

Дифракционные методы исследования регулярных доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах семейства ниобата и танталата лития

С. М. Шандаров¹, Е. Н. Савченков¹, Н. И. Буримов¹, А. В. Дубиков¹, Д. Е. Кузьмич¹,
Д. А. Губинская¹, М. А. Федянина¹, А. Р. Ахматханов², А. А. Есин², 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 дифракционные методы исследования характеристик регулярных доменных структур (РДС), создаваемых в сегнетоэлектрических кристаллах 5% MgO:LiNbO₃ и 1% MgO:LiTaO₃ методом переключения поляризации под действием внешнего пространственно-периодического поля. Для РДС в кристалле 5% MgO:LiNbO₃ со стенками, наклоненными к полярной оси на угол $\alpha = \pm 0,31^\circ$, рассмотрена методика исследования их фотоиндуцированной проводимости по релаксации эффективности дифракции Брэгга в приложенном постоянном электрическом поле. Экспериментально исследована изотропная и анизотропная дифракция Брэгга на возмущениях оптических свойств, создаваемых РДС в кристалле 1% MgO:LiTaO₃, в отсутствие внешнего поля.

Ключевые слова: регулярные доменные структуры, дифракция Брэгга, анизотропная дифракция, ниобат лития, танталат лития, фотоиндуцированная проводимость доменных стенок.

Цитирование: 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 // НОЛОEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 68–76.

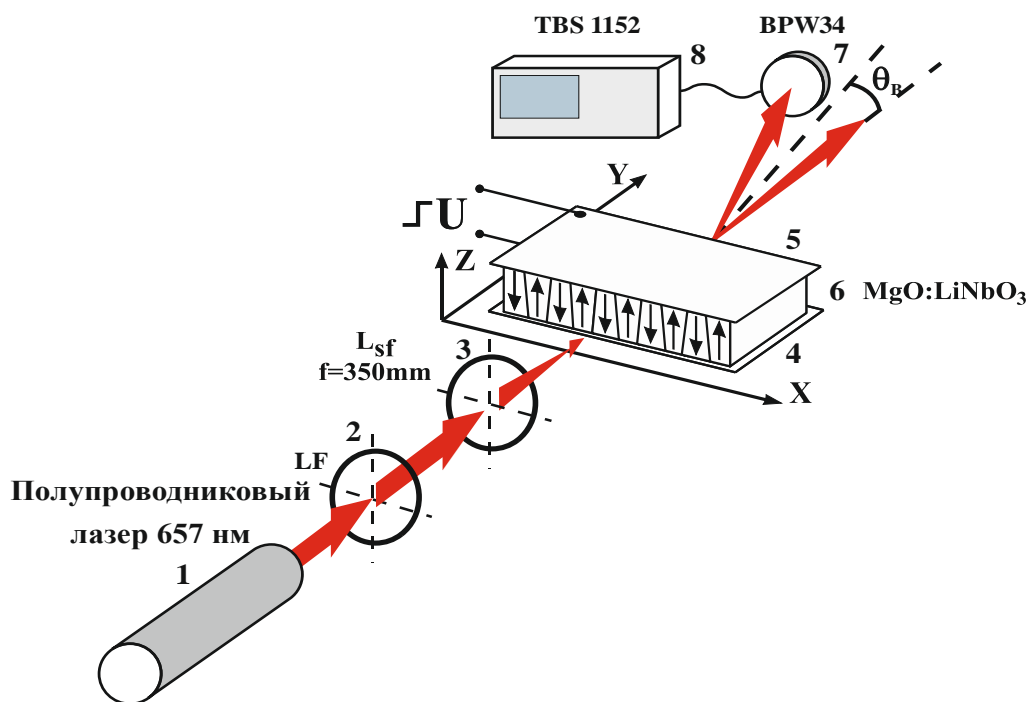
Введение

Развитие методов доменной инженерии [1–4] открывает возможности создания в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата и танталата лития РДС, эффективно используемых в настоящее время для квазисинхронного преобразования частоты лазерного излучения [4] и электрооптической модуляции его амплитудных [4–9] и спектральных [10] параметров. При этом необходимо обеспечить высокое качество создаваемых РДС, требуемую однородность пространственного периода Λ и воспроизводимость их параметров [3]. Реальные РДС имеют вариации доменов по размерам и по положению стенок, причем последние могут иметь наклон относительно полярной оси, который в кристаллах ниобата лития может составлять $0,2^\circ$ и более [11–15]. Неразрушающим методом контроля качества РДС, позволяющим определить их параметры, является линейная дифракция света, многие аспекты и особенности которой были подробно изучены в [5–9, 14–23] для доменных структур, сформированных в кристаллах ниобата лития различного состава.

