

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ДИЭЛЕКТРИКИ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. DIELECTRICS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2021. Т. 24, № 1. С. 34—39.
DOI: 10.17073/1609-3577-2021-1-34-39

УДК 621.315

Особенности высокотемпературной монодоменизации конгруэнтных сегнетоэлектрических кристаллов твердого раствора $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$

© 2021 г. А. А. Мололкин^{1,2,§}, Д. В. Рощупкин¹, Е. В. Емелин¹, Р. Р. Фахртдинов¹

¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов
Российской академии наук,
ул. Академика Осипяна, д. 6, Черноголовка, Московская область, 142432, Россия*

² *АО «Фомос–Материалы»,
ул. Буженинова, д. 16, Москва, 105023, Россия*

Аннотация. Ниобат и танталат лития относятся к важнейшим и наиболее широко применяемым материалам в акустооптике и акустоэлектронике. Эти материалы обладают большими значениями пьезоэлектрических констант, что позволяет использовать их в качестве актюаторов. Однако их использование ограничено термической неустойчивостью кристалла ниобата лития и низкой температурой Кюри T_C кристалла танталата лития. Преодолеть эти недостатки, характерные для отдельных соединений, можно путем получения кристаллов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$. Методом Чохральского выращены кристаллы $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ хорошего качества. Проведены сравнительные исследования особенностей высокотемпературной монодоменизации кристаллов $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$. Продемонстрированы основные отличия в технологических режимах при монодоменизации конгруэнтных кристаллов $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ от конгруэнтных кристаллов LiNbO_3 . Представлены параметры высокотемпературной электродиффузионной обработки кристаллов $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$, позволяющие получать монодоменированные кристаллы для дальнейшего изучения их физических свойств.

Ключевые слова: ниобат лития, танталат лития, сегнетоэлектрические кристаллы, высокотемпературная монодоменизация, выращивание кристаллов, актюаторы

Введение

Развитие акустоэлектронных устройств, позволяющих передавать и обрабатывать акустические сигналы в режиме реального времени, в первую очередь связано с поиском новых материалов, которые обладают хорошими акустическими свойствами [1—3]. В этом случае большой интерес представляют сегнетоэлектрические кристаллы LiNbO_3 и LiTaO_3 .

Эти материалы обладают большими значениями пьезоэлектрических констант, что позволяет использовать их в качестве актюаторов [4—6]. Однако их использование ограничено термической неустойчивостью кристалла ниобата лития и низкой температурой Кюри T_C кристалла танталата лития. Выращивание кристаллов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ должно помочь преодолеть подобные недостатки, характерные для отдельных соединений.

Выращиванию кристаллов твердых растворов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ были посвящено, например, работы [7—9]. Однако получить кристаллы $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ хорошего качества для исследования их физических свойств не удавалось. Все попытки по выращиванию кристаллов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ заканчивались получением кристаллов с большим количеством дефектов: трещины, двойники, газовые включения, поры.

Мололкин Анатолий Анатольевич^{1,2,§} — заместитель начальника производства АО «Фомос–Материалы», e-mail: Anatoli.mololkin.sooth@mail.ru; **Рошупкин Дмитрий Валентинович**¹ — доктор физ.–мат. наук, директор ИПТМ РАН, e-mail: rochtch@iptm.ru; **Емелин Евгений Валерьевич**¹ — канд. физ.–мат. наук, научный сотрудник; **Фахртдинов Рашид Рашидович**¹ — канд. физ.–мат. наук, научный сотрудник, e-mail: fakhrt@gmail.com

§ Автор для переписки

В работе [10] представлены результаты по выращиванию кристаллов сложных растворов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ методом Чохральского, причем размер и качество полученных кристаллов позволили исследовать их структурные и физические свойства. Сегнетоэлектрические кристаллы $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ были выращены методом Чохральского. Однако в процессе роста сформировался полидоменный кристалл, что является энергетически выгодным состоянием для сегнетоэлектрического кристалла. Для формирования монодоменного кристалла синтезированный полидоменный кристалл нагревают до температуры Кюри и прикладывают электрическое поле вдоль направления полярной оси Z , осуществляя процесс монодоменизации. Стоит обратить внимание, что температуры Кюри для соединений фазовой диаграммы LiNbO_3 — LiTaO_3 [10] существенно отличаются. Так T_C для стехиометрических кристаллов LiNbO_3 составляет 1190°C , а для стехиометрических кристаллов LiTaO_3 — 660°C . Эти различия в T_C необходимо учитывать при процессе монодоменизации кристаллов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$.

