

# Температурные зависимости эффектов дифракции света на регулярных доменных структурах в кристаллах танталата лития

С. М. Шандаров<sup>1</sup>, А. В. Дубиков<sup>1</sup>, Е. Н. Савченков<sup>1</sup>, Д. А. Горбунова<sup>1</sup>, М. А. Федянина<sup>1</sup>, Н. И. Буримов<sup>1</sup>, А. Р. Ахматханов<sup>2</sup>, М. А. Чувакова<sup>2</sup>, В. Я. Шур<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Представлены результаты исследования температурных зависимостей эффектов изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на регулярной доменной структуре с периодом 7,99 мкм, созданной в стехиометрическом кристалле 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> переключением поляризации в пространственно-периодическом поле. В температурном диапазоне от 10 до 110 °С, включающем изотропную точку при  $T_i = 66$  °С, наблюдались различные вырожденные варианты, при которых реализуется дифракция Брэгга с двумя и тремя дифракционными максимумами с эффективностью, достигающей около 0,4 %.

**Ключевые слова:** регулярная доменная структура, дифракция Брэгга, анизотропная дифракция, танталат лития.

*Цитирование:* Шандаров, С. М. Температурные зависимости эффектов дифракции света на регулярных доменных структурах в кристаллах танталата лития / С. М. Шандаров, А. В. Дубиков, Е. Н. Савченков, Д. А. Горбунова, М. А. Федянина, Н. И. Буримов, А. Р. Ахматханов, М. А. Чувакова, В. Я. Шур // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 426–434.

## Введение

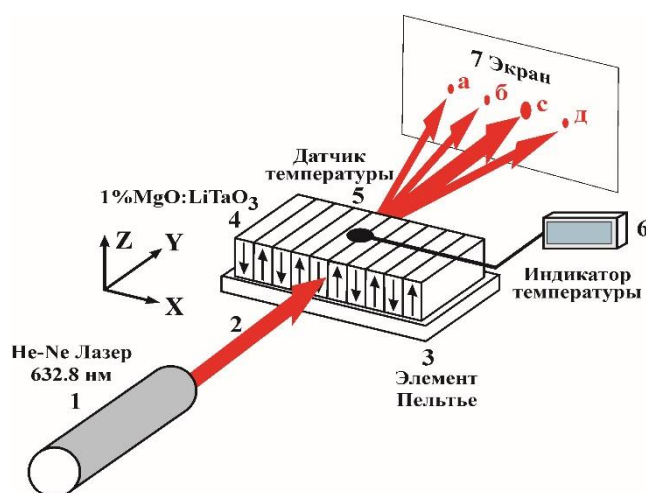
Современный уровень развития доменной инженерии [1–4] позволяет создавать в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития, танталата лития и титанил-фосфата калия и в тонкопленочных структурах на их основе регулярные доменные структуры (РДС), используемые для устройств квазисинхронного спектрального преобразования лазерного излучения и его электрооптической модуляции [5–10]. Дифракция света на доменных стенках РДС может быть использована, во-первых, для контроля их качества [11, 12], а во-вторых, влияет на амплитудные характеристики и величину нелинейных искажений при электрооптической модуляции лазерного излучения [8, 9]. Наряду с брэгговской дифракцией изотропного типа на доменных стенках РДС, проявляющейся при такой модуляции, для периодически поляризованных кристаллов ниобата лития (PPLN) и танталата лития (PPLT) наблюдалась и анизотропная дифракция Брэгга [12–14]. Температурные зависимости обыкновенного и необыкновенного показателей преломления для PPLN и PPLT необходимо учитывать как при реализации эффектов квазисинхронизма, так и при анализе условий Брэгга для осуществления электрооптической модуляции. Для этого принято использовать соответствующие уравнения Зелмеера (см., например, [15–17]), которые не всегда точно описывают показатели преломления для реальных образцов PPLN и PPLT.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование температурных зависимостей для различных эффектов при изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на РДС с периодом  $\Lambda = 7,99$  мкм, созданной в стехиометрическом кристалле  $1\%MgO:LiTaO_3$  переключением поляризации в пространственно-периодическом поле, в диапазоне от 10 до 110 °С. Получено, что ниже изотропной точки  $T_i = 66$  °С для необыкновенного ( $e$ ) зондирующего пучка с длиной волны  $\lambda = 632,8$  нм эффект вырождения, при котором одновременно наблюдается как изотропный, так и анизотропный виды дифракции, имеет место при температуре  $T_{deo} = 10,5$  °С. Вырожденная анизотропная дифракция с двумя дифракционными максимумами типа  $e-o$  наблюдалась при температуре  $T_{deo} = 41,5$  °С; подобная же дифракция при обыкновенном ( $o$ ) зондирующем пучке типа  $o-e$  имела место при  $T_{doe} = 91$  °С. Выше изотропной точки, при  $T_{dooe} = 107,5$  °С, наблюдалась дифракция из обыкновенного зондирующего пучка в максимумы с обыкновенным и необыкновенным состояниями поляризации.

