

Исследование дифракционных характеристик и фотоиндуцированной проводимости регулярных доменных структур в кристалле танталата лития на основе методов Брэгговской дифракции

*Е. Н. Савченков¹, Н. И. Буримов¹, С. М. Шандаров¹, А. Р. Ахматханов², М. А. Чувакова²,
В. Я. Шур²*

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Представлены результаты исследования методом дифракции Брэгга характеристик регулярных доменных структур (РДС), создаваемых в сегнетоэлектрических кристаллах $1\%MgO:LiTaO_3$ переключением поляризации под действием внешнего пространственно-периодического поля. Для РДС в кристалле $1\%MgO:LiTaO_3$, имеющей ненаклонные доменные стенки, по релаксации эффективности дифракции Брэгга в приложенном постоянном электрическом поле исследована ее эффективная фотоиндуцированная проводимость для длины волны 657 нм. Установлено, что для данной РДС зависимость проводимости от интенсивности индуцирующего излучения имеет сублинейный характер.

Ключевые слова: Регулярные доменные структуры, Дифракция Брэгга, Танталат лития, Доменные стенки, Фотоиндуцированная проводимость.

Цитирование: Савченков, Е. Н. Исследование дифракционных характеристик и фотоиндуцированной проводимости регулярных доменных структур в кристалле танталата лития на основе методов Брэгговской дифракции / Е. Н. Савченков, Н. И. Буримов, С. М. Шандаров, А. Р. Ахматханов, М. А. Чувакова, В. Я. Шур // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 105–113.

Введение

Технологии доменной инженерии [1–4] предоставляют широкие возможности для создания в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата и танталата лития РДС, эффективно используемых в устройствах для квазисинхронного преобразования спектра лазерного излучения и электрооптической модуляции, его временных и пространственных характеристик [4–10]. Для этих приложений требуется обеспечить высокую воспроизводимость параметров доменных структур по всему рабочему объему в кристалле [3]. Реальные РДС имеют случайные отклонения по размерам доменов и положению стенок, при этом последние могут иметь наклон к полярной оси, который в кристаллах ниобата лития может превышать $0,2^\circ$ [11–15]. Эффективным методом неразрушающего контроля РДС является линейная дифракция света на создаваемых ими возмущениях оптических свойств, которая для структур, сформированных в кристаллах ниобата лития, изучалась в [5–9, 14–23]. С использованием изотропной дифракции Брэгга на РДС в кристалле $5\%MgO:LiNbO_3$ со стенками, наклоненными к полярной оси на угол $\alpha = \pm 0,31^\circ$, была обнаружена значительная

проводимость таких структур, фотоиндуцированная лазерным излучением с длинами волн от 457 до 657 нм [22, 24].