Таким образом, изучение особенностей и технологических режимов электротермической обработки кристаллов, позволяющей достигать бездефектного сильно униполярного состояния кристаллов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ в зависимости от соотношения изоморфных катионов Nb/Ta , является актуальной задачей. Наиболее интересной и сложной задачей является монодоменизация кристаллов твердых растворов с соотношением изоморфных катионов $1:1$, так как параметры высокотемпературной монодоменизации будут максимально отличаться от параметров для краевых соединений LiNbO_3 и LiTaO_3 .

Выращивание кристаллов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$

Кристаллы $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ выращивали методом Чохральского в модифицированной установке НИКА-3М с индукционным типом нагрева и авто-



Рис. 1. Кристалл $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$, выращенный вдоль полярной оси Z

Fig. 1. $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ crystal grown along the polar Z axis

матическим контролем диаметра кристалла. Для выращивания кристаллов использовали платиновый тигель диаметром 60 мм и высотой 60 мм , вытягивание осуществляли вдоль полярной оси Z . У кристаллов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ температура Кюри, при которой происходит переход из парафазы в сегнетофазу, лежит в диапазоне температур от 607 до 1190°C и зависит в первую очередь от соотношения катионов Nb/Ta .

Были выращены небольшие кристаллы хорошего качества $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$. На рис. 1 приведено изображение выращенного кристалла $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$. Диаметр цилиндрической части кристалла варьировался в диапазоне 12 — 14 мм , длина цилиндрической части составила 14 мм .

Высокотемпературная монодоменизация кристаллов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$

После ростового процесса кристалл $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ является полидоменным вследствие того, что это состояние соответствует минимуму энергии полярного кристалла. Тогда как в акустоэлектронике используют кристаллы с совершенной кристаллической структурой. Следовательно, необходимо осуществить процесс монодоменизации, которая является ключевой послеростовой операцией. Ее осуществляют с целью формирования униполярного состояния кристалла, а также для избавления от макро- и микродефектной структуры сегнетоэлектрических кристаллов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ за счет электродиффузионных процессов.

Технологические режимы и особенности высокотемпературной монодоменизации конгруэнтных нелегированных кристаллов LiNbO_3 и LiTaO_3 описаны, например, в работах [11—13]. Также достаточно подробно исследованы процессы монодоменизации конгруэнтных легированных кристаллов LiNbO_3 [14, 15]. Из-за невозможности получения кристаллов $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ без пор и трещин в литературе отсутствуют данные по технологическим режимам высокотемпературной монодоменизации этих кристаллов. Перед процессом монодоменизации кристалл торцевался и шлифовался с нижней и верхней части, чтобы поверхность кристалла не имела отклонений по плоскостности. Высокотемпературную электродиффузионную обработку проводили в печи с программным управлением. В камере печи устанавливали керамическую подставку из аллунда, на которой размещался платиновый электрод в виде пластины. На электрод устанавливали шлифованную плоскопараллельную пластину LiNbO_3 , которая предотвращала сплавление электрода с кристаллом и обеспечивала максимальный контакт с ним. Сверху на пластину устанавливали кристалл $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$, на него помещали плоскопараллельную пластину LiNbO_3 . После чего на пластину устанавливали пла-

