D.V. Conditions of application of LiNbO₃ based piezoelectric resonators at high temperatures. *Physics Letters A*. 2020; 384(14): 126289. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126289>

22. Singh K. Electrical conductivity of non-stoichiometric LiNbO₃ single crystals. *Ferroelectrics*. 2004; 306(1): 79—92. <https://doi.org/10.1080/00150190490457348>

23. Yatsenko A.V., Pritulenko A.S., Yevdokimov S.V., Sugak D.Y., Syvorotka I.I., Suhak Y.D., Soliskii I.M., Vakiv M.M. The influence of annealing in saturated water vapor on LiNbO₃ crystals optical and electrical properties.

Solid State Phenomena. 2015; 230: 233—237. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.230.233>

24. Akhmadullin I.Sh., Golenishchev-Kutuzov V.A., Migachev S.A., Mironov S.P. Low-temperature electrical conductivity of congruent lithium niobate crystals. *Physics of the Solid State*. 1998; 40(7): 1190—1192.

25. Schröder M., Haußmann A., Thiessen A., Sörgel E., Woike T., Eng L.M. Conducting domain walls in lithium niobate single crystals. *Advanced Functional Materials*. 2012; 22(18): 3936—3944. <https://doi.org/10.1002/adfm.201201174>

26. Yatsenko A.V., Yevdokimov S.V., Pritulenko A.S., Sugak D.Y., Soliskii I.M. Electrical properties of LiNbO₃ crystals reduced in a hydrogen atmosphere. *Physics of the Solid State*. 2012; 54(11): 2231—2235. <https://doi.org/10.1134/S1063783412110339>

27. Esin A.A., Akhmatkhanov A.R., Shur V.Y. The electronic conductivity in single crystals of lithium niobate and lithium tantalate family. *Ferroelectrics*. 2016; 496(1): 102—109. <https://doi.org/10.1080/00150193.2016.1157438>

Информация об авторах / Information about the authors

Умылин Владислав Евгеньевич — аспирант, инженер научного проекта, лаборатория «Монокристаллы и заготовки на их основе», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1447-3310>; e-mail: v.umylin@mail.ru

Козлова Нина Семеновна — канд. физ.-мат. наук, ведущий эксперт, лаборатория «Монокристаллы и заготовки на их основе», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4057-9718>; e-mail: kozlova_nina@mail.ru

Забелина Евгения Викторовна — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией «Монокристаллы и заготовки на их основе», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5844-5673>; e-mail: zabelina.ev@misiss.ru

Корчагин Александр Владимирович — лаборант-исследователь, лаборатория «Монокристаллы и заготовки на их основе», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5466-3125>; e-mail: korchagin.av@edu.misis.ru

Петраков Валерий Сергеевич — канд. тех. наук, доцент, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3096-2812>; e-mail: petrakov.valery@gmail.com

Vladislav E. Umylin — Postgraduate Student, Scientific Project Engineer Laboratory “Single Crystals and Stock on their Base”, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1447-3310>; e-mail: v.umylin@mail.ru

Nina S. Kozlova — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Leading Expert, Laboratory “Single Crystals and Stock on their Base”, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4057-9718>; e-mail: kozlova_nina@mail.ru

Evgenia V. Zabelina — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Head of the Laboratory “Single Crystals and Stock on their Base”, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5844-5673>; e-mail: zabelina.ev@misiss.ru

Alexander V. Korchagin — Laboratory Researcher, Laboratory “Single Crystals and Stock on their Base”, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5466-3125>; e-mail: korchagin.av@edu.misis.ru

Valery S. Petrakov — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3096-2812>; e-mail: petrakov.valery@gmail.com

Поступила в редакцию 06.03.2025; поступила после доработки 02.04.2025; принята к публикации 08.04.2025

Received 6 March 2025; Revised 2 April 2025; Accepted 8 April 2025

* * *