

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ПРИЛОЖЕННОГО К ФОТОРЕФРАКТИВНОМУ КРИСТАЛЛУ SBN ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ САМОФОКУСИРОВКИ ДВУМЕРНОГО ГАУССОВОГО СВЕТОВОГО ПУЧКА

В работе установлена зависимость степени самофокусировки двумерных гауссовых световых пучков от направления внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу, при постоянном радиусе входных пучков и с учетом всех компонент электрооптического тензора. Найдены направления внешнего электрического поля, для которых степень самофокусировки световых гауссовых пучков заданного размера с входной x - и y -поляризацией на входе в кристалл достигает максимального значения.

Ключевые слова: фоторефрактивный кристалл, двумерные световые пучки, гауссов профиль, внешнее электрическое поле, оптимальная ориентация, степень фокусировки.

In this paper, the dependence of the degree of self-focusing of two-dimensional Gaussian light beams on the direction of an external electric field applied to a crystal with a constant radius of the input beams and taking into account all components of the electro-optical tensor is established. The directions of the external electric field are found, for which the degree of self-focusing of light Gaussian beams of a given size with the input x - and y -polarization at the entrance to the crystal reaches a maximum value.

Keywords: photorefractive crystal, two-dimensional light beams, Gaussian profile, external electric field, optimal orientation, degree of focusing.

При исследовании распространения и взаимодействия световых пучков часто используют фоторефрактивные материалы, так как они обладают подходящими для этого электрооптическими свойствами. К настоящему времени уже известно большое количество различных фоторефрактивных материалов [1; 2], однако поиск новых, более перспективных, сред не пре-

кращается. К наиболее изучаемым фоторефрактивным материалам можно отнести фоторефрактивные кристаллы, в частности, кристаллы средних сингоний, к которым относится сегнетоэлектрический кристалл ниобата бария-стронция (SBN) класса симметрии 4 mm [2]. Благодаря таким особенностям этого кристалла как высокие значения диэлектрической проницаемости и электрооптических коэффициентов он часто используется в динамической голографии и при создании волноводных структур [3].

Несмотря на то, что кристаллы ниобата-бария стронция впервые были синтезированы еще в 1960 г. [4], интерес к ним не ослабевает и сейчас. Проводятся исследования различных световых явлений в этих кристаллах (напр., [5–11]), а также активно продолжают изучаться их физические свойства (напр., [12–16]).

Распространение и взаимодействие двумерных световых пучков в фоторефрактивном кристалле SBN рассматривалось многими авторами (см. напр., [17; 18]).

Однако в большинстве работ при исследовании световых пучков учитываются только две компоненты r_{33} и r_{13} электрооптического тензора \vec{r} , а направление внешнего электрического поля выбирается параллельным оптической оси кристалла [19–23].

В настоящей статье показано, что такое допущение, то есть учет только двух компонент электрооптического тензора \vec{r} , может быть применено только при направлении внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу вдоль его оптической оси. В других случаях, для получения более точных результатов, необходимо учитывать все компоненты электрооптического тензора \vec{r} .

Пусть двумерный гауссов световой пучок нормально падает на лицевую грань фоторефрактивного кристалла класса симметрии 4 mm, оптическая ось \vec{c} которого лежит в плоскости лицевой грани. Направим ось ox рабочей системы координат вдоль кристаллографической оси \vec{c} , являющейся оптической осью кристалла. Ось oz направим вдоль кристаллографической оси \vec{b} , ось oy – вдоль кристаллографической оси \vec{a} . (рис. 1, а). Рассмотрим случай, когда внешнее электрическое поле \vec{E}_0 направлено под углом q к оптической оси \vec{c} (рис. 1 б).

Исследуем распространение двумерных гауссовых световых пучков с x - и y -поляризациями в фоторефрактивном кристалле SBN с учетом всех компонент электрооптического тензора \vec{r} при различных направлениях приложенного внешнего электрического поля, т. е. изменяющемся угле θ .