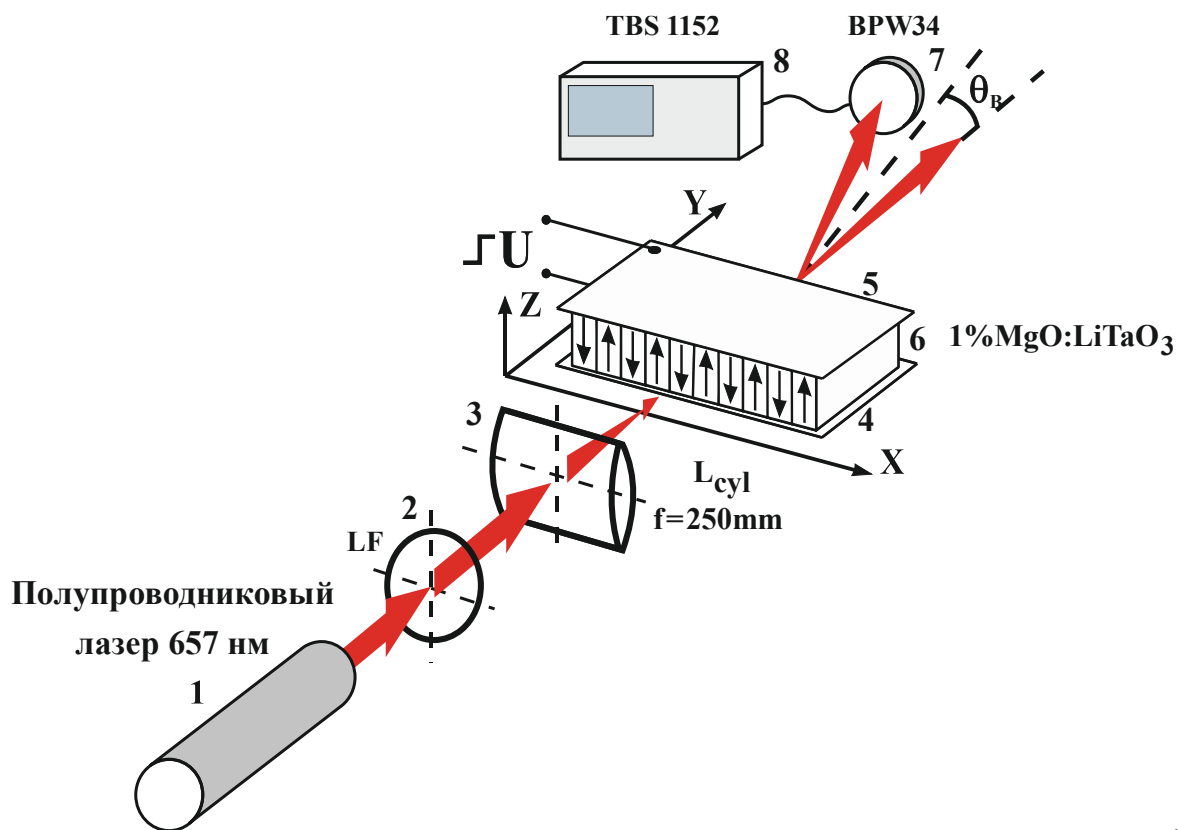
Для излучения полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda = 657$ нм в [24] получено, что при используемой в экспериментах максимальной интенсивности лазерного пучка $I_0 = 160$ мВт/мм² усредненная по периоду РДС эффективная проводимость кристалла 5%MgO:LiNbO₃ может быть оценена как $\sigma_{\text{eff}} = 3,44 \cdot 10^{-9}$ Ом⁻¹м⁻¹. Она была почти на порядок меньше, чем для $\lambda = 457$ нм [24], но превосходила известную величину темновой проводимости данного кристалла в монодоменном состоянии, $\sigma_d \leq 1,9 \cdot 10^{-13}$ Ом⁻¹м⁻¹ [25], более чем на четыре порядка. Такая фотоиндуцированная проводимость, имеющая спектральную зависимость, может влиять на характеристики электрооптических устройств управления лазерным излучением с использованием РДС с наклонными стенками в сегнетоэлектрических кристаллах. Следует также отметить, что до настоящего времени возможность фотоиндуцированной проводимости для РДС с ненаклонными стенками не обсуждалась.

В настоящем сообщении с использованием подходов и данных по изотропной дифракции Брэгга на РДС с ненаклонными стенками в кристалле 1%MgO:LiTaO₃, описанных ранее в [26], представлены результаты экспериментальных исследований зависимости ее проводимости, фотоиндуцированной зондирующим лазерным пучком с длиной волны $\lambda = 657$ нм и интенсивностью от 0,35 до 27 мВт/мм².

Методика эксперимента и результаты

Для регистрации зависимости от времени эффективности электрооптической дифракции Брэгга первого порядка использовалась подобная описанной в [22] экспериментальная установка, схематично изображенная на рис. 1. В ней применялся полупроводниковый лазерный диод 1, излучающий зондирующий световой пучок с длиной волны $\lambda = 657$ нм и выходной мощностью 15 мВт. Постоянное внешнее электрическое напряжение $U_0 = 200$ В, положительной или отрицательной полярности, с помощью механически прижимаемых к Z-граням медных электродов 4 и 5 прикладывалось к образцу 6 с РДС, имеющей пространственный период $\Lambda = 7,99$ мкм и размеры 2×1 мм² вдоль осей Y и Z, соответственно. Для подачи напряжения на внешние медные электроды, реализуемого через резистор с $R = 1$ кОм, использовался тумблер.