### Методика эксперимента

В экспериментах исследовалась РДС с пространственным периодом  $\Lambda = 7,99$  мкм, сформированная в ООО «Лабфер» электрической переполяризацией в образце  $1\%MgO:LiTaO_3$ , имеющем размеры  $6 \times 2 \times 1$  мм<sup>3</sup> вдоль осей X, Y и Z, соответственно. Переполяризованные области кристалла имели ненаклонные границы (доменные стенки Y-типа), перпендикулярные кристаллографической оси X и полностью соответствующие его поперечному сечению.

Для наблюдения влияния температуры на эффекты изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС использовалась экспериментальная установка, схема которой иллюстрируется рис. 1.



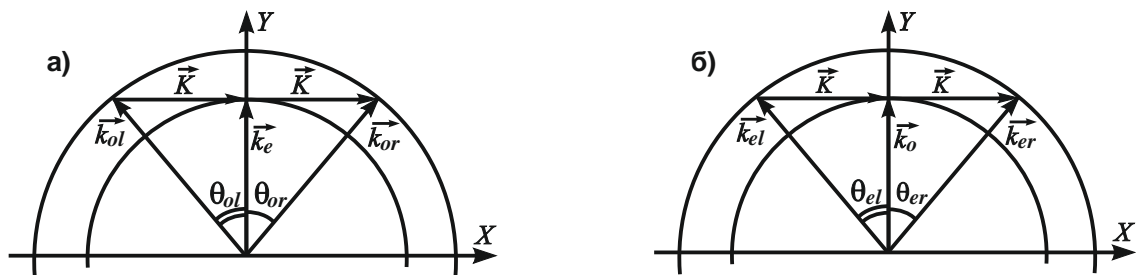
**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для исследования температурных зависимостей различных эффектов, наблюдаемых при изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС в кристалле  $1\%MgO:LiTaO_3$ .

Изменение и контроль температуры образца с РДС 4 осуществлялось с помощью элемента Пельтье 3, датчика 5 и индикатора температуры 6, подключенных к программируемому блоку управления. Он позволял задавать температуру в диапазоне от 10 до 110 °С и поддерживать ее с точностью  $\pm 0,2$  °С. Для точной подстройки по углу Брэгга относительно зондирующего светового пучка 2, распространяющегося в плоскости  $XU$  кристалла при наблюдении различных дифракционных процессов, образец с элементом Пельтье устанавливался на прецизионном поворотном столике. Зондирующий гауссов пучок 2 от He-Ne лазера 1 с длиной волны  $\lambda = 632.8$  нм, выходной мощностью 22,5 мВт и вектором поляризации, ориентированным вдоль оси  $Z$  или в плоскости  $XU$ , фокусировался сферической или цилиндрической линзой на середину входной грани образца  $y = 0$ . Для определения эффективности дифракции использовался измеритель мощности THORLABS-100D. Качественный вид наблюдаемых картин дифракции в дальней зоне фиксировался на экране 7, расположенном на расстоянии  $L = 1$  м от кристалла, визуально и с помощью цифровой фотокамеры.

