УДК 537.226.82 *Оригинальная статья*

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ТОНКИХ ПЛЕНОК НИОБАТА ЛИТИЯ И ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ НА МОДУЛИРОВАННОЕ ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

С.И. Гудков[1], А.В. Солнышкин[1], Р.Н. Жуков[2], Д.А. Киселев[2]
[1]ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170100, Россия, Тверь, ул. Желябова, 33
[2]ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1
becauseimaphysicist@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.082

Аннотация: в работе проведены исследования пироэлектрической активности наноразмерных тонких поликристаллических пленок ниобата лития, изготовленных методом высокочастотного магнетронного распыления и методом лазерной абляции, а также тонких поликристаллических пленок танталата лития, изготовленных методом высокочастотного магнетронного распыления. С использованием динамического метода исследования пироэлектрического эффекта выяснено, что все образцы обладают самопроизвольной поляризацией, возникающей во время постростового термического отжига. Оценка пироэлектрического коэффициента показала, что значения пирокоэффициента тонких пленок ниобата лития и танталата лития в несколько раз меньше значений пирокоэффициента для объемных кристаллов соответствующих материалов. Это может быть связано с тем, что вектор поляризации части зерен лежит в плоскости пленки, а также с существующими в объеме пленки и на границе раздела пленка/подложка ловушками, на которых носители заряда рекомбинируют и не участвуют в генерации пироэлектрического тока.

Ключевые слова: ниобат лития, танталат лития, тонкая пленка, динамический метод, естественная униполярность, самополяризация, самопроизвольная поляризации, пироэлектрический эффект, пироэлектрический коэффициент.

1. Введение

Ниобат лития ($LiNbO_3$ – LN) и танталат лития ($LiTaO_3$ – LT) являются сегнетоэлектрическими материалами, имеющими большое прикладное значение для оптоэлектроники, нелинейной оптики, детекторов излучения, энергонезависимой памяти, манипуляторов микро- и наночастицами [1-4]. Наличие в $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$ спонтанной поляризации приводит к возможности существования в данных материалах пироэлектрического эффекта. Благодаря пироэлектрическим свойствам эти соединения могут использоваться как источники электронов и нейтронов, в генераторах рентгеновского излучения, для манипуляции каплями воды [5-7].

В настоящее время широкое распространение приобрела планарная технология, а также прогрессирует миниатюризация электроники. Это влечет за собой необходимость интеграции сегнетоэлектриков с кремниевыми технологиями с последующим стремлением к уменьшению линейных размеров полученных гетероструктур [8]. Перспективным также

© С.И. Гудков, А.В. Солнышкин, Р.Н. Жуков, Д.А. Киселев, 2022

является использование в электронике таких наноразмерных структур, как тонкие пленки. При этом нужно учитывать, что электрические и электрооптические свойства тонких пленок зачастую отличаются от свойств объемных материалов и зависят от ряда факторов, в частности метода нанесения пленки, заданных параметров осаждения и постростовой обработки структур [9]. Одной из отличительных особенностей пленочных сегнетоэлектрических структур является существование в них естественной униполярности (в англоязычной литературе используется термин «самополяризация» – self-polarization), то есть наличие самопроизвольной макроскопической поляризации, возникающей при формировании структуры [10, 11]. Наличие такой поляризации приводит к возможности регистрации пироэлектрической активности в тонких сегнетоэлектрических пленках, не подвергавшихся воздействию внешних электрических полей.

Целью настоящей работы является исследование пироэлектрических свойств тонких пленок на основе ниобата лития, изготовленных различными методами, и тонких пленок на основе танталата лития.

2. Объекты исследования и методика эксперимента

В данной работе объектами исследования являлись тонкопленочные поликристаллические гетероструктуры на основе сегнетоэлектриков – ниобата лития или танталата лития. Осаждение сегнетоэлектрических тонких слоёв осуществлялось на кремниевые подложки с ориентацией (111), которые предварительно очищались с помощью ионной пушки в течение 5 минут. Сегнетоэлектрические тонкие слои ниобата лития (образцы LN-MS, MS – magnetron sputtering) и танталата лития (образцы LT-MS) были нанесены методом высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления в вакуумной камере SUNPLA-40TM (Республика Корея). В качестве мишени использовались пластина $LiNbO_3$ *Z*-среза (для LN-MS) и пластина $LiTaO_3$ *Z*-среза (для LT-MS). Синтез образцов LN-MS проводился в аргоновой среде при давлении 0,5 Па и мощности магнетрона 60 Вт. Отжиг проводился при температуре 700°C в течение 120 минут. Толщина сегнетоэлектрического слоя составляет 200 нм. На свободную поверхность пленки были нанесены верхние медные круглые электроды диаметром 2,45 ± 0,21 мм. Для образцов LT-MS осаждение проводилось в плазме кислорода (40 об.%) и аргона (60 об.%) при давлении 0,57 Па и мощности магнетрона 150 Вт. После выращивания пленочного слоя гетероструктуры дважды подвергались постростовому отжигу: в течение 1 часа при температуре 550°C и в течение 1 часа при температуре 700°C. Толщина слоя $LiTaO_3$ составляет 200 нм. На свободную поверхность пленки были нанесены серебряные электроды диаметром 4,5 ± 0,3 мм. Тонкие пленки ниобата лития, изготовленные методом лазерной абляции, (LN-LA, LA – laser