Пучок света от полупроводникового лазера 1, поляризованный вдоль оси Z кристалла, ослабляемый до нужных мощностей сменными светофильтрами 2, фокусировался цилиндрической линзой 3 с фокусным расстоянием 250 мм примерно в середину входной грани ($y = 0$) образца 6. Перетяжка пучка в фокальной плоскости имела эллиптическую форму с гауссовым распределением интенсивности и площадью $\sim 0,42$ мм². Наблюдаемая в отсутствие внешнего электрического поля и измеряемая с помощью фотодиода 7 и осциллографа 8 эффективность дифракции Брэгга на доменных стенках РДС составляла величину $\eta_{dv} \approx 0,01$.



1 – полупроводниковый лазер, 2 – сменный светофильтр, 3 – положительная цилиндрическая линза, 4 и 5 – медные электроды, 6 – кристалл танталата лития с РДС, 7 – pin-фотодиод, 8 – осциллограф

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

После включения внешнего напряжения $U_0 = 200$ В мощность дифрагированного луча $P(t)$, регистрируемая цифровым осциллографом TBS 1152, быстро изменялась за время около 25 нс, причем при включении отрицательного напряжения эффективность дифракции возрастала до максимальной величины, а при включении положительного напряжения уменьшалась до минимального значения. Затем происходила медленная релаксация дифракционной эффективности $\eta(t)$ к начальной величине η_{dw} , со скоростью, которая возрастала с интенсивностью зондирующего пучка I_0 . Типичные зависимости для нормированных дифракционных эффективностей $\eta_{\mp}(t)/\eta_m$ для значений приложенного напряжения $U_0 = +200$ В и -200 В представлены на рис. 2а и 2б соответственно. Отличие поведения дифракционных зависимостей для РДС в кристаллах танталата и ниобата лития при приложении напряжения разных полярностей (ср. с [22]) обусловлено тем, что в танталате лития размеры доменов разного знака по оси X отличались друг от друга, в то время как в ниобате лития, ввиду наклона доменных стенок к полярной оси Z, осуществлялась подстройка зондирующего луча вдоль последней для выбора его положения таким образом, чтоб эти размеры были одинаковыми.

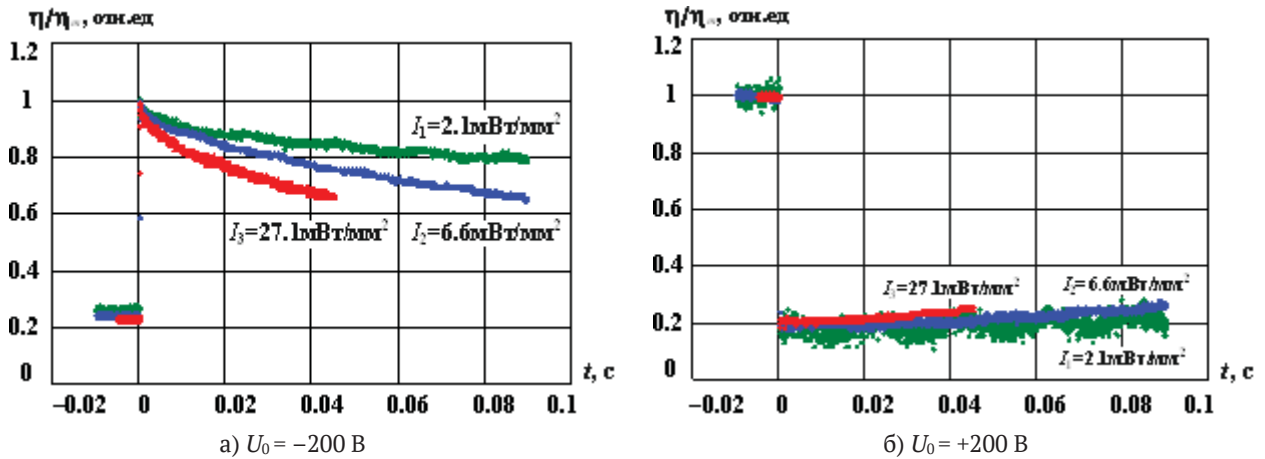


Рис. 2. Динамика эффективности дифракции Брэгга на РДС в первый порядок, наблюдаемая после приложения внешнего постоянного напряжения, для зондирующего лазерного пучка с интенсивностью в максимуме $I_1 = 2,1$, $I_2 = 6,6$ и $I_3 = 27,1$ мВт/мм²

Следует отметить, что когда после окончания релаксационного процесса согласно рис. 2а происходило выключение подаваемого напряжения -200 В, то с момента выключения можно было видеть картину, схожую с представленной на рис. 2б. И наоборот, если после окончания релаксационного процесса согласно рис. 2б подаваемое напряжения $+200$ В выключалось, то с этого момента сразу наблюдалась картина, подобная показанной на рис. 2а.