Проведенные эксперименты показали, что для исследуемого кристалла  $1\%MgO:LiTaO_3$  при температуре  $T_i = 66$  °С наблюдается изотропная точка, при которой показатели преломления для обыкновенных и необыкновенных волн становятся равными друг другу:  $n_o(T_i) = n_e(T_i)$ . Кроме того, наряду с обычными вариантами изотропной и анизотропной дифракции Брэгга различных порядков, подробно описанных в работах [8, 9, 12–14], на определенных температурах наблюдались картины дифракции вырожденных типов, когда на экране 7 одновременно присутствовали 2 или 3 брэгговских максимума. Следует отметить, что вырожденная анизотропная дифракция Брэгга с двумя максимумами наблюдалась ранее при акустооптическом взаимодействии на фиксированных частотах акустических волн, возбуждаемых в одноосных кристаллах [18]. Подробное описание наблюдаемых процессов вырожденных вариантов дифракции на доменных стенках РДС в кристалле  $1\%MgO:LiTaO_3$  представлено ниже.

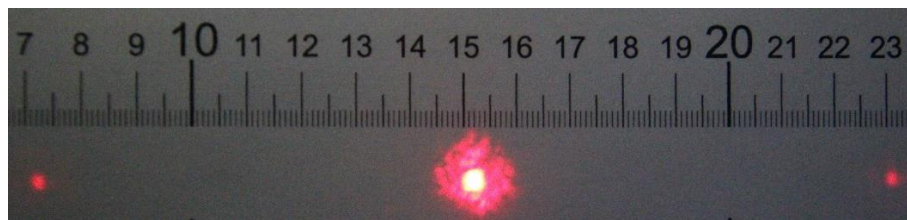
### **Вырожденная дифракция Брэгга на доменных стенках РДС**

Векторные диаграммы для вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга на РДС, аналогичные наблюдаемым при акустооптическом взаимодействии в одноосных кристаллах [18], представлены на рис. 2.



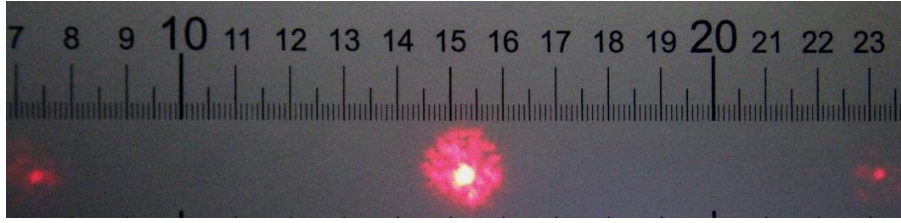
**Рис. 2.** Векторные диаграммы вырожденной анизотропной дифракции Брэгга на РДС в кристалле 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> при температуре  $T_1 = 41,5$  °C ниже изотропной точки, для необыкновенного (e) зондирующего пучка (а) и при  $T_2 = 91$  °C выше нее, для обыкновенного (o) зондирующего пучка (б).

Такой вид дифракции Брэгга наблюдался при двух температурах образца,  $T_1 = 41,5$  °C (рис. 2а) и  $T_2 = 91$  °C (рис. 2б). В первом случае, при  $n_o(T_1) > n_e(T_1)$ , использовался необыкновенный зондирующий пучок с волновым вектором  $\vec{k}_e$ , с высокой точностью ориентированный ортогонально к вектору решетки РДС  $\vec{K}$ , а дифрагированные обыкновенные пучки с волновыми векторами  $\vec{k}_{ol}$  и  $\vec{k}_{or}$  имели симметричное угловое положение ( $\theta_{ol} = \theta_{or}$ ) относительно  $\vec{k}_e$ . Наблюдаемая при этом на экране 7 (см. рис. 1) дифракционная картина иллюстрируется рис. 3.



**Рис. 3.** Картина в дальней зоне для вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС ( $\Lambda = 7,99$  мкм) в кристалле 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> при температуре  $T_1 = 41,5$  °C и необыкновенном зондирующем пучке, соответствующая векторной диаграмме, показанной на рис. 2а

Во втором случае ( $T_2 = 91$  °C) для наблюдения вырожденной дифракции аналогичного типа, при  $n_o(T_2) < n_e(T_2)$ , использовался обыкновенный зондирующий пучок с волновым вектором  $\vec{k}_o$ , порождавший дифрагированные необыкновенные пучки с волновыми векторами  $\vec{k}_{el}$  и  $\vec{k}_{er}$  (см. рис. 2б). Представленная на рис. 4 дифракционная картина, наблюдаемая при данной температуре, показывает, что углы между зондирующими и дифрагированными пучками в воздухе  $\theta_{dif}^{air}$  при температурах  $T_1$  и  $T_2$  совпадают с высокой точностью и равны 0,079 рад (4,53 угл. град.).