ablation) осаждались в вакуумной камере при давлении $1{,}3\cdot10^{-3}$ Па, напряжении накачки лазера 1050 В и частоте импульсов лазера 5 Гц. Мишенью служила пластина $LiNbO_3$ *Z*-среза. На подложку подавалось ускоряющее напряжение равное 500 В. Отжиг проводился при температуре 650°С в течение 60 минут. Толщина слоя LN составляет 100 нм. Верхние круглые медные электроды диаметром 2,45 ± 0,22 мм были нанесен на свободную поверхность пленки ниобата лития.

Изучение пироэлектрической активности осуществлялось с помощью динамического метода периодических импульсов [12]. Он заключается в регистрации интегрального пироэлектрического отклика с поверхности электрода при его периодическом нагреве модулированным лазерным излучением прямоугольной формы. Модуляция проводилась генератором сигнала специальной формы ГСС-120 в диапазоне частот от 1 до 10^3 Гц. Лазер имел длину волны 0,98 мкм и мощность 220 мВт. Поглощение теплового потока верхним электродом приводило к периодическому изменению поляризации образца и возникновению пироэлектрического тока, осуществляемого зарядами, участвующими в поляризационном экранировании. Исследование электрического сигнала на модулированное воздействие проводилось на образцах, не подвергавшихся воздействию внешних полей. Для регистрации электрической активности для образца LN-LA в измерительную схему включался операционный усилитель.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены типичные зависимости электрического отклика исследуемых структур на модулированное тепловое воздействие. Эксперимент для образцов LN-MS и LT-MS проводился без использования операционного усилителя, для образца LN-LA – с использованием операционного усилителя. Ранее мы проводили исследования электрического отклика тонких пленок ниобата лития на модулированное тепловое излучение в работах [13, 14]. В настоящей работе мы уточняем и дополняем сведения. Из рис. 1 видно, что все образцы демонстрируют пироэлектрический отклик на модулированное тепловое излучение. Это свидетельствует об их естественной униполярности. Наибольшее значение пироэлектрического тока наблюдается для образца LN-MS, а наименьшее – для образца LN-LA.

По направлению пироэлектрического тока можно сделать вывод о направлении вектора остаточной поляризации (самополяризации) в структурах. Совпадение фазы пироотклика с фазой опорного сигнала указывает на направление вектора поляризации от верхнего электрода к подложке; нахождение пиротока в противофазе с опорным сигналом – от

подложки к верхнему электроду. При этом нужно учитывать, что включение в измерительную схему операционного усилителя меняет фазу пироотклика на 180°. Вектор остаточной поляризации направлен в образце LN-MS от верхнего электрода к подложке, в образцах LT-MS и LN-LA – от подложки к верхнему электроду.