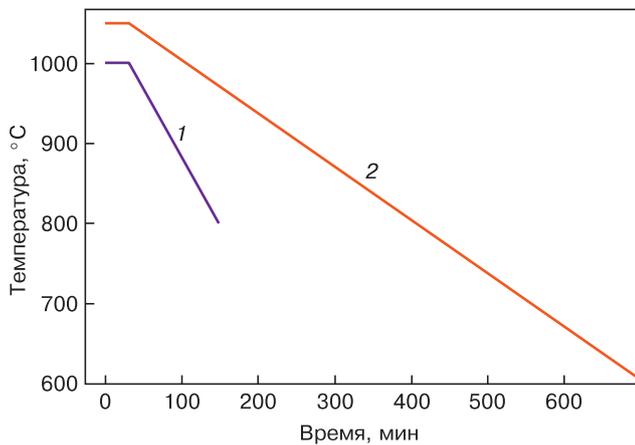


Рис. 2. Технологическая схема режима монодоменизации кристаллов $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ конгруэнтного состава: 1 — стандартный режим, применяемый к кристаллам ниобата лития конгруэнтного состава с учетом геометрических размеров кристалла и $T_C \approx 900^\circ\text{C}$; 2 — адаптированный режим монодоменизации для кристалла $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$

Fig. 2. Congruent $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ crystal monodomainization process mode: (1) conventional mode used for congruent lithium niobate crystals taking into account crystal dimensions and $T_C \approx 900^\circ\text{C}$; (2) monodomainization process mode adapted to $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$

тиновый электрод в виде пластины. Затем электроды соединяли с источником питания.

На рис. 2, кривая 1 представлена схема режима монодоменизации кристалла $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ конгруэнтного состава под электрическим полем, с учетом геометрических размеров кристалла и $T_C \approx 900^\circ\text{C}$, осуществленная по стандартному технологическому процессу, применяемому к конгруэнтным кристаллам LiNbO_3 . Стандартный технологический процесс состоит из нескольких этапов:

- нагрев до температуры $\sim 1000^\circ\text{C}$ и выдержка в течение ~ 30 мин. при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$;
- подключение электрического напряжения и выдержка образца под током в течение ~ 30 мин.;
- охлаждение под напряжением со скоростью 100 K/ч до температуры $\sim 800^\circ\text{C}$;
- отключение напряжения и продолжение охлаждения до комнатной температуры с той же скоростью.

Положительный электрод источника напряжения подключали к нижней части кристалла, которая ближе к концу выращенного кристалла, а отрицательный — к верхней его части, которая находится ближе всего к затравке. Значение тока монодоменизации рассчитывали таким образом, чтобы плотность тока на контактной поверхности не превышала 2 mA/cm^2 . Процесс проходил в режиме стабилизации тока, ток монодоменизации составлял 1 mA .

Исследования макро- и микродефектной структуры проводили оптическим методом на исследовательском видеомикроскопе Нирох КН-8700. Исследуемые образцы после процесса высокотемпературной электротермической обработки шлифовали, поли-

ровали и подвергали химическому травлению при комнатной температуре в течение 2 ч в плавиковой кислоте HF. На рис. 3, а представлена микроструктура верхней части кристаллического образца, которая содержала единичные многогранные микродомены противоположного знака, что свидетельствует о высокой степени униполярности доменной структуры. На рис. 3, б представлена микроструктура нижней части кристаллического образца, которая осталась полидоменной, что говорит о необходимости существенно больших энергетических и временных затрат для полной монодоменизации кристалла $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$.

На рис. 2, б представлена схема адаптированного режима монодоменизации кристалла $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$. Основные отличия от стандартной технологии заключались в следующем:

- продолжительность выдержки при приложении электрического поля выбирали с учетом геометрических размеров (для образцов диаметром до 20 мм и длиной до 30 мм время выдержки под полем составило 30 мин.);
- температуру выдержки для кристаллов твердых растворов $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ подбирали исходя из фазовой диаграммы $\text{LiNbO}_3\text{—LiTaO}_3$ [7] (для более эффективного твердофазного электролиза необ-