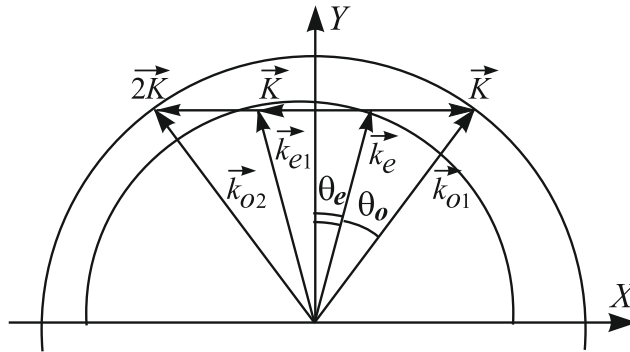
**Рис. 4.** Картина в дальней зоне для вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС ( $\Lambda = 7,99$  мкм) в кристалле  $1\%MgO:LiTaO_3$  при температуре  $T_2 = 91$  °С и обыкновенном зондирующем пучке, соответствующая векторной диаграмме, показанной на рис. 2б.

Из иллюстрируемых рис. 2 векторных диаграмм легко показать, что углы дифракции  $\theta_{dif}^{air}(T_1)$  и  $\theta_{dif}^{air}(T_2)$  равны друг другу и определяются соотношениями

$$\sin[\theta_{dif}^{air}(T_1)] = \frac{\lambda}{\Lambda} = \sqrt{n_o^2(T_1) - n_e^2(T_1)}, \quad \sin[\theta_{dif}^{air}(T_2)] = \frac{\lambda}{\Lambda} = \sqrt{n_e^2(T_2) - n_o^2(T_2)}. \quad (1)$$

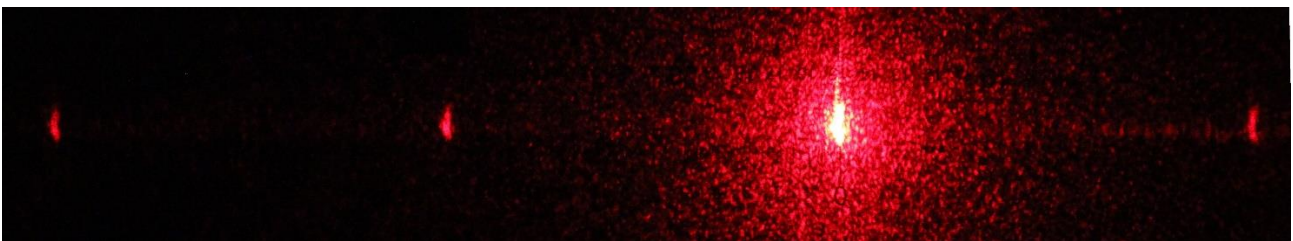
Отсюда следует, что экспериментальные данные для углов между зондирующими и дифрагированными пучками в воздухе хорошо согласуются с расчетным значением  $\theta_{dif}^{air}(T_1) = \theta_{dif}^{air}(T_2) = \arcsin(\lambda / \Lambda) = 0,0792$  рад, а разность квадратов показателей преломления кристалла  $1\%MgO:LiTaO_3$  на длине волны  $\lambda = 632,8$  нм при температурах  $T_1$  и  $T_2$ , соответствующих реализации вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга на РДС с периодом  $\Lambda = 7,99$  мкм, может быть оценена как  $n_o^2(T_1) - n_e^2(T_1) = n_e^2(T_2) - n_o^2(T_2) = 6,27 \cdot 10^{-3}$ . Измерения эффективности такой вырожденной дифракции показали, что в максимуме она достигает значений  $\eta_m \approx 0,4$  %.