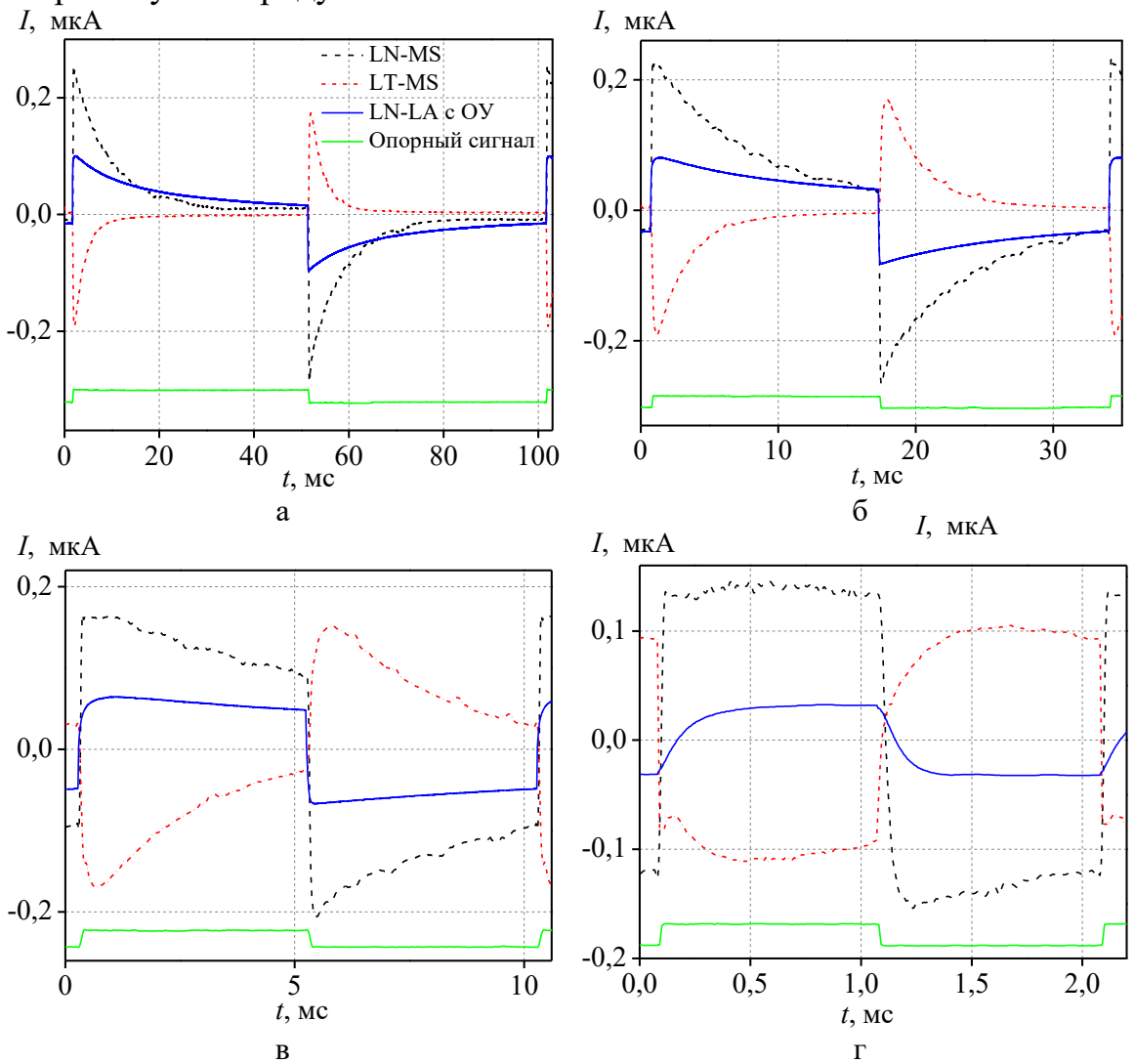

Рис. 1. Электрический отклик исследуемых образцов на модулированное тепловое излучение с частотой: а – 10 Гц, б – 30 Гц, в – 100 Гц, г – 500 Гц.

Образец LN-MS на частотах ниже 10 Гц характеризуется наличием сильного выброса тока (нестационарная компонента тока) при включении и при выключении освещения (см. рис. 1 а) с последующей его релаксацией до некоторого малого стационарного значения. Амплитуда стационарной компоненты в 20 раз меньше амплитуды начального выброса. Увеличение частоты модуляции лазерного излучения (интервал 30-500 Гц) приводит к возрастанию величины стационарной компоненты (см. рис. 1 б-в). На частотах выше 500 Гц пироэлектрический отклик имеет только стационарную компоненту и приобретает прямоугольную форму сигнала

(см. рис. 1 г).

Образец LT-MS имеет начальный выброс тока, релаксирующий до нуля, при частотах модуляции до 30 Гц (см. рис. 1 а, б). Увеличение частоты модуляции теплового потока приводит к появлению стационарной компоненты пироотклика и последующему возрастанию её амплитуды на частотах 50-200 Гц (см. рис. 1 в). Частоты выше 200 Гц характеризуются появлением при включении освещения выброса тока, совпадающего по направлению с пироотклико м (см. рис. 1 г). Данный выброс может быть связан с наличием в приповерхностном слое структуры области с повышенной пироэлектрической активностью. На частотах выше 500 Гц форма пироэлектрического сигнала указывает на неравномерное распределение поляризации по толщине образца.