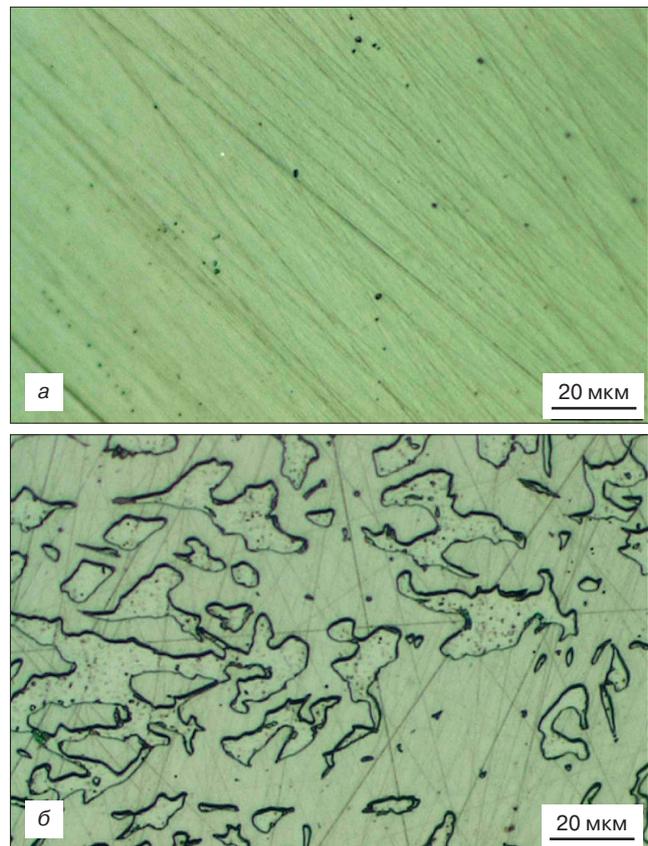


Рис. 3. Микроструктура кристалла $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ после стандартной технологии монодоменизации:

а, б — верхняя и нижняя части кристаллического образца
Fig. 3. Microstructure of $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ crystal after conventional monodomainization process: (a and б) top and bottom portions of single crystal specimen

ходимо повышать температуру выдержки, и она должна составлять $T_C + 150$ °С);

– токи монодоменизации подбирали эмпирически так, чтобы плотность тока на контактной поверхности не превышала 2 мА/см^2 . При соотношении катионов Nb/Ta = 1, начальная напряженность электрического поля на кристалле должна быть не менее $10 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ (ток монодоменизации ~2 мА). Меньшие токи не позволяют полностью провести монодоменизацию кристаллов $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$. Подключение электрического напряжения при достаточно высоких температурах приводит к твердофазному электролизу кристалла, что благотворно влияет на распределение основных и примесных элементов по кристаллу;

– скорость охлаждения кристалла под током для небольших кристаллов должна составлять не более 40 К/ч, для крупногабаритных кристаллов – не более 25 К/ч;

– температура, при которой происходит отключение электрического поля, должна быть такой, при которой значение тока, проходящего через кристалл при выбранном напряжении, приближалось бы к нулю. В противном случае это приведет к начальной стадии обратной переполяризации в виде образования микродоменов, как это наблюдается на рис. 3, б.

На рис. 4, а представлена микроструктура верхней части кристаллического образца $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ после адаптированного режима монодоменизации. Как и после стандартного режима монодоменизации, микроструктура содержала незначительное количество единичных доменов противоположного знака, которые не удалось переполяризовать. Скорее всего, домены закрепились на дефектной структуре самого кристалла. На рис. 4, б представлена микроструктура нижней части кристалла после адаптированного режима монодоменизации; стоит отметить более однородную доменную структуру по сравнению со стандартным режимом. Наблюдаются единичные многогранные микродомены размером не более 30 мкм. Кроме того, наблюдаются дефекты микроуровня в виде темных пятен и полос размером более 100 мкм, у которых скорость химического травления отличается от основной массы кристалла. Этот факт говорит о наличии в торцевой части кристаллического образца фаз переменного состава, отличающихся от состава фазы $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$.

