

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

С. М. Шандаров¹, А. В. Дубиков¹, Е. Н. Савченков¹, Д. А. Горбунова¹, М. А. Федянина¹, Н. И. Буримов¹, А. Р. Ахматханов², М. А. Чувакова², В. Я. Шур²

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

² 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:LiTaO₃ 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 $6 \times 2 \times 1$ мм³ 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.

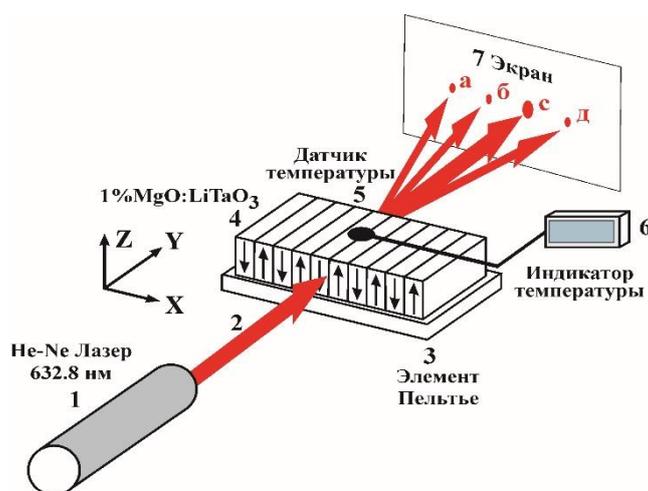


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования температурных зависимостей различных эффектов, наблюдаемых при изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС в кристалле $1\%MgO:LiTaO_3$.

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.

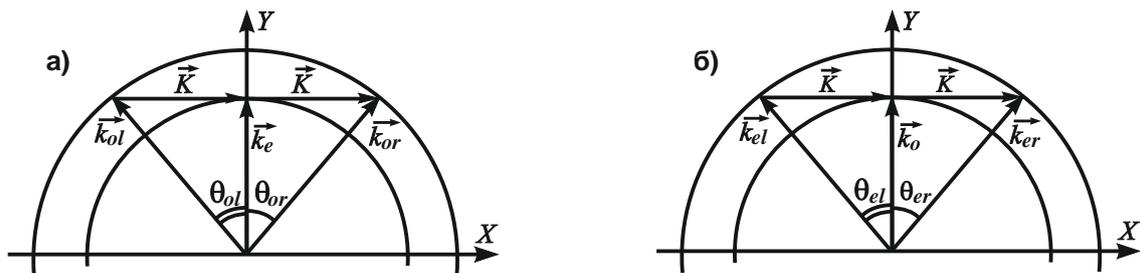


Рис. 2. Векторные диаграммы вырожденной анизотропной дифракции Брэгга на РДС в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ при температуре $T_1 = 41,5$ °C ниже изотропной точки, для необыкновенного (e) зондирующего пучка (а) и при $T_2 = 91$ °C выше нее, для обыкновенного (o) зондирующего пучка (б).

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.

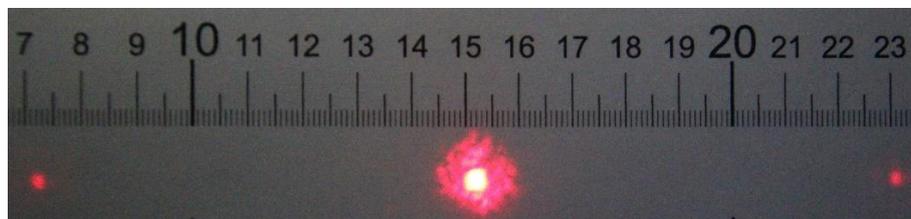


Рис. 3. Картина в дальней зоне для вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС ($\Lambda = 7,99$ мкм) в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ при температуре $T_1 = 41,5$ °C и необыкновенном зондирующем пучке, соответствующая векторной диаграмме, показанной на рис. 2а

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 θ_{dif}^{air} при температурах T_1 и T_2 совпадают с высокой точностью и равны 0,079 рад (4,53 угл. град.).