Образец LN-LA характеризуется наличием нестационарной компоненты тока при частотах до 10 Гц и её релаксацией до некоторого квазистационарного значения (см. рис. 1 а). Квазистационарная компонента по амплитуде в 6 раз меньше, чем нестационарная компонента. В интервале частот от 10 до 200 Гц происходит увеличение стационарной компоненты пироотклика (см. рис. 1 б, в). При этом форма сигнала стремится к прямоугольной. Отступление формы сигнала от прямоугольной на частотах выше 200 Гц свидетельствует о неравномерном распределении поляризации в образце (см. рис. 1 г).

Стремление электрического отклика при высоких частотах к прямоугольности свидетельствует о его пироэлектрической природе.

На основе осциллограмм пироэлектрического отклика были построены амплитудные зависимости сигнала от частоты модуляции теплового потока. Соответствующие кривые в полулогарифмическом масштабе приведены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что при низких частотах модуляции (частота до 10 Гц для структур LN-MS и LN-LA и частота до 30 Гц для LT-MS) амплитуда сигнала не меняется по величине и имеет максимальное значение. Это значение соответствует амплитуде начального выброса.

Для образца LN-MS при низких частотах (до 10 Гц) модуляции амплитуда отклика в световом интервале имеет значение меньше, чем в темновом интервале. Для светового участка пироток равен примерно 0,26 мкА, для темнового – примерно 0,28 мкА. На частотах 10-200 Гц для светового участка и 10-500 Гц для темнового участка происходит почти линейное уменьшение амплитуды сигнала до одинакового значения – примерно 0,15 мкА. При данных частотах величина сигнала в световом участке уступает амплитуде в темновой области не более чем на 0,04 мкА. Увеличение частоты модуляции выше 200 Гц для светового участка и выше 500 Гц для темнового участка не приводит к падению амплитуды отклика:

сохраняется значение ~ 0,15 мкА.

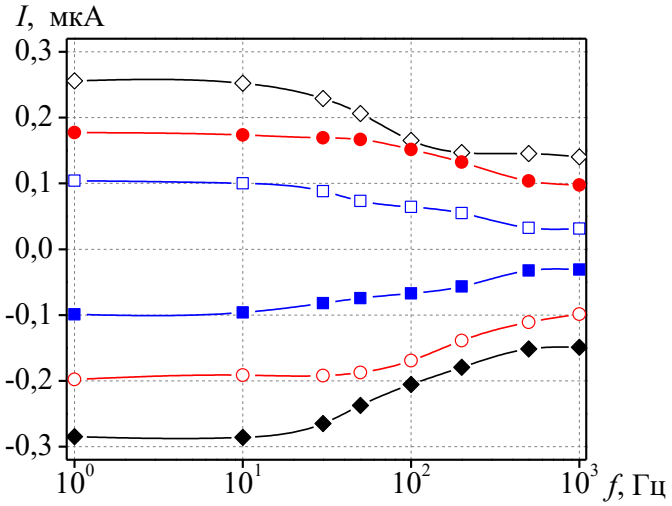

Рис. 2. Частотная зависимость пироэлектрического отклика образцов (◊ – LN-MS, ○ – LT-MS, □ – LN-LA) при включении (незакрашенные значки) и выключении (закрашенные значки) освещения. Сплошные линии – аппроксимации.

Для образца LT-MS на частотах до 30 Гц амплитуда сигнала в световой области (примерно 0,19 мкА) превосходит амплитуду тока в темновой области (примерно 0,17 мкА). В интервале частот от 30 до 500 Гц происходит уменьшение значений амплитуды пиротока: для светового участка величина сигнала уменьшается от 0,19 до 0,11 мкА, для темнового участка – от 0,17 до 0,10 мкА. При этом в этом интервале частот ток в световом участке превосходит ток в темновом участке примерно на 0,01-0,02 мкА, разница в значениях уменьшается с увеличением частоты модуляции. На частотах выше 500 Гц амплитуды приходят к одинаковому значению (примерно 0,10 мкА), которое остается постоянным при дальнейшем увеличении частоты облучения.

Для образца LN-LA величина пироотклика, соответствующая начальному выбросу, практически не меняется по величине на частотах до 10 Гц как для светового, так и для темнового участков. При этом величина электрического отклика для светового интервала превосходит отклик для темнового интервала менее чем на 0,01 мкА. Величина сигнала на этих частотах составляет примерно 0,10 мкА. Далее как для световой, так и для темновой областей наблюдается падение величины тока от примерно 0,10 мкА на частоте 10 Гц до примерно 0,03 мкА на частоте 500 Гц. Причем амплитуда сигнала при включении освещения незначительно превосходит амплитуду при отключении освещения. На частотах выше 500 Гц значение пиротока сохраняет свою величину, равную примерно 0,03 мкА.