Изотропная брэгговская дифракция в отсутствие приложенного к РДС внешнего электрического поля исследована в работах [14–16, 20, 21]. В этом случае изотропная дифракция, обусловленная возмущениями оптических свойств кристалла доменными стенками, наблюдалась в порядках $m = 1–6$ [14], $1–8$ [21] и $1–15$ [16], при распространении зондирующего пучка под соответствующими углами Брэгга к оси Y в плоскости XY кристаллов $5\% \text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ [14, 21] и к некоторому направлению в плоскости $YZ-57^\circ$ кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Y}:\text{Mg}$ [16]. Следует отметить, что метод изотропной дифракции Брэгга в отсутствие внешнего поля позволяет обнаружить наличие наклона доменных стенок РДС к полярной оси Z и измерить его величину [14]. Изотропная дифракция со многими дифракционными максимумами, наблюдаемыми при распространении вдоль оси Z , изучалась в [17–20] для РДС в кристаллах $5\% \text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ в отсутствие внешнего поля и в [17] для РДС в нелегированных кристаллах LiNbO_3 конгруэнтного состава в приложенном постоянном электрическом поле. Анализ различных аспектов дифракции Брэгга на РДС в кристаллах ниобата лития во внешнем электрическом поле, в том числе ее использования для электрооптической модуляции света, содержится, в частности, в [4–10, 14, 22, 23]. В [22] методом изотропной дифракции Брэгга на РДС в кристалле $5\% \text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ со стенками, наклоненными к полярной оси на угол $\alpha = \pm 0,31^\circ$, была обнаружена проводимость, фотоиндуцированная лазерным пучком с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм. Проведенные оценки показали, что при используемой в экспериментах его интенсивности в максимуме $I_0 = 49$ мВт/мм² усредненная по периоду Λ эффективная проводимость исследуемого кристалла с РДС может быть оценена как $\sigma_{\text{eff}} = 3,5 \cdot 10^{-9}$ Ом⁻¹м⁻¹, что более чем на четыре порядка превосходит известное для монокристаллического образца $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ значение темновой проводимости $\sigma_d \leq 1,9 \cdot 10^{-13}$ Ом⁻¹м⁻¹ [24]. Такая фотоиндуцированная проводимость может влиять на характеристики устройств электрооптического управления лазерным излучением на основе РДС с наклонными стенками в сегнетоэлектрических кристаллах и иметь спектральную зависимость.

Относящаяся к типу анизотропной коллинеарная дифракция исследована в [18] для РДС, созданной электрической переполяризацией в кристалле $5\% \text{MgO}:\text{LiNbO}_3$, в отсутствие внешнего поля, а также в [23] для ростовой доменной структуры в ниобате лития во внешнем электрическом поле, приложенном вдоль оси Y . Результаты исследования анизотропной дифракции Брэгга на РДС при распространении зондирующего пучка под соответствующими углами Брэгга к оси Y в плоскости XY кристалла $5\% \text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ представлены в [17, 21]. Следует отметить, что авторам [17, 21] удалось экспериментально обнаружить такую дифракцию и измерить ее эффективность только для порядков с номерами от $m = 4$ до $m = 8$.

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментальных исследований зависимости проводимости, наведенной зондирующим лазерным пучком с длиной волны $\lambda = 657$ нм и интенсивностью от 0,6 до 179 мВт/мм² в образце $5\% \text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ с РДС, изученной ранее в [14, 15, 22] для $\lambda = 632,8$ нм. Для РДС, сформированной в стехиометрическом кристалле $1\% \text{MgO}:\text{LiTaO}_3$, рассмотрена и экспериментально реализована изотропная и анизотропная дифракция Брэгга.