Заключение

Выращены небольшие сегнетоэлектрические кристаллы сложного раствора $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ хорошего качества. Проведены сравнительные исследования особенностей высокотемпературной монодоменизации кристаллов $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$. Продемонстрированы основные отличия в технологи-

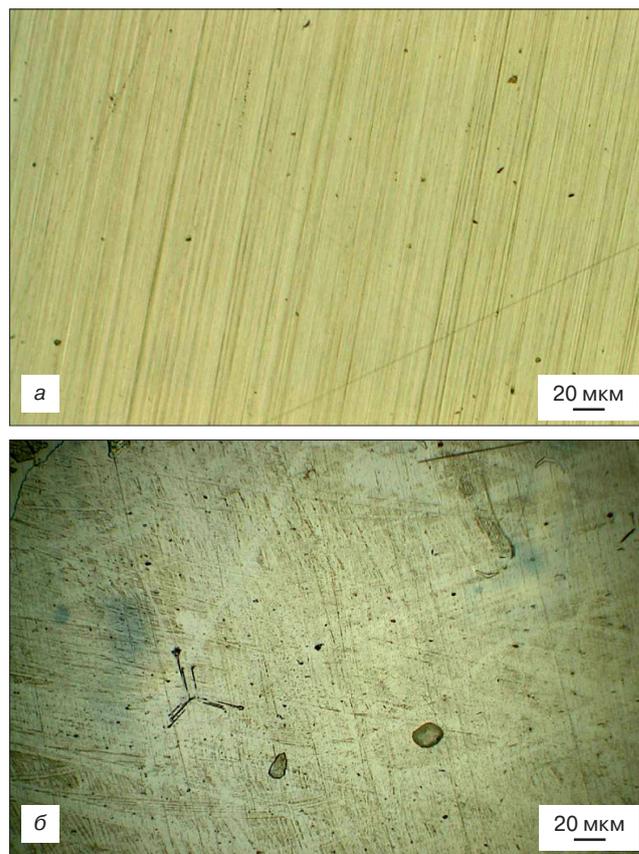


Рис. 4. Микроструктура кристалла $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ после адаптированной технологии монодоменизации:

а, б — верхняя и нижняя части кристаллического образца

Fig. 4. Microstructure of $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ crystal after adapted monodomainization process: (a and b) top and bottom portions of single crystal specimen

ческих режимах при монодоменизации кристаллов $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$ от процесса монодоменизации конгруэнтных кристаллов LiNbO_3 . Представлены параметры высокотемпературной электродиффузионной обработки кристаллов $\text{LiNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_3$, позволяющие получать монодоменные кристаллы для дальнейшего изучения их физических свойств.

Библиографический список

1. Кайно Г. Акустические волны. М.: Мир, 1990. 652 с.
2. Янив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 616 с.
3. Campbell C. Surface acoustic wave devices and their signal processing applications. Academic Press, 1989. 470 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-157345-4.X5001-2
4. Nakamura K., Nakamura T., Yamada K. Torsional actuators using LiNbO_3 plates with an inversion layer // Jpn. J. Appl. Phys. 1993. V. 32, N 5B. P. 2415—2417. DOI: 10.1143/JJAP.32.2415
5. Nakamura K., Shimizu H. Hysteresis-free piezoelectric actuators using LiNbO_3 plates with a ferroelectric inversion layer // Ferroelectrics. 1989. V. 93, N 1. P. 211—216. DOI: 10.1080/00150198908017348
6. Ueda M., Sawada H., Tanaka A., Wakatsuki N. Piezoelectric actuator using a LiNbO_3 bimorph for an optical switch // IEEE Symposium on Ultrasonics. 1990. P. 1183—1186. DOI: 10.1109/ULTSYM.1990.171548
7. Fukuda T., Hirano H. Solid-solution $\text{LiTa}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_3$ single crystal growth by Czochralski and edge-defined film-fed growth technique // J. Crystal Growth. 1976. V. 35, N 2. P. 127—132. DOI: 10.1016/0022-0248(76)90159-7

8. Shimura F, Fujino Y. Crystal growth and fundamental properties of $\text{LiNb}_{1-y}\text{Ta}_y\text{O}_3$ // *J. Crystal Growth*. 1977. V. 38, N 3. P. 293—302. DOI: 10.1016/0022-0248(77)90349-9