Можно видеть, что в случае воздействия модулированного теплового излучения на поверхность образца, на которую выходит «голова» вектора поляризации, ток при включении освещения имеет большую величину, чем

ток при выключении освещения (образцы LT-MS и LN-LA). При воздействии на поверхность образца, на которую выходит «хвост» вектора поляризации, большее значение имеет электрический сигнал, появляющийся при выключении освещения (образец LN-MS). Для всех образцов с увеличением частоты наблюдается уменьшение амплитуды электрического отклика в два раза, что свидетельствует о его пироэлектрической природе.

Полученные экспериментальные данные дают возможность провести оценку значения усредненного по толщине значения пироэлектрического коэффициента p. Оценка проводилась по формуле [15]:

$$p = \frac{2I\rho C_M d}{\eta W M}, \quad (1)$$

где I – пироэлектрический ток, ρ – плотность исследуемого вещества, C_M – молярная теплоемкость исследуемого вещества, d – толщина образца, η – оптический коэффициент поглощения электрода, W – мощность лазерного излучения, M – молярная масса исследуемого вещества. Значения молярной теплоемкости взяты из [16], плотности – из [17]. Коэффициент поглощения инфракрасного излучения для меди составляет примерно 0,05 [18], для серебра – примерно 0,01 [19]. Полученные из расчетов значения представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Значения пироэлектрических коэффициентов LN и LT.

Образец	p, мкКл / (м^2 · К)		
	Рассчитанное значение для пленки	Значение из литературы	
		Для объемного материала	Для пленки
LN-MS	15,2	93,2 [20]	40,0 [21]
LT-MS	64,0	180,0 [22]	60,0 [23]
LN-LA	1,7	93,2 [20]	40,0 [21]

Анализ данных, представленных в Таблице 1 показывает, что для образца LN-MS пирокоэффициент в 6 раз меньше, чем для объемного материала; для образца LT-MS в 3 раза меньше; для образца LN-LA – в 55 раз меньше. Вероятно, подобные разночтения связаны с тем, что в большинстве зерен вектор остаточной поляризации лежит в плоскости пленки, а также носители заряда могут рекомбинировать на ловушках, существующих в объеме пленки и на границе раздела пленка/подложка, и не давать вклад в пироэлектрический ток. При этом значение пирокоэффициента для LT-MS хорошо согласуется со значениями пироэлектрического коэффициента для пленок танталата лития, имеющимися в литературных источниках.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории физики оксидных сегнетоэлектриков НИТУ «МИСИС» за предоставленные образцы.

Библиографический список:

1. **Qi, Yi.** Integrated lithium niobate photonics / Yi. Qi, Ya. Li // Nanophotonics. – 2020. – V. 9. – I. 6. – P. 1287-1320. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0013.
2. **Irzaman** Application of lithium tantalate ($LiTaO_3$) films as light sensor to monitor the light status in the Arduino Uno based energy-saving automatic light prototype and passive infrared sensor / Irzaman, R. Siskandar, N. Nabilah et al. // Ferroelectrics. – 2018. – V. 524. – I. 1. – P. 44-55. DOI: 10.1080/00150193.2018.1432842.
3. **Kämpfe, T.** Tunable non-volatile memory by conductive ferroelectric domain walls in lithium niobate thin films / T. Kämpfe, B. Wang, A. Haußmann et al. // Crystals. – 2020. – V. 10. – I. 9. – Art. № 804. – 11 p. DOI: 10.3390/cryst10090804.
4. **García-Cabañes, A.** Recent achievements on photovoltaic optoelectronic tweezers based on lithium niobate / A. García-Cabañes, A. Blázquez-Castro, L. Arizmendi et al. // Crystals. – 2018. – V. 8. – I. 2. – Art. № 65. – 15 p. DOI: 10.3390/cryst8020065.
5. **Geuther, J.A.** High-energy x-ray production with pyroelectric crystals / J.A. Geuther, Ya. Danon // Journal of Applied Physics. – 2005. – V. 97. – I. 10. – Art. № 104916. – 5 p. DOI: 10.1063/1.1915536.
6. **Geuther, J.A.** Electron and positive ion acceleration with pyroelectric crystals / J.A. Geuther, Ya. Danon // Journal of Applied Physics. – 2005. – V. 97. – I. 7. – Art. № 074109. – 5 p. DOI: 10.1063/1.1884252.
7. **Yan, W.** Optically guided pyroelectric manipulation of water droplet on a superhydrophobic surface / W. Yan, Ch. Zhao, W. Luo et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2021. – V. 13. – I. 19. – P. 23181-23190. DOI: 10.1021/acsami.1c03407.
8. **Jayadevan, K.P.** Review Composite and multilayer ferroelectric thin films: processing, properties and applications / K.P. Jayadevan, T.Y. Tseng // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2002. – V. 13. – I. 8. – P. 439-459. DOI: 10.1023/A:1016129318548.
9. **Hassanien, A.S.** Effect of Se addition on optical and electrical properties of chalcogenide CdSSe thin films / A.S. Hassanien, A.A. Akl // Superlattices and Microstructures. – 2016. – V. 89. – P. 153-169. DOI: 10.1016/j.spmi.2015.10.044.
10. **Lima, E.C.** The self-polarization effect in $Pb(Zr_{0.50}Ti_{0.50})O_3$ thin films with no preferential orientation / E.C. Lima, E.B. Araújo, I.K. Bdikin et al. // Materials Research Bulletin. – 2012. – V. 47. – I. 11. – P. 3548-3551. DOI: 10.1016/j.materresbull.2012.06.058.
11. **Afanasjev, V.P.** Polarization and self-polarization in thin $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ (PZT) films / V.P. Afanasjev, A.A. Petrov, I.P. Pronin et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2001. – V. 13. – № 39. – P. 8755-8763. DOI: 10.1088/0953-8984/13/39/304.
12. **Malyshkina, O.V.** Use of the thermal square wave method to analyze polarization state in ferroelectric materials / O.V. Malyshkina, A.A. Movchikova, R.M. Grechishkin et al. // Ferroelectrics. – 2010. – V. 400. – I. 1. – P. 63-75. DOI: 10.1080/00150193.2010.505470.
13. **Baklanova, K.D.** Pyroelectric properties and local piezoelectric response of lithium niobate thin films / K.D. Baklanova, A.V. Solnyshkin, I.L. Kislova et al. // Physica Status Solidi A. – 2018. – V. 215. – I. 5. – Art. № 1700690. – 6 p. DOI: 10.1002/pssa.201700690.
14. **Бакланова, К.Д.** Электрофизические характеристики тонкопленочных структур на основе ниобата лития / К.Д. Бакланова, С.И. Гудков, М.В. Каменщиков и др. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2016. – Т. 16. – Вып. 4. – С. 87-90.
15. **Malyshkina, O.V.** Pyroelectric and dielectric properties of calcium barium niobate single crystals / O.V. Malyshkina, V.S. Lisitsin, J. Dec et al. // Physics of the Solid State. – 2014. – V. 56. – I. 9. – P. 1824-1827. DOI: 10.1134/S1063783414090194.
16. **Glass, A.M.** Dielectric, thermal, and pyroelectric properties of ferroelectric $LiTaO_3$ / A.M. Glass // Physical Review. – 1968. – V. 172. – I. 2. – P. 564-571. DOI: 10.1103/PhysRev.172.564.
17. **Smith, R.T.** Temperature dependence of the elastic, piezoelectric, and dielectric constants of lithium tantalate and lithium niobate / R.T. Smith, F.S. Welsh // Journal of Applied Physics. – 1971. – V. 42. – I. 6. – P. 2219-2230. DOI: 10.1063/1.1660528.
18. **Webb, R.** Absolute absorptance measurements on copper-based allows at infrared wavelengths / R. Webb // International Journal of Thermophysics. – 1989. – V. 10. – I. 2. – P. 513-525. DOI: 10.1007/BF01133547.
19. **Smith, D.R.** Low-temperature properties of silver / D.R. Smith, F.R. Fickett // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. – 1995. – V. 100. – I. 2. – P. 119-171. DOI: 10.6028/jres.100.012.
20. **Parravicini, J.** All-optical technique to measure the pyroelectric coefficient in electro-optic crystals / J. Parravicini, J. Safioui, V. Degiorgio et al. // Journal of Applied Physics. – 2011. – V. 109. – I. 3. – Art. № 033106. – 5 p. DOI: 10.1063/1.3544069.
21. **Levy, M.** Fabrication of single-crystal lithium niobate films by crystal ion slicing / M. Levy, R.M. Osgood Jr., R. Liu et al. // Applied Physics Letters. – 1998. – V. 73. – I. 16. – P. 2293-2295. DOI: 10.1063/1.121801.