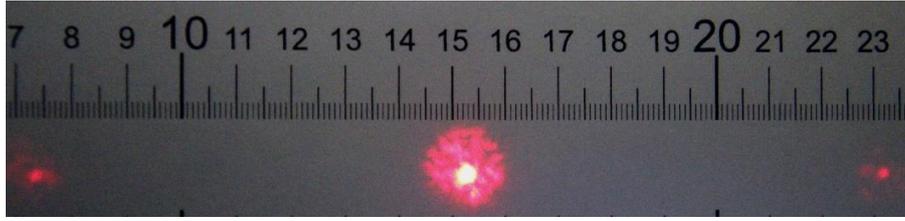


Рис. 4. Картина в дальней зоне для вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС ($\Lambda = 7,99$ мкм) в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ при температуре $T_2 = 91$ °C и обыкновенном зондирующем пучке, соответствующая векторной диаграмме, показанной на рис. 2б.

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:LiTaO₃ 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 $T_3 = 10,5$ °C для необыкновенного зондирующего пучка с волновым вектором \vec{k}_e , иллюстрируется рис. 5.

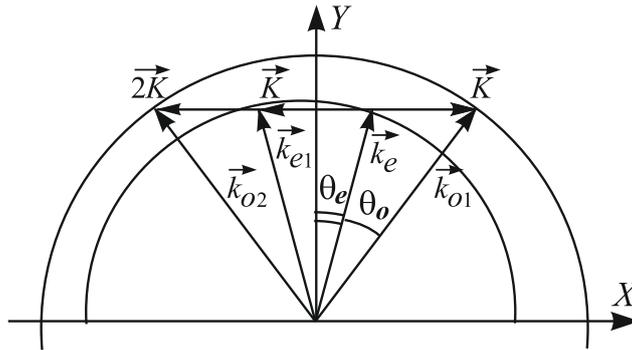


Рис. 5. Векторная диаграмма вырожденной дифракции Брэгга на РДС в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ при температуре $T_3 = 10,5$ °С, происходящая из необыкновенного зондирующего пучка в максимумы с обыкновенными и необыкновенными состояниями поляризации. θ_e – угол между волновым вектором зондирующего пучка и осью Y кристалла; θ_o – 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.

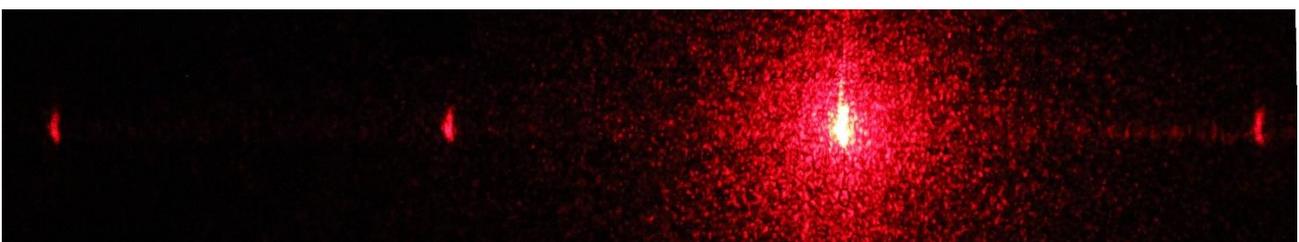


Рис. 6. Картина в дальней зоне для вырожденной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС ($\Lambda = 7,99$ мкм) с тремя максимумами, сопровождающими необыкновенный зондирующий пучок, в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ при температуре $T_3 = 10,5$ °С, соответствующая векторной диаграмме, показанной на рис. 5. Световые 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:LiTaO₃ 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:LiTaO₃ 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 : LiNbO₃ / 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 LiNbO₃ и LiTaO₃ / 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, Photorefraction 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. Shandarov¹, A. V. Dubikov¹, E. N. Savchenkov¹, D. A. Gorbunova¹, M. A. Fedjanina¹,
N. I. Burimov¹, A. R. Akhmatkhanov², M. A. Chuvakova², V. Ja. Shur²*

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

² 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:LiTaO₃ 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_i = 66 °C.

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