Существуют различные методы произвольного изменения направления внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу в плоскости лицевой грани кристалла (напр., [24]). Одним из таких возможных методов может быть использование фоторефрактивного кристалла, вырезанного в

форме цилиндра, и приложение внешнего электрического поля к кристаллу с применением скользящих контактов [25], (рис. 1 а).

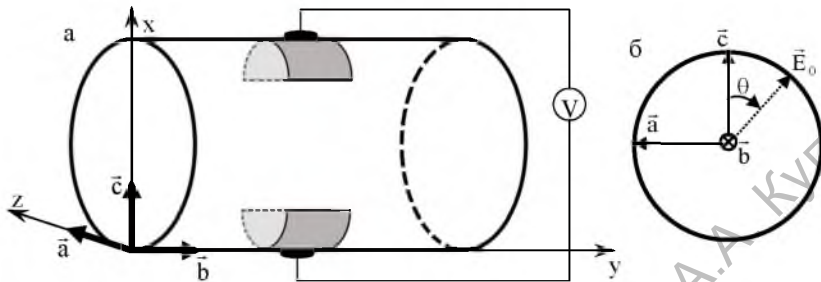


Рис. 1. а – Расположение используемой системы координат относительно кристаллографических направлений; б – Лицевая грань кристалла

Для моделирования была использована система уравнений, полученная из уравнений Максвелла и основных уравнений фоторефрактивного эффекта [26] с использованием ковариантного представления [27] электрооптического тензора кристалла класса 4 mm, также при расчетах учитывался различный набег фазы обыкновенной и необыкновенной волн при фиксированной координате z . Параметры моделирования: $n_e = 2.33$, $n_o = 2.36$, $r_{33} = 235$ пм/В, $r_{13} = 47$ пм/В, $r_{42} = 30$ пм/В, $\lambda = 0.5145$ мкм, $r_0 = 12$ мкм, внешнее приложенное электрическое поле $E_0 = 1.2$ кВ/см, $z = 10$ мм.

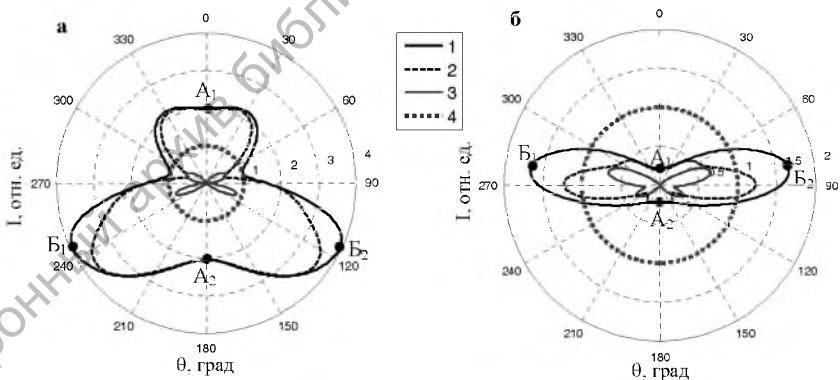


Рис. 2. Зависимость степени самофокусировки двумерного гауссова светового пучка в кристалле SBN от направления внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу, с учетом всех компонент электрооптического тензора; а, б – x - и y -поляризованные гауссовы световые пучки соответственно; 1 – суммарная относительная интенсивность пучка на выходе из кристалла, 2 – x -компонента интенсивности пучка, 3 – y -компонента интенсивности пучка, 4 – относительная интенсивность пучка на входе в кристалл