9. Bartasyte A., Glazer A. M., Wondre F., Prabhakaran D., Thomas P. A., Huband S., Keeble D. S., Margueron S. Growth of $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ solid solution crystals // *Materials Chemistry and Physics*. 2012. V. 134. P. 728—735. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2012.03.060

10. Roshchupkin D., Emelin E., Plotitsyna O., Fahrtdinov R., Irzhak D., Karandashev V., Orlova T., Targonskaya N., Sakharov S., Mololkin A., Redkin B., Fritze H., Suhak Y., Kovalev D., Vasilonga S., Ortega L., Leitenberger W. Single crystals of ferroelectric lithium niobate–tantalate $\text{LiNb}_{(1-x)}\text{Ta}_x\text{O}_3$ solid solutions for high-temperature sensor and actuator applications // *Acta Cryst.* 2020. V. B76. P. 1071—1076. DOI: 10.1107/S2052520620014390

11. Кузьминов Ю. С. Ниобат и танталат лития: материалы для нелинейной оптики. М.: Наука, 1975. 52 с.

12. Кузьминов Ю. С. Электрооптический и нелинейно оптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987. 262 с.

13. Блистанов А. А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСиС, 2000. 197 с.

14. Grabmaier B. C., Otto F. Growth and investigation of MgO-doped LiNbO_3 // *J. Crystal Growth*. 1986. V. 79, N 1–3, Pt 2. P. 682—688. DOI: 10.1016/0022-0248(86)90537-3

15. Палатников М. Н., Сидоров Н. В., Макарова О. В., Бирюкова И. В. Особенности послеростовой термической и электротермической обработки номинально чистых и сильно легированных кристаллов ниобата лития // *Известия РАН. Серия физическая*. 2018. Т. 82, № 3. С. 360—363. DOI: 10.7868/S0367676518030213

Статья поступила в редакцию 23 февраля 2021 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 34—39. DOI: 10.17073/1609-3577-2021-1-34-39

Properties of high-temperature poling ferroelectric crystals congruent solid solution $\text{LiNb}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3$

A. A. Mololkin^{1,2,*}, D. V. Roshchupkin¹, E. V. Emelin¹, R. R. Fahrtdinov¹

¹ *Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the Russian Academy of Sciences,*

6 Academician Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia

² *JSC Fomos-Materials,*

16 Buzheninova Str., Moscow 107023, Russia

Abstract. Lithium niobate and lithium tantalate are among the most important and most widely used materials in acousto-optics and acoustoelectronics. These materials have high values of piezoelectric constants, which makes it possible to use these materials as actuators; however, their use is limited by the thermal instability of a lithium niobate crystal and the low Curie temperature (T_C) of a lithium tantalate crystal. $\text{LiNb}_{(1-x)}\text{Ta}_x\text{O}_3$ crystals have to overcome the aforementioned limitations of individual compounds.

Crystals $\text{LiNb}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3$ were grown by the Czochralski method, of good quality. Comparative studies of the features of high-temperature single domainization of $\text{LiNb}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3$ crystals have been carried out. The main differences in the technological regimes for single-domainization of congruent $\text{LiNb}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3$ crystals from congruent LiNbO_3 crystals are demonstrated. The parameters of high-temperature electrodiffusion processing $\text{LiNb}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3$ crystals are presented, which make it possible to obtain single-domain crystals for further study of their physical properties.