Кроме подробно рассмотренной выше вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга, экспериментально наблюдался и другой тип вырожденного взаимодействия, не имеющий аналогов с известными из [18] акустооптическими вариантами и характеризующийся тремя максимумами, сопровождающими зондирующий пучок. Соответствующая ему векторная диаграмма, реализуемая при температуре кристалла  $T_3 = 10,5$  °С для необыкновенного зондирующего пучка с волновым вектором  $\vec{k}_e$ , иллюстрируется рис. 5.



**Рис. 5.** Векторная диаграмма вырожденной дифракции Брэгга на РДС в кристалле 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> при температуре  $T_3 = 10,5$  °С, происходящая из необыкновенного зондирующего пучка в максимумы с обыкновенными и необыкновенными состояниями поляризации.  $\theta_e$  – угол между волновым вектором зондирующего пучка и осью Y кристалла;  $\theta_0$  – угол отклонения от зондирующего пучка для обыкновенного пучка, дифрагированного в первый порядок.

При данной температуре ( $T_3 < T_i$ ,  $n_o(T_3) > n_e(T_3)$ ) условия дифракции Брэгга в первый порядок на составляющей возмущений оптических свойств доменными стенками РДС с волновым вектором  $\vec{K}$  удовлетворяются одновременно для необыкновенного и обыкновенного пучков с волновыми векторами  $\vec{k}_{o1}$  (изотропная дифракция) и  $\vec{k}_{e1}$  (анизотропный процесс) соответственно. Кроме этого, здесь удовлетворяются условия Брэгга для анизотропной дифракции во второй порядок на создаваемых РДС возмущениях с вектором  $2\vec{K}$ , при которой рождается обыкновенный пучок с волновым вектором  $\vec{k}_{o2}$ . Наблюдаемая на экране 7 при таких процессах дифракционная картина (см. рис. 1) иллюстрируется рис. 6.



**Рис. 6.** Картина в дальней зоне для вырожденной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС ( $\Lambda = 7,99$  мкм) с тремя максимумами, сопровождающими необыкновенный зондирующий пучок, в кристалле 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> при температуре  $T_3 = 10,5$  °С, соответствующая векторной диаграмме, показанной на рис. 5. Световые пучки справа налево: обыкновенный пучок (анизотропная дифракция первого порядка с эффективностью  $\eta \approx 0,11\%$ ); необыкновенный зондирующий пучок; необыкновенный пучок (изотропная дифракция первого порядка,  $\eta \approx 0,08\%$ ); обыкновенный пучок (анизотропная дифракция второго порядка,  $\eta \approx 0,22\%$ ).

Для температуры кристалла  $T_4 = 107,5$  °С ( $T_4 > T_i$ ,  $n_o(T_4) < n_e(T_4)$ ) подобный вид дифракции наблюдался при обыкновенном зондирующем пучке; в этом случае поляризация всех дифрагированных пучков изменялась на ортогональную.

Используя представленные на рис. 5 векторные диаграммы, можно найти разности квадратов показателей преломления кристалла 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> на длине волны  $\lambda = 632,8$  нм при температурах  $T_3$  и  $T_4$  в следующем виде:

$$n_o^2(T_3) - n_e^2(T_3) = n_e^2(T_4) - n_o^2(T_4) = 2 \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 = 1,254 \cdot 10^{-2}. \quad (2)$$

Полученные соотношения для разности квадратов показателей преломления кристалла танталата лития при температурах, соответствующих четырем вариантам вырожденной дифракции Брэгга на доменных стенках, созданной в нем РДС, могут быть использованы для экспериментального уточнения данных материальных параметров.

### Заключение

Таким образом, исследованы температурные зависимости эффектов изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС с пространственным периодом 7,99 мкм, созданной в стехиометрическом кристалле 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> переключением поляризации в пространственно-периодическом поле. Для исследованного температурного диапазона от 10 до 110 °С получено, что ниже изотропной точки  $T_i = 66$  °С для необыкновенного зондирующего пучка с длиной волны  $\lambda = 632,8$  нм эффект вырождения, при котором одновременно наблюдается как изотропный, так и анизотропный виды дифракции, имеет место при температуре  $T_{deeo} = T_3 = 10,5$  °С. Вырожденная анизотропная дифракция с двумя дифракционными максимумами типа  $e-o$  наблюдалась при температуре  $T_{deo} = T_1 = 41$  °С; подобная же дифракция типа  $o-e$  при обыкновенном зондирующем пучке имела место при  $T_{doe} = T_2 = 91$  °С. Выше изотропной точки, при  $T_{dooe} = T_4 = 107,5$  °С, наблюдалась дифракция из обыкновенного зондирующего пучка в максимумы с обыкновенным и необыкновенным состояниями поляризации.