Из рисунка 2 видно, что при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ (рис. 2, а, б: точки A_1 и A_2), т. е. когда внешнее электрическое поле направлено параллельно оптической оси кристалла, составляющие интенсивности световых пучков, появляющиеся за счет учета компоненты r_{42} (рис. 2, а, б: кривые 3), не вносят значительного вклада в общую суммарную интенсивность световых пучков (рис. 2 а, б: кривые 1), а основной вклад вносят составляющие интенсивности пучков за счет учета компонент r_{33} и r_{13} электрооптического тензора \hat{r} для x - и y -поляризованных гауссовых световых пучков соответственно (рис. 2, а, б: кривые 2), поэтому достаточно учитывать только эти две компоненты. Однако при других направлениях внешнего электрического поля для получения более точных результатов пренебрегать компонентой r_{42} не следует, так как составляющие интенсивности световых пучков, появляющиеся за счет учета этой компоненты (рис. 2, а, б: кривые 3), вносят существенный вклад в общую суммарную интенсивность световых пучков (рис. 2, а, б: кривые 1). Наибольшая степень фокусировки x -поляризованного светового пучка наблюдается при значениях угла $\theta = 117^\circ$ и $\theta = 247^\circ$ (рис. 2, а: точки B_1 и B_2), $I = 3.96$ отн. ед., а для y -поляризованного светового пучка при значениях угла $\theta = 84^\circ$ и $\theta = 279^\circ$ (рис. 2, б: точки B_1 и B_2), $I = 1.6$ отн. ед.

Литература:

1. Solyman, L. The physics and applications of photorefractive materials / L. Solyman, D.J. Webb, A. Grunnet-Jepsen. – Oxford : Clarendon Press, 1996. – 494 p.
2. Петров, М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. – СПб. : Наука, 1992. – 320 с.
3. Cuniot-Ponsard, M. Strontium Barium Niobate Thin Films for Dielectric and Electro-Optic Applications. Ferroelectrics – Material Aspects / M. Cuniot-Ponsard. – InTech. – 2011. – P. 498–518.
4. Francombe, M.H. The relation between structure and ferroelectricity in lead barium and strontium niobates / M.H. Francombe / Acta Cryst. – 1960. – Vol. 13. – Pt. 2. – P. 131–140.
5. Stoyanov, L. Initiating self-focusing of beams carrying spatial phase singularities / L. Stoyanov, G. Maleshkov, I. Stefanov, A. Dreischuh / JOSA B. – 2014. – Vol. 31. – P. 1159–1164.
6. Keshavarz, A. Propagation of Incoherently Coupled Soliton Pairs in Photorefractive Crystals and their Self-Deflection / A. Keshavarz, Z. Abbasib, M. Hatamia / International Journal of Optics and Photonics. – 2012. – Vol. 6, No. 1. – P. 13–20.
7. Dimitrov, N. Measuring the relation between pulse front tilt angle and beam size for ultrashort pulses / N. Dimitrov, L. Stoyanov, I. Stefanov, A. Dreischuh,