22. **Norkus, V.** Pyroelectric infrared detectors based on lithium tantalate: state of art and prospects / V. Norkus // Proceedings SPIE. Detectors and Associated Signal Processing. – 2004. – V. 5251. – P. 121-128. DOI: 10.1117/12.513884.
23. **Combette, Ph.** RF magnetron-sputtering deposition of pyroelectric lithium tantalate thin films on ruthenium dioxide / Ph. Combette, L. Nougaret, A. Giani et al. // Journal of Crystal Growth. – 2007. – V. 304. – I. 1. – P. 90-96. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2007.02.006.

References

1. Qi Yi., Li Ya. Integrated lithium niobate photonicsi, *Nanophotonics*, 2020, vol. 9, issue 6, pp. 1287-1320. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0013.
2. Irzaman, Siskandar R., Nabilah N. et al. Application of lithium tantalate ($LiTaO_3$) films as light sensor to monitor the light status in the Arduino Uno based energy-saving automatic light prototype and passive infrared sensor, *Ferroelectrics*, 2018, vol. 524, issue 1, pp. 44-55. DOI: 10.1080/00150193.2018.1432842.
3. Kämpfe T., Wang B., Haußmann A. et al. Tunable Non-Volatile Memory by Conductive Ferroelectric Domain Walls in Lithium Niobate Thin Films, *Crystals*, 2020, vol. 10, issue 9, art. no. 804, 11 p. DOI: 10.3390/cryst10090804.
4. García-Cabañes A., Blázquez-Castro A., Arizmendi L. et al. Recent Achievements on Photovoltaic Optoelectronic Tweezers Based on Lithium Niobate, *Crystals*, 2018, vol. 8, issue 2, art. no. 65, 15 p. DOI: 10.3390/cryst8020065.
5. Geuther J.A., Danon Ya. High-energy x-ray production with pyroelectric crystals, *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, issue 10, art. no. 104916, 5 p. DOI: 10.1063/1.1915536.
6. Geuther J.A., Danon Ya. Electron and positive ion acceleration with pyroelectric crystals, *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, issue 7, art. no. 074109, 5 p. DOI: 10.1063/1.1884252.
7. Yan W., Zhao Ch., Luo W. et al. Optically guided pyroelectric manipulation of water droplet on a superhydrophobic surface, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, vol. 13, issue 19, pp. 23181-23190. DOI: 10.1021/acsami.1c03407.
8. Jayadevan K.P., Tseng T.Y. Review composite and multilayer ferroelectric thin films: processing, properties and applications, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2002, vol. 13, issue 8, pp. 439-459. DOI: 10.1023/A:1016129318548.
9. Hassanien A.S., Akl A.A. Effect of Se addition on optical and electrical properties of chalcogenide CdSSe thin films, *Superlattices and Microstructures*, 2016, vol. 89, pp. 153-169. DOI: 10.1016/j.spmi.2015.10.044.
10. Lima E.C., Araújo E.B., Bdikin I.K. et al. The self-polarization effect in $Pb(Zr_{0.50}Ti_{0.50})O_3$ thin films with no preferential orientation, *Materials Research Bulletin*, 2012, vol. 47, issue 11, pp. 3548-3551. DOI: 10.1016/j.materresbull.2012.06.058.
11. Afanasjev V.P., Petrov A.A., Pronin I.P. et al. Polarization and self-polarization in thin $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ (PZT) films, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2001, vol. 13, no. 39, pp. 8755-8763. DOI: 10.1088/0953-8984/13/39/304.
12. Malyshkina O.V., Movchikova A.A., Grechishkin R.M. et al. Use of the thermal square wave method to analyze polarization state in ferroelectric materials, *Ferroelectrics*, 2010, vol. 400, issue 1, pp. 63-75. DOI: 10.1080/00150193.2010.505470.
13. Baklanova K.D., Solnyshkin A.V., Kislova I.L. et al. Pyroelectric properties and local piezoelectric response of lithium niobate thin Films, *Physica Status Solidi A*, 2018, vol. 215, issue 5, art. no. 1700690, 6 p. DOI: 10.1002/pssa.201700690.
14. Baklanova K.D., Gudkov S.I., Kamenshchikov M.V. et al. Elektrofizicheskie kharakteristiki tonkoplenochnykh struktur na osnove niobata litiya [Electrophysical characteristics of thin-film structures based on lithium niobate], *Fundamental'nye problemy radioehlektronnogo priborostroeniya [Fundamental problems of radio-electronic instrumentation]*, 2016, vol. 16, issue 4, pp. 87-90. (In Russian).
15. Malyshkina O.V., Lisitsin V.S., Dec J. et al. Pyroelectric and dielectric properties of calcium barium niobate single crystals, *Physics of the Solid State*, 2014, vol. 56, issue 9, pp. 1824-1827. DOI: 10.1134/S1063783414090194.
16. Glass A.M. Dielectric, thermal, and pyroelectric properties of ferroelectric $LiTaO_3$, *Physical Review*, 1968, vol. 172, issue 2, pp. 564-571. DOI: 10.1103/PhysRev.172.564.
17. Smith R.T., Welsh F.S. Temperature dependence of the elastic, piezoelectric, and dielectric constants of lithium tantalate and lithium niobate, *Journal of Applied Physics*, 1971, vol. 42, issue 6, pp. 2219-2230. DOI: 10.1063/1.1660528.
18. Webb R. Absolute absorptance measurements on copper-based allows at infrared wavelengths, *International Journal of Thermophysics*, 1989, vol. 10, issue 2, pp. 513-525. DOI: 10.1007/BF01133547.