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

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

1. Исследование методом дифракции Брэгга проводимости РДС с наклонными стенками, фотоиндуцированной зондирующим пучком

Для регистрации временной зависимости эффективности электрооптической дифракции Брэгга в первый порядок использовалась описанная в [22] экспериментальная установка, в которой гелий-неоновый лазер был заменен на полупроводниковый лазерный диод (рис. 1), излучающий зондирующий световой пучок с длиной волны $\lambda = 657\text{ нм}$ и выходной мощностью 15 мВт. Постоянное внешнее электрическое напряжение U_0 положительной или отрицательной полярности прикладывалось к образцу с РДС, имеющему пространственный период $\Lambda = 8,79\text{ мкм}$ и размеры $2 \times 1\text{ мм}^2$ вдоль осей Y и Z , соответственно, с помощью механически прижимаемых к Z -граням медных электродов. Для включения напряжения использовалась цепь из тумблера и резистора с номиналом 1 кОм.

Пучок полупроводникового лазера с вектором поляризации вдоль оси Z кристалла фокусировался линзой с фокусным расстоянием 350 мм примерно в середину входной грани ($y = 0$) образца в перетяжку эллиптической формы с эффективной площадью $\approx 0,08\text{ мм}^2$. Подстройка положения перетяжки по оси Z проводилась по симметрии двух пятен в первом дифракционном максимуме, обусловленных дифракцией на двух системах параллельных доменных стенок, наклоненных к полярной оси на угол $\alpha = \pm 0,31^\circ$ [14, 22], в отсутствие приложенного напряжения (при $U_0 = 0$). Наблюдаемая при этом эффективность дифракции Брэгга на доменных стенках РДС имела значение $\eta_{dw} = 0,012$.

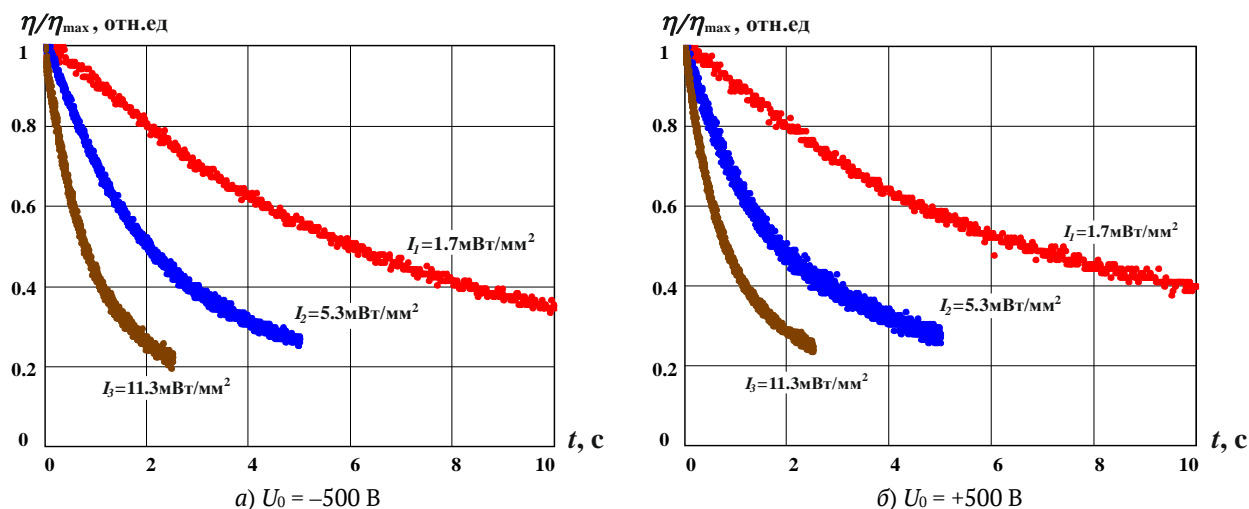


Рис. 2. Динамика эффективности дифракции Брэгга на РДС в первый порядок, наблюдаемая после приложения внешнего постоянного напряжения, для зондирующего лазерного пучка с интенсивностью в максимуме $I_1 = 1,7$, $I_2 = 5,3$ и $I_3 = 11,3$ мВт/мм²

После включения прилагаемого напряжения мощность дифрагированного луча $P(t)$, регистрируемая цифровым осциллографом TBS 1152, возрастала за время около 25 нс, и эффективность дифракции достигала максимальной величины, $\eta_m \approx 0,21$. 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 $\eta_{\pm}(t)/\eta_m$ для значений приложенного напряжения $U_0 = -500$ и $+500$ В представлены на рис. 2а и 2б соответственно.