- P. Hansinger, G.G. Paulus / *Bulgarian Journal of Physics.* – 2016. – Vol. 43. – P. 21–29.
8. Diebel, F. Soliton formation by decelerating interacting Airy beams / F. Diebel, B.M. Bokić, D.V. Timotijević, D.M. Jović Savić, C. Denz / *Optics Express.* – 2015. – Vol. 23. Is.19. – P. 24351–24361.
 9. Diebel, F. Observation of spatially oscillating solitons in photonic lattices / F. Diebel, P. Rose, M. Boguslawski, C. Denz / *New J. Phys.* – 2016. – Vol. 18. – P. 053038:8.
 10. Allio, R. Photorefractive writing and probing of anisotropic linear and non-linear lattices / R. Allio, D. Guzmán-Silva, C. Cantillano, L. Morales-Inostroza, D. Lopez-Gonzalez, S. Etcheverry, R. A. Vicencio, J. Armijo / *Journal of Optics.* – 2015. – Vol. 17, No. 2 – P. 049601:10.
 11. Basiev, T.T. Stimulated Raman scattering of 18 picosecond laser pulses in strontium barium niobate crystal / T.T. Basiev, M.E. Doroshenko, L.I. Ivleva, S.N. Smetanin, M. Jelnek, Jr., V. Kubecek, H. Jelmková / *Laser Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 9. No.7 – P. 519–523.
 12. Kshirsagar, S.H. Investigations on Fe-doped strontium barium niobate, single phase ferroelectric and magnetodielectric compounds / S.H Kshirsagar, S.R. Jigajeni, A.N. Tarale, D.J. Salunkhe, P.B. Joshi / *Journal of advanced dielectrics.* – 2015. – Vol. 5. – No. 1. – P. 1550001:8.
 13. Kshirsagar, S.H. Effect of Ni doping on ferroelectric, dielectric and magneto dielectric properties of strontium barium niobate ceramics / S.H. Kshirsagar, A.N. Tarale, S.R. Jigajeni, D.J. Salunkhe, P.B. Joshi / *Indian Journal of Pure & Applied Physics.* – 2015. – Vol. 53. – P. 119–124.
 14. Andriyevsky, B. Electronic and Optical Properties of Strontium Barium Niobate Single Crystals / B. Andriyevsky, A. Patryn, K. Dorywalski, C. Cobet, M. Piasecki, I. Kityk, N. Esser, T. Lukaszewicz, J. Dec / *Ferroelectrics.* – 2012. – Vol. 426. – P. 194–205.
 15. Зверев, П.Г. Двухфотонное межзонное поглощение в кристаллах ниобата бария-стронция / П.Г. Зверев, Л.И. Ивлева, А.Я. Карасик, В.И. Луканин, Д.С. Чупаев / *Квантовая электроника.* – 2012. – Т. 42, № 7. – С. 595–599.
 16. Matyjasek, K. Ferroelectric and dielectric characterization studies on relaxor and ferroelectric-like strontium-barium niobates / K. Matyjasek, J. Dec, S. Miga, T. Lukaszewicz / *Condensed Matter Physic.* – 2013. – Vol. 16., No. 3 – P. 31701:1
 17. Królikowski, W., Luther-Davies, B., Denz C. Photorefractive solitons / W. Królikowski, B. Luther-Davies, C. Denz // *IEEE Journal of Quantum Electron.* – 2003. – Vol. 39. – P. 3–12.
 18. Tiemann, M., Halfmann, T., Tschudi, T. Photorefractive spatial solitons as waveguiding elements for optical telecommunication / M. Tiemann, T. Halfmann, T. Tschudi // *Opt. Commun.* – 2009. – Vol. 282. – P. 3612–3619.
 19. Wesner, M., Herden, C., Kip, D. Electrical fixing of waveguide channels in strontium-barium niobate crystals / M. Wesner, C. Herden, D. Kip // *Appl. Phys. B.* – 2001. – Vol. 72. – P. 733–736.

20. Efremidis, N.K. Discrete solitons in photorefractive optically induced photonic lattices / N.K. Efremidis [et al] // Physical Review E. – 2002. – Vol. 66. – P. 602–607.
21. Petrović, M. Two Dimensional Counterpropagating Spatial Solitons in Photorefractive Crystals / M. Petrović [et al] // Physical Review Letters. – 2005. – Vol. 95. – P. 901–904.
22. Imbrock, J., Heese, C., Denz, C. Spatial photorefractive solitons with picosecond laser pulses / J. Imbrock, C. Heese, C. Denz // Appl. Phys. B. – 2009. – Vol. 95. – P. 261–268.
23. Rotschild, C. Interactions between spatial screening solitons propagating in opposite directions / C. Rotschild [et al] // J. Opt. Soc. Am. B. – 2004. – Vol. 21, No. 7. – P. 1355–1357.
24. Барсуков, С.Д. Экспериментальные исследования фазовых переходов в сегнетокерамике на основе титаната-бария-стронция / С.Д. Барсуков, С.А. Хохомов, И.В. Семченко // Известия ГГУ имени Ф. Скорины. – 2011. – Т. 6. – С. 34–39.
25. Шишкин, А.В. Материаловедение. Технология конструкционных материалов : учебное пособие для студентов вузов / А.В. Шишкин, В.С. Чердениченко, А.Н. Черепанов, В.В. Марусин. – М. : Омега-Л, 2009. – 752 с.
26. Kukhtarev, N.V. Holographic storage in electrooptic crystals: 1. Steady state / N.V. Kukhtarev [et al] // Ferroelectrics. – 1979. – Vol. 22. – P. 949–960.
27. Барковский, Л.М. Ковариантная форма электрооптического тензора в кристаллах высшей и средних сингоний при векторном взаимодействии / Л.М. Барковский, Ф.И. Федоров // Кристаллография. – 1965. – Т. 10, № 2. – С. 174–180.