Эти особенности поведения эффективности дифракции могут быть также, как и в [22], объяснены релаксацией напряженности электрического поля пространственного заряда $E(t)$ в области РДС, освещаемой зондирующим пучком. Для сравнительно слабой эффективности дифракции Брэгга использование того же подхода, что и в [22], позволяет описать это поле как

$$E(t) = E_m \sqrt{\frac{\eta_-(t) + \eta_+(t)}{2} - \eta_{dw}}. \quad (1)$$

Из выражения (1) и измеренных экспериментальных значений η_{dw} , $\eta_-(t)$ и $\eta_+(t)$ была рассчитана динамика релаксации электрического поля для всех используемых значений интенсивности зондирующего пучка в засвечиваемой области РДС. Результаты расчета зависимостей $E(t)/E_m$, соответствующих приведенным на рис. 2 данным и значению $\eta_{dw} = 0,01$, представлен на рис. 3 точками.

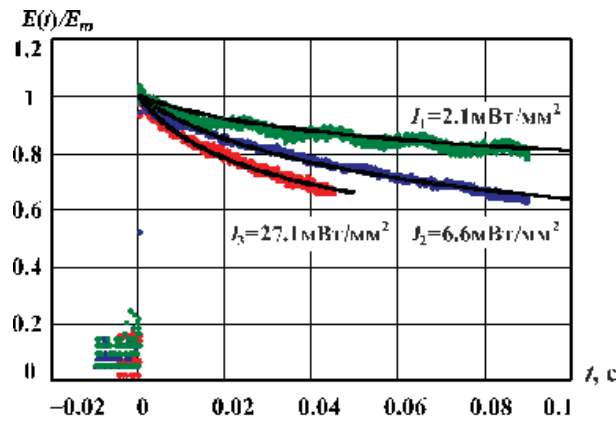


Рис. 3. Динамика электрического поля в освещенной области РДС, рассчитанная по формуле (1) из экспериментальных данных, представленных на рис. 2, и ее аппроксимация функцией (2) (сплошные кривые)

Динамика электрического поля в освещенной области РДС может быть описана аппроксимирующей функцией, аналогичной приведенной в [22]:

$$E(t, I_0) = E_m \exp \left\{ -a_E(I_0) \ln [1 + b_E(I_0)t] \right\}, \quad (2)$$

где параметры a_E и b_E также могут быть определены подгонкой с использованием метода наименьших квадратов. На рис. 3 аппроксимирующие функции представлены сплошными кривыми. Максвелловский характер релаксации на начальном участке и в случае РДС с ненаклонными стенками в кристалле $1\% \text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ также может быть объяснен экранировкой внешнего поля по причине вызванного этим полем перераспределения зарядов в освещенной области доменных стенок [22]. В результате такого перераспределения, в свою очередь, формируется внутреннее экранирующее поле, имеющее знак, противоположный приложенному внешнему полю. Для расчета усредненной по периоду Λ эффективной проводимости кристалла с РДС можно воспользоваться соотношением из [22], $\sigma_{eff}(I_0) = \varepsilon_{33} a_E(I_0) b_E(I_0)$, где ε_{33} – статическая диэлектрическая проницаемость кристалла. Из анализа полученных экспериментальных данных найдено, что эффективная проводимость в диапазоне интенсивностей зондирующего пучка от 0,35 до 27,1 мВт/мм² характеризуется сублинейной зависимостью, показанной точками на рис. 4.