Получены соотношения для разности квадратов показателей преломления кристалла танталата лития при температурах, соответствующих всем четырем вариантам вырожденной дифракции Брэгга. Найденные для них экспериментальные значения углов между зондирующими и дифрагированными пучками в воздухе хорошо согласуются с результатами проведенных расчетов.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023-2025 годы (задание FEWM-2023-0012).

## Список источников

- [1] **Крутов, В. В.** Технология формирования сегнетоэлектрических регулярных доменных структур с использованием интерферирующих упругих волн / В. В. Крутов, А.С. Сигов // Russian Technological Journal. — 2022. — Т. 10. — №. 5. — С. 73–91.
- [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] **Sun, D.** Microstructure and domain engineering of lithium niobate crystal films for integrated photonic applications / D. Sun, Y. Zhang, D. Wang et al. // Light: Science & Applications. — 2020. — Т. 9. — №. 1. — P. 197.
- [5] **Ferrari, P.** Ferroelectric crystals for photonic applications / P. Ferrari, S. Grilli, P. De Natale. (Eds.) — Berlin–Heidelberg: Springer–Verlag, 2009, 2014. — 493 p.
- [6] **Inoue, T.** Electrooptic Bragg deflection modulator using periodically poled MgO : LiNbO<sub>3</sub> / T. Inoue, 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. Савченко, 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] **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.
- [12] **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. Савченко, 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.
- [13] **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.



- [14] Савченков, Е. Н. Анизотропная дифракция лазерного излучения на регулярных доменных структурах в кристаллах LiNbO<sub>3</sub> и LiTaO<sub>3</sub> / Е. Н. Савченков, Н. И. Буримов, С. М. Шандаров, Д. А. Губинская, М. А. Федянина, А. Р. Ахматханов, М. А. Чувакова, В. Я. Шур // Сборник тезисов IV семинара «Современные нанотехнологии» (IWMN-2022).: Екатеринбург, УрФУ. — 2022. — С. 114–115.
- [15] **Volk, T.** Lithium Niobate: Defects, Photorefractive and Ferroelectric Switching / T. Volk, M. Wöhlecke // Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. — 247 p.
- [16] **Nikogosyan, D. N.** Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey / D. N. Nikogosyan // Springer Science + Business Media, 2005. — 429 p.
- [17] **Bruner, A.** Temperature-dependent Sellmeier equation for the refractive index of stoichiometric lithium tantalate /A. Bruner, D. Eger, M. B. Oron, P. Blau, M. Katz, S. Ruschin // Opt. Lett. — 2003. — V. 28. — P. 194–196.
- [18] **Xu, J.** Acousto-optic devices: principles, design, and applications / J. Xu, R. Stroud // Wiley. — 1992.

## Temperature dependences of light diffraction effects on regular domain structures in lithium tantalate crystals

*S. M. Shandarov<sup>1</sup>, A. V. Dubikov<sup>1</sup>, E. N. Savchenkov<sup>1</sup>, D. A. Gorbunova<sup>1</sup>, M. A. Fedjanina<sup>1</sup>,  
N. I. Burimov<sup>1</sup>, A. R. Akhmatkhanov<sup>2</sup>, M. A. Chuvakova<sup>2</sup>, V. Ja. Shur<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

The paper presents the results of a study of the temperature dependences of the isotropic and anisotropic Bragg diffraction effects on a regular domain structure with a period of 7.99 μm created in 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> stoichiometric crystal by switching polarization in a spatially periodic field. Various degenerate variants of Bragg diffraction with two and three diffraction maxima with an efficiency of about 0.4 % were observed in the temperature range from 10 to 110 °C, including an isotropic point at T<sub>i</sub> = 66 °C.

*Keywords:* Regular domain structure, Bragg diffraction, Anisotropic diffraction, Lithium tantalate.