Как видно из рисунка, зависимости $\eta_{-}(t)/\eta_m$ и $\eta_{+}(t)/\eta_m$ при одинаковых интенсивностях зондирующего пучка имеют количественные различия. В [14] было обнаружено, что при брэгговской дифракции зондирующего пучка с $\lambda = 632,8$ нм на исследуемой РДС последующее за продолжительной релаксацией выключение приложенного к ней внешнего поля приводит к быстрому увеличению эффективности дифракции до значения, близкого к η_m . Рассмотренные особенности поведения эффективности дифракции, как и в [22], могут быть объяснены релаксацией напряженности электрического поля пространственного заряда $E(t)$ в области РДС, засвечиваемой зондирующим пучком. Для наблюдаемой дифракции Брэгга со сравнительно слабой эффективностью воспользуемся предложенным в [22] подходом, в рамках которого релаксация этого поля описывается следующим соотношением.

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

Формула (1) и экспериментально измеренные значения η_{dw} , $\eta_{-}(t)$ и $\eta_{+}(t)$, позволяют рассчитать временные зависимости для процесса релаксации электрического поля в засвечиваемой зондирующим пучком области РДС при всех используемых значениях интенсивности

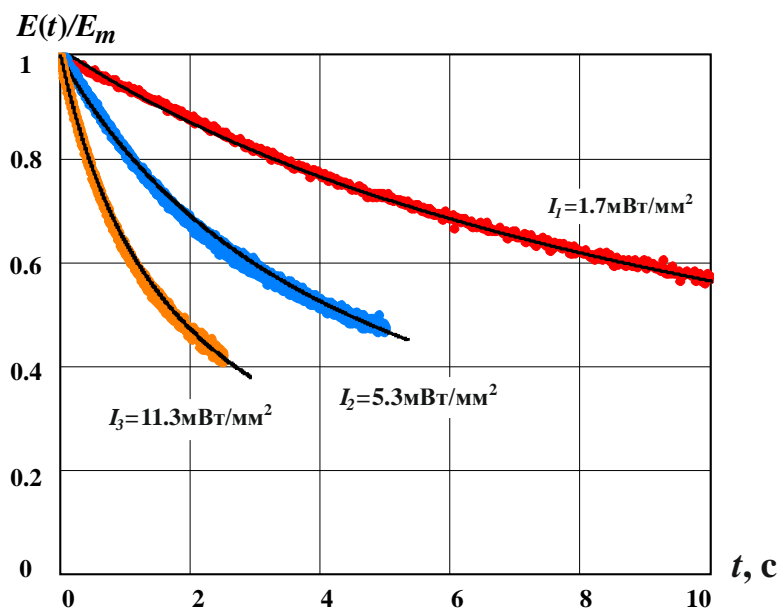


Рис. 3. Динамика релаксации электрического поля в засвечиваемой области РДС, рассчитанная по формуле (1) из экспериментальных данных для η_{dw} и для зависимостей $\eta_-(t)$ и $\eta_+(t)$, представленных на рис. 2 (точки), и ее аппроксимация функцией (2) (сплошные кривые)

зондирующего пучка. Пример расчета таких зависимостей $E(t)/E_m$, соответствующих представленным на рис. 2 данным для $\eta_-(t)/\eta_m$ и $\eta_+(t)/\eta_m$ и значению $\eta_{dw} = 0,012$, иллюстрируется рис. 3, где они показаны точками.