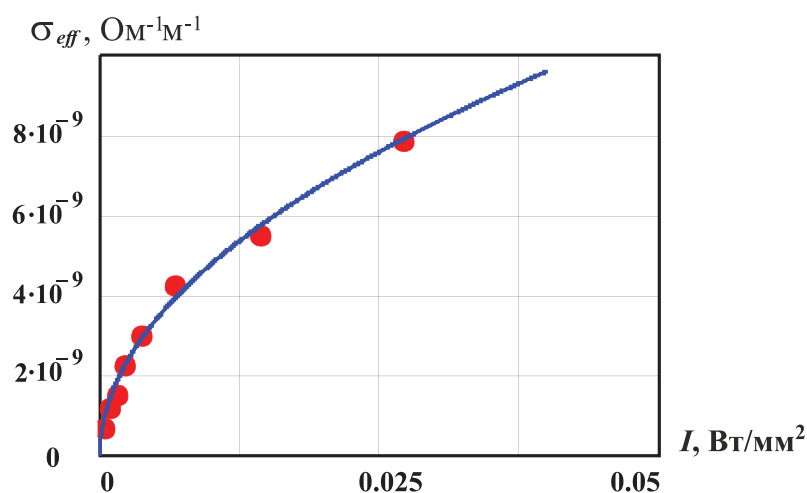


Рис.4. Зависимости фотоиндуцированной проводимости от интенсивности зондирующего пучка (точки) и её аппроксимация сублинейной кривой (сплошная линия)

Для аппроксимации экспериментальных данных рис.4 использовалась функция вида:

$$\sigma_{eff}(I) = \beta_{ph} \sqrt{I}, \quad (3)$$

с коэффициентом пропорциональности $\beta_{ph} = 48 \cdot 10^{-9} \text{ А}^{-1} \cdot \text{Ом}^{-3/2}$.

Для зондирующего пучка с интенсивностью $I_0 = 27 \text{ мВт/мм}^2$ эффективная проводимость исследуемой РДС была оценена, как $\sigma_{eff} = 7,9 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, что превышает известное для LiTaO_3 значение темновой проводимости, $\sigma_d \approx 7 \cdot 10^{-13} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ [27], примерно на четыре порядка.

Заключение

Таким образом, методом дифракции Брэгга изучена зависимость проводимости, фотоиндуцированной зондирующим лазерным пучком с длиной волны $\lambda = 657 \text{ нм}$ и интенсивностью от 0,35 до 27 мВт/мм² в образце 1%MgO:LiTaO₃ с РДС, доменные стенки которого не имеют наклона к полярной оси кристалла Z. Проведенные исследования показали сублинейный характер зависимости от интенсивности фотоиндуцированной проводимости кристалла 1%MgO:LiTaO₃ с РДС, а наблюдаемая экспериментально максимальная величина наведенной эффективной проводимости достигала значений, на четыре порядка превышающих темновую проводимость монодоменных образцов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания на 2020–2022 годы (задание FEWM-2020-0038/3).

Список источников

- [1] **Catalan, G.** Domain wall nanoelectronics / G. Catalan, J. Seidel, R. Ramesh, J. F. Scott // Reviews of Modern Physics. — 2012. — Vol. 84. — № 1. — P. 119–156.
- [2] **Шур, В. Я.** Доменная нанотехнология в монокристаллах семейства ниобата лития и танталата лития / В. Я. Шур // Наноматериалы и наноструктуры-XXI век. — 2015. — Т. 6. — №. 2. — С. 38–45.