Keywords: lithium niobate, lithium tantalate, ferroelectric crystals, high-temperature single-domainization, crystal growth, actuators

References

1. Kaino G. *Akusticheskie volny* [Acoustic waves]. Moscow: Mir, 1990. 652 p. (In Russ.)

2. Yariv A, P. Yuh. *Opticheskie volny v kristallakh* [Optical waves in crystals]. Moscow: Mir, 1987. 616 p. (In Russ.)

3. Campbell C. *Surface acoustic wave devices and their signal processing applications*. Academic Press, 1989. 470 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-157345-4.X5001-2

4. Nakamura K., Nakamura T., Yamada K. Torsional actuators using LiNbO_3 plates with an inversion layer. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, vol. 32, no. 5B, pp. 2415—2417. DOI: 10.1143/JJAP.32.2415

5. Nakamura K., Shimizu H. Hysteresis-free piezoelectric actuators using LiNbO_3 plates with a ferroelectric inversion layer. *Ferroelectrics*, 1989, vol. 93, no. 1, pp. 211—216. DOI: 10.1080/00150198908017348

6. Ueda M., Sawada H., Tanaka A., Wakatsuki N. Piezoelectric actuator using a LiNbO_3 bimorph for an optical switch. *IEEE Symposium on Ultrasonics*, 1990, pp. 1183—1186. DOI: 10.1109/ULTSYM.1990.171548

7. Fukuda T., Hirano H. Solid-solution $\text{LiTa}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_3$ single crystal growth by Czochralski and edge-defined film-fed growth technique. *J. Crystal Growth*, 1976, vol. 35, no. 2, pp. 127—132. DOI: 10.1016/0022-0248(76)90159-7

8. Shimura F, Fujino Y. Crystal growth and fundamental properties of $\text{LiNb}_{1-y}\text{Ta}_y\text{O}_3$. *J. Crystal Growth*, 1977, vol. 38, no. 3, pp. 293—302. DOI: 10.1016/0022-0248(77)90349-9

Information about authors:

Anatoli A. Mololkin^{1,2,*}: Deputy Head of Production (Anatoli.mololkin.sooth@mail.ru); **Dmitry V. Roshchupkin**²: Dr. Sci. (Phys.–Math.), Director (rochtch@iptm.ru); **Eugenii V. Emelin**¹: Researcher; **Rashid R. Fahrtdinov**¹: Researcher (fakhrtd@gmail.com)

* Corresponding author

9. Bartasyte A., Glazer A. M., Wondre F., Prabhakaran D., Thomas P. A., Huband S., Keeble D. S., Margueron S. Growth of $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ solid solution crystals. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, vol. 134, pp. 728—735. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2012.03.060
10. Roshchupkin D., Emelin E., Plotitsyna O., Fahrtdinov R., Irzhak D., Karandashev V., Orlova T., Targonskaya N., Sakharov S., Mololkin A., Redkin B., Fritze H., Suhak Y., Kovalev D., Vadilonga S., Ortega L., Leitenberger W. Single crystals of ferroelectric lithium niobate–tantalate $\text{LiNb}_{(1-x)}\text{Ta}_x\text{O}_3$ solid solutions for high–temperature sensor and actuator applications. *Acta Cryst.*, 2020, vol. B76, pp. 1071—1076. DOI: 10.1107/S2052520620014390
11. Kuz'minov Yu. S. *Niobat i tantalat litiya: materialy dlya nelineinoi optiki* [Lithium niobate and tantalate: materials for nonlinear optics]. Moscow: Nauka, 1975. 52 p. (In Russ.)
12. Kuz'minov Yu. S. *Elektroopticheskiy i nelineyno opticheskiy kristall niobata litiya* [Electro–optical and nonlinear optical crystal of lithium niobate]. Moscow: Nauka, 1987. 262 p. (In Russ.)
13. Blistanov A. A. *Kristally kvantovoy i nelineynoy optiki* [Crystals of quantum and nonlinear optics]. Moscow: MISiS, 2000. 197 p. (In Russ.)
14. Grabmaier B. C., Otto F. Growth and investigation of MgO–doped LiNbO_3 . *J. Crystal Growth*, 1986, vol. 79, no. 1–3, pt 2, pp. 682—688. DOI: 10.1016/0022-0248(86)90537-3
15. Palatnikov M. N., Sidorov N. V., Makarova O. V., Birjukova I. V. Features of the postgrowth thermal and electrothermal treatment of nominally pure and heavily doped lithium–niobate crystals. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2018, vol. 82, no. 3, pp. 314—316. DOI: 10.3103/S1062873818030176

Received February 23, 2021