Как отмечалось в [22], динамика релаксации электрического поля в засвечиваемой области РДС может быть удовлетворительно описана функцией

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

где параметры a_E и b_E могут быть определены подгонкой по методу наименьших квадратов. Найденные с использованием данного подхода аппроксимирующие функции показаны на рис. 3 сплошными кривыми. Причиной релаксации, на начальном участке имеющей максвелловский характер, может являться экранировка внешнего поля вследствие вызываемого им перераспределения зарядов в области проводящих наклонных стенок [22]. В этом случае для расчета усредненной по периоду Λ эффективной проводимости кристалла с РДС, имеющей наклонные стенки, можно воспользоваться соотношением $\sigma_{eff}(I_0) = \epsilon_{33} a_E(I_0) b_E(I_0)$, где ϵ_{33} — статическая диэлектрическая проницаемость кристалла. Из анализа экспериментальных данных получено, что эффективная проводимость связана с интенсивностью зондирующего пучка в исследованном диапазоне, от 0,6 до 179 мВт/мм², линейной зависимостью,

$$\sigma_{eff}(I_0) = B_{ph} I_0, \quad (3)$$

с коэффициентом фотоиндуцированной проводимости $B_{ph} = 1,5 \cdot 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ Вт}^{-1} \text{ м}$. Для зондирующего пучка с интенсивностью $I_0 = 100 \text{ мВт/мм}^2$ эффективная проводимость исследуемой РДС может быть оценена, как $\sigma_{eff} = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, что превышает значение темновой проводимости $\sigma_d \leq 1,9 \cdot 10^{-13} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ для монокристаллического образца MgO:LiNbO_3 , приведенное в [24], примерно на четыре порядка.

Таким образом, электрооптическая модуляция лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 657$ нм, с использованием исследованной РДС с углом наклона доменных стенок к полярной оси $\alpha = \pm 0,31^\circ$, должна сопровождаться меньшим влиянием на ее характеристики фотоиндуцированной проводимости, чем в случае модуляции излучения с $\lambda = 628,3$ нм, при той же интенсивности зондирующего пучка.

2. Изотропная и анизотропная дифракция Брэгга на доменных стенках РДС, сформированной в кристалле 1 % MgO:LiTaO₃

В экспериментах исследовалась РДС, сформированная в компании ООО «Лабфер» методом переключения поляризации под действием внешнего пространственно-периодического поля в стехиометрическом кристалле 1 % MgO:LiTaO₃. Образец имел размеры $5 \times 2 \times 1$ мм³ по осям X, Y и Z, соответственно. Переключенные области кристалла с доменными стенками Y-типа имели пространственный период $\Lambda = 7,99$ мкм вдоль оси X. Зондирующий гауссов пучок He-Ne лазера с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм, диаметром около 1 мм и вектором поляризации, параллельным оси Z кристалла (e-волна), проходил через центр входной Y-границы образца, установленного на поворотном столике. Последний позволял изменять в плоскости XY угол между осью Y и зондирующим пучком для настройки по условиям Брэгга на дифракционные максимумы различных порядков. Эффективности дифракции для этих максимумов, η_{ee} и η_{eo} , определялась с использованием измерителя световой мощности Trolabs PM100D. Состояние поляризации света в дифракционных максимумах (e или o) фиксировалось с помощью дихроичного анализатора, устанавливаемого перед измерителем мощности.

Наблюдаемые визуально на отстоящем от выходной грани кристалла на 1650 мм экране дифракционные максимумы всех порядков как при изотропной ($m = 0 \dots 9$), так и при анизотропной ($m = 0 \dots 7$) дифракции, имели одинаковые распределения интенсивности $I_m(z)$, характеризующиеся единственным максимумом при $z = 0$. Из их вида следует, что в отличие от рассмотренного выше образца РДС в кристалле 5 % MgO:LiNbO₃ с наклонными стенками, для которого изотропная дифракция Брэгга описана в [14], для исследуемой РДС в 1 % MgO:LiTaO₃ доменные стенки характеризуются нулевым наклоном к полярной оси.

Результаты экспериментов по измерению эффективности изотропной (η_{ee}) и анизотропной (η_{eo}) дифракции Брэгга на создаваемых доменными стенками РДС возмущениях оптических свойств, составляющие спектра Фурье которых характеризуются пространственными частотами $2\pi m/\Lambda$ при значениях порядка дифракции m от 1 до 9, представлены в табл. 1.