- [3] **Shur, V. Ya.** Micro- and nano-domain engineering in lithium niobate // V. Ya. Shur, A. R. Akhmatkhanov, I. S. Baturin // *Appl. Phys. Rev.* — 2015. — Vol. 2. — P. 040604.
- [4] **Ferrari, P.** Ferroelectric crystals for photonic applications / P. Ferrari, S. Grilli, P. De Natale. (Eds.) — Berlin–Heidelberg: Springer–Verlag, 2009, 2014. — 493 p.
- [5] **Yamada, M.** Electrically induced Bragg-diffraction grating composed of periodically inverted domains in lithium niobate crystals and its application devices / M. Yamada // *Rev. Sci. Instrum.* — 2000. — Vol. 71. — P. 4010–4016.
- [6] **Inuoe, T.** Electrooptic Bragg deflection modulator using periodically poled MgO : LiNbO₃ / T. Inuoe, T. Suhara. // *IEEE Photon. Technol. Lett.* — 2011. — V. 23, No. 17. — P. 1252–1254.
- [7] **Mhaouech, I.** Low drive voltage electro-optic Bragg deflector using a periodically poled lithium niobate planar waveguide / I. Mhaouech, V. Coda, G. Montemezzani, M. Chauvet, L. Guilbert // *Opt. Lett.* — 2016. — Vol 41. — No. 18. — P. 4174–4177.
- [8] **Shandarov, S. M.** Electrically controllable diffraction of light on periodic domain structures in ferroelectric crystals / S. M. Shandarov, E. N. Savchenkov, M. V. Borodin, A. E. Mandel, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics.* — 2019. — Vol. 542. — P. 58–63.
- [9] **Шандаров, С. М.** Электрически управляемая дифракция света на периодических доменных структурах в сегнетоэлектрических кристаллах / С. М. Шандаров, Е. Н. Савченков, М. В. Бородин, А. Е. Мандель, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // HOLOEXPO 2018: XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 66–70.
- [10] **Wang, T. J.** Electro-optically spectrum switchable, multiwavelength optical parametric oscillators based on aperiodically poled lithium niobate / T. J. Wang, L. M. Deng, H. P. Chung, W. K. Chang, T. D. Pham, Q. H. Tseng, R. Geiss, T. Pertsch, and Y. H. Chen // *Opt. Lett.* — 2020. — Vol. 45. — No. 20. — P. 5848–5851.
- [11] **Schröder, M.** Conducting domain walls in lithium niobate single crystals. / M. Schröder, A. Haußmann, A. Thiessen, E. Soergel, T. Woike, L. M. Eng // *Adv. Funct. Mater.* — 2012. — Vol. 22. — P. 3936–3944.
- [12] **Werner, C. S.** Large and accessible conductivity of charged domain walls in lithium niobate / C. S. Werner, S. J. Herr, K. Buse, B. Sturman, E. Soegel, C. Razzaghi, I. Breunig. // *Sci. Rep.* — 2017. — Vol. 7. — P. 9862.
- [13] **Esin, A. A.** Tilt control of the charged domain walls in lithium niobate / A. A. Esin, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Appl. Phys. Lett.* — 2019. — Vol. 114. — P. 092901.
- [14] **Савченков, Е. Н.** Дифракция света на регулярной доменной структуре с наклонными стенками в MgO:LiNbO₃ / Е. Н. Савченков, С. М. Шандаров, С. В. Смирнов, А. А. Есин, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // *Письма в ЖЭТФ.* — 2019. — Том 110. — №3. — С. 165–169.
- [15] **Шандаров, С. М.** Дифракция света в сегнетоэлектрических кристаллах на периодически поляризованных структурах с заряженными и нейтральными доменными стенками / С. М. Шандаров, Е. Н. Савченков, С. В. Смирнов, А. Е. Шараева, В. А. Краковский, Л. Я. Серебренников, А. А. Есин, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. — С. 265–273.
- [16] **Александровский, А. Л.** Линейная и нелинейная дифракционные решетки в монокристаллах ниобата лития с периодической доменной структурой / А. Л. Александровский, О. А. Глико, И. И. Наумова, В. И. Прялкин // *Квантовая электроника.* — 1996. — Том 23. — № 7. — С. 657–659.
- [17] **Müller, M.** Investigation of periodically poled lithium niobate crystals by light diffraction / M. Müller, E. Soergel, K. Buse, C. Langrock, M. M. Fejer // *J. Appl. Phys.* — 2005. — Vol. 97. — P. 044102.