19. Smith D.R., Fickett F.R. Low-temperature properties of silver, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1995, vol. 100, issue 2, pp. 119-171. DOI: 10.6028/jres.100.012.
20. Parravicini J., Safioui J., Degiorgio V. et al. All-optical technique to measure the pyroelectric coefficient in electro-optic crystals, *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 109, issue 3, art. no. 033106, 5 p. DOI: 10.1063/1.3544069.
21. Levy M., Osgood Jr. R.M., Liu R. et al. Fabrication of single-crystal lithium niobate films by crystal ion slicing, *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 73, issue 16, pp. 2293-2295. DOI: 10.1063/1.121801.
22. Norkus V. Pyroelectric infrared detectors based on lithium tantalate: state of art and prospects, *Proceedings SPIE, Detectors and Associated Signal Processing*, 2004, vol. 5251, pp. 121-128. DOI: 10.1117/12.513884.
23. Combette Ph., Nougaret L., Giani A. et al. RF magnetron-sputtering deposition of pyroelectric lithium tantalate thin films on ruthenium dioxide, *Journal of Crystal Growth*, 2007, vol. 304, issue 1, pp. 90-96. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2007.02.006.

Original paper

ELECTRICAL RESPONSE OF LITHIUM NIOBATE AND LITHIUM TANTALATE THIN FILMS TO MODULATED THERMAL RADIATION

S.I. Gudkov[1], A.V. Solnyshkin[1], R.N. Zhukov[2], D.A. Kiselev[2]
[1]*Tver State University, Tver, Russia*
[2]*National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.082

Abstract: In this work, we studied the pyroelectric activity of thin polycrystalline lithium niobate films fabricated by radio frequency magnetron sputtering and laser ablation, and thin polycrystalline lithium tantalate films fabricated by radio frequency magnetron sputtering. Using the dynamic method of studying the pyroelectric effect, it was found that all samples have self-polarization that occurs during the post-growth thermal annealing of the structure. An estimate of the pyroelectric coefficient showed that the values of the pyroelectric coefficient of lithium niobate and lithium tantalate thin films are several times lower than the values of the pyroelectric coefficient for bulk crystals of the corresponding materials. This may be due to the fact that the polarization vector of some grains lies in the film plane, as well as to the traps existing in the film volume and at the film/substrate interface, on which charge carriers recombine and do not participate in the generation of the pyroelectric current.

Keywords: lithium niobate, lithium tantalate, thin film, dynamic method, self-polarization, pyroelectric effect, pyroelectric coefficient, $LiNbO_3$, $LiTaO_3$, ferroelectric, laser ablation method, radio frequency magnetron sputtering.

Гудков Сергей Игоревич – аспирант 4 года обучения кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», ассистент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Солнышкин Александр Валентинович – д.ф.-м.н., профессор кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Жуков Роман Николаевич – научный сотрудник лаборатории физики оксидных сегнетоэлектриков ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Киселев Дмитрий Александрович – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией физики оксидных сегнетоэлектриков ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Sergey I. Gudkov – 4th year postgraduate student, Assistant, Condensed Matter Physics Department, Tver State University
Alexander V. Solnyshkin – Dr. Sc., Professor, Condensed Matter Physics Department, Tver State University
Roman N. Zhukov – Researcher, Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics, National University of Science and Technology «MISiS»
Dmitry A. Kiselev – Ph. D., Head of the Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics, National University of Science and Technology «MISiS»

Поступила в редакцию/received: 30.08.2022; после рецензирования/revised: 27.09.2022; принята/accepted 29.09.2022.