Сравнение полученных результатов с приведенными в [20, 21] данными по эффективности дифракции Брэгга на РДС в кристалле 5 % MgO:LiNbO₃ на длине волны $\lambda = 655$ нм показывает, что вследствие значительно меньшего двулучепреломления танталата лития (из уравнений Селмейера в [25]: $n_o = 2,1716$ и $n_e = 2,1691$ для $\lambda = 632,8$ нм), чем ниобата лития (из уравнений Селмейера в [26]: $n_o = 2,2793$ и $n_e = 2,1914$ для $\lambda = 655$ нм), в исследованном образце наблюдается анизотропная дифракция и для низших порядков, с $m = 1 \dots 3$. Для изотропной

Табл. 1. Эффективность брэгговской дифракции на РДС в кристалле 1% MgO:LiTaO₃ для световых пучков, распространяющихся в плоскости XY

| <i>m</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\eta_{ee} \times 100$ | 0,92 | 1,68 | 1,56 | 0,23 | 0,75 | 0,11 | 0,38 | 0,08 | 0,18 |
| $\eta_{eo} \times 100$ | 0,23 | 0,37 | 0,14 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | — | — |

дифракции в обоих кристаллах максимальная эффективность наблюдается для второго порядка, при $m = 2$.

Заключение

Таким образом, методом дифракции Брэгга изучена зависимость проводимости, фотоиндуцированной зондирующим лазерным пучком с длиной волны $\lambda = 657$ нм и интенсивностью от 0,6 до 179 мВт/мм² в образце 5% MgO:LiNbO₃ с РДС, доменные стенки которой наклонены к полярной оси на угол $\alpha = \pm 0,31^\circ$. Проведенные исследования изотропного и анизотропного типов дифракции Брэгга на РДС показали возможность их наблюдения в кристалле 1% MgO:LiTaO₃ для порядков с $m = 1...9$ и $m = 1...7$, соответственно.

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. — Том 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 // *Applied Physics Reviews*. — 2015. — Vol. 2. — P. 040604.
- [4] **Ferrari, P.** *Ferroelectric crystals for photonic applications* / Edited by P. Ferrari, S. Grilli, P. De Natale. — 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 // *Review of Scientific Instruments*. — 2000. — Vol. 71. — P. 4010–4016.
- [6] **Inuoe, T.** [Electrooptic Bragg deflection modulator using periodically poled MgO:LiNbO₃](#) / T. Inuoe, T. Suhara // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2011. — Vol. 23. — № 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 // *Optics Letters*. — 2016. — Vol. 41. — № 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, Y. H. Chen // Optics Letters. — 2020. — Vol. 45. — № 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 // Advanced Function Materials. — 2012. — Vol. 22. — № 18. — 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 // Scientific Reports. — 2017. — Vol. 7. — № 1. — 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 // Applied Physics Letters. — 2019. — Vol. 114. — № 9. — P. 092901.
- [14] **Савченков, Е. Н.** Дифракция света на регулярной доменной структуре с наклонными стенками в $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ / 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 // Journal of Applied Physics. — 2005. — Vol. 97. — № 4. — 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. — № 1. — 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. Bolshinin, M. V. Borodin, A. Yu. Kim, S. V. Smirnov, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // Ferroelectrics. — 2017. — Vol. 508. — № 1. — 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». — М. : 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] **Савченко, 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. Савченко, 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 // Applied Physics Letters. — 2000. — Vol. 77. — № 23. — P. 3719–3721.
- [24] **Wengler, M. C.** [Ultraviolet light-assisted domain inversion in magnesium-doped lithium niobate crystals](#) / M. C. Wengler, U. Heinemeyer, E. Soergel, K. Buse // Journal of Applied Physics. — 2005. — Vol. 98. — № 6. — P. 064104.
- [25] **Dolev, I.** [Linear and nonlinear optical properties of \$\text{MgO}:\text{LiTaO}_3\$](#) / I. Dolev, A. Ganany-Padowicz, A. Arie, J. Magin, G. Gadret // Applied Physics B. — 2009. — Vol. 96. — P. 423–432.
- [26] **Shen, H. Y.** [Measurement of refractive indices and thermal refractive-index coefficients of \$\text{LiNbO}_3\$ crystal doped with 5 mol. % \$\text{MgO}\$](#) / H. Y. Shen, H. Xu, Z. D. Zeng, W. X. Lin, R. F. Wu, G. F. Xu // Applied Optics. — 1992. — Vol. 31. — № 31. — P. 6695–6697.