- [18] **Shandarov, S.M.** Collinear and isotropic diffraction of laser beam and incoherent light on periodically poled domain structures in lithium niobate / S. M. Shandarov, A. E. Mandel, S. V. Smirnov, T. M. Akylbaev, M. V. Borodin, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics*. — 2016. — Vol. 496. — P. 134–142.
- [19] **Shandarov, S. M.** Linear diffraction of light waves in periodically poled lithium niobate crystal / S. M. Shandarov, A. E. Mandel, A. V. Andrianova, G. I. Bolshanin, M. V. Borodin, A. Yu. Kim, S. V. Smirnov, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics*. — 2017. — Vol. 508. — P. 49–57.
- [20] **Шандаров, С. М.** Дифракционные и интерферометрические методы исследования периодически поляризованных доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития / С. М. Шандаров, А. Е. Мандель, Е. Н. Савченков, М. В. Бородин, С. В. Смирнов, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // *Голография. Наука и практика : XIV международная конференция HOLOEXPO 2017: Тезисы докладов / МГТУ им. Н. Э. Баумана, ООО «МНГС»*. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — С. 203–209.
- [21] **Shandarov, S. M.** Linear diffraction of light waves on periodically poled domain structures in lithium niobate crystals: collinear, isotropic, and anisotropic geometries / S. M. Shandarov, A. E. Mandel, T. M. Akylbaev, M. V. Borodin, E. N. Savchenkov, S. V. Smirnov, A. R. Akhmatkhanov, V. Yu. Shur // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2017. — Vol. 867. — P. 012017.
- [22] **Савченков, Е. Н.** Наблюдение фотоиндуцированной проводимости регулярной доменной структуры с наклонными стенками в $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ на длине волны 632.8 нм при дифракции Брэгга / Е. Н. Савченков, А. В. Дубиков, А. Е. Шараева, Н. И. Буримов, С. М. Шандаров, А. А. Есин, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // *Письма в ЖЭТФ*. — 2020. — Том 112. — № 10. — С. 644–649.
- [23] **Lu, Y. Q.** Electro-optic effect of periodically poled optical superlattice and its applications / Y. Q. Lu, Z. L. Wan, Q. Wang, Y. X. Xi, N. B. Ming // *Appl. Phys. Lett.* — 2000. — Vol. 77. — P. 3719–3721.
- [24] **Savchenkov, E. N.** Photoinduced conductivity during sub-bandgap illumination in periodically poled $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ with charged domain walls / E. N. Savchenkov, A. V. Dubikov, D. E. Kuzmich, A. E. Sharaeva, S. M. Shandarov, N. I. Burimov, M. A. Chuvakova, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Optical Materials* — 2021. — Vol. 122. — P. 111813
- [25] **Wengler, M. C.** Ultraviolet light-assisted domain inversion in magnesium-doped lithium niobate crystals / M.C. Wengler, U. Heinemeyer, E. Soergel, K. Buse // *J. Appl. Phys.* — 2005. — Vol. 98. — Art. 064104.
- [26] **Шандаров, С. М.** Дифракционные методы исследования регулярных доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах семейства ниобата и танталата лития / С. М. Шандаров, Е. Н. Савченков, Н. И. Буримов, А. В. Дубиков, Д. Е. Кузьмич, Д. А. Губинская, М. А. Федянина, А. Р. Ахматханов, А. А. Есин, В. Я. Шур // *HOLOEXPO 2021: Тезисы докладов*. — 2021— P. 68–76.
- [27] **Yatsenko, A. V.** Electrical Properties of LiTaO_3 Single Crystals at 290–450 K / A. V. Yatsenko, M. N. Palatnikov, O. V. Makarova, N. V. Sidorov & S. V. Yevdokimov // *Ferroelectrics* — 2015 — 477:1 — P.47–53.

Investigation of diffraction characteristics and photoinduced conductivity of regular domain structures in a lithium tantalate crystal based on Bragg diffraction methods

E. N. Savchenkov¹, N. I. Burimov¹, S. M. Shandarov¹, A. R. Akhmatkhanov², M. A. Chuvakova², V. Y. Shur²

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

² Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

The paper presents the results of a Bragg diffraction study of the characteristics of regular domain structures (RDS) created in ferroelectric crystals of 1%MgO:LiTaO₃ by switching polarization under the action of an external spatially periodic field. Isotropic and anisotropic Bragg diffraction on disturbances of optical properties created by RDS in a 1%MgO:LiTaO₃ crystal in the absence of an external field has been experimentally studied for wavelengths of 532 and 633 nm. The effective photoinduced conductivity was studied by relaxation of the Bragg diffraction efficiency in an applied constant electric field of RDS in a 1%MgO:LiTaO₃ crystal having non-inclined domain walls for wavelengths of 532, 633 and 657 nm. The sublinear character of conductivity dependence on the intensity of the inducing radiation are established for this RDS.

Keywords: Regular domain structures, Bragg diffraction, Anisotropic diffraction, Lithium tantalate, Domain walls, Photoinduced conductivity.