

09

## Распространение одномерного темного пучка в кубическом оптически активном фоторефрактивном кристалле

© Ж.В. Колядко, В.В. Шепелевич, С.Ф. Ничипорко,  
А.А. Голуб, В.В. Давыдовская

Мозырский государственный педагогический университет  
им. И.П. Шамякина, Мозырь, Беларусь  
E-mail: vassher@inbox.ru

В окончательной редакции 9 июля 2013 г.

Исследовано распространение одномерных четных темновых пучков в кубическом оптически активном фоторефрактивном кристалле среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$ . Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования. Представлено физическое объяснение процесса образования и распространения темного пучка в кристалле.

Распространение одномерных темновых пучков [1,2] является объектом интенсивных исследований [3–5] в последние годы. Обычно под темным пучком [2] понимают оптический пучок, содержащий темную область, образованную в результате амплитудной [6] (четный темный пучок) или фазовой [7] (нечетный темный пучок) неоднородности светового поля. Оптические волноводы, наведенные темными пучками в дефокусирующей нелинейной среде [6,7], могут использоваться в устройствах, управляющих светом. Такие волноводы, сформированные при низкой (микроватты) мощности светового пучка, могут управлять [8] и путем расщепления изменять конфигурацию [4] более мощных (ватты) светлых пучков другой длины волны, к которым среда не является фоточувствительной.

Кубический фоторефрактивный кристалл семейства силленитов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO) обладает хорошими электрооптическими свойствами и высокой светочувствительностью, вследствие чего является перспективным нелинейным материалом, позволяющим осуществлять квази-солитонное распространение световых пучков малой интенсивности, несмотря на оптическую активность, которая при необходимости может быть подавлена магнитным полем (эффект Фарадея) [9].

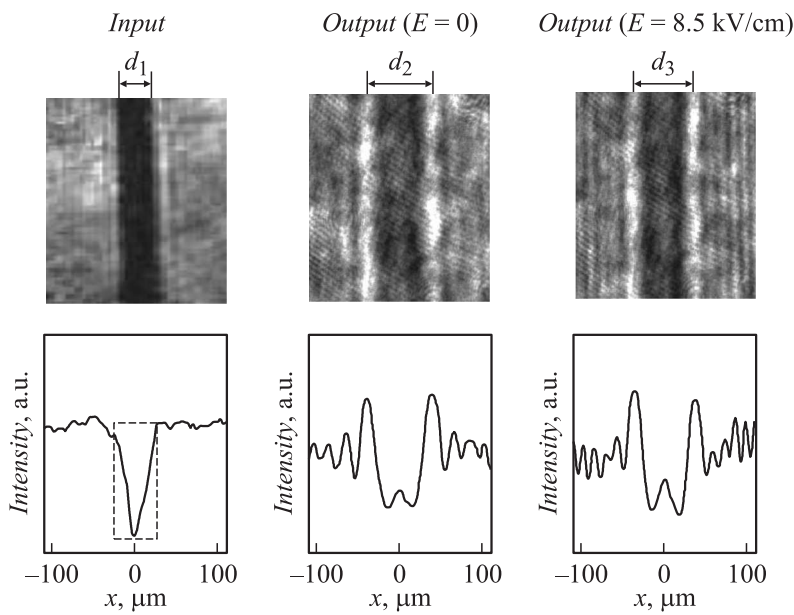
В настоящее время опубликовано несколько работ, посвященных исследованию закономерностей формирования одномерных темных солитонов в кубическом фоторефрактивном кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  (ВТО) (например, [6]). Насколько нам известно, до сих пор недостаточно изучены особенности квазисолитонного распространения темных пучков в кристалле BSO. Также практически отсутствуют работы, в которых содержится наглядное физическое объяснение процесса образования и распространения четного темного пучка в BSO.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования особенностей квазисолитонного распространения четных темных пучков в кубическом оптически активном фоторефрактивном кристалле BSO, к которому приложено постоянное внешнее электрическое поле. Достаточно подробно описан физический процесс формирования и распространения четного темного пучка и проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными.

Рассмотрим узкий одномерный темный пучок, сформированный с помощью тонкого медного провода диаметром  $60\ \mu\text{m}$ , расположенного на входе в кристалл BSO среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$  с поперечными размерами  $1 \times 1\ \text{cm}$  и толщиной  $1\ \text{cm}$ , освещаемого коллимированным квазиоднородным световым пучком гелий-неонового лазера (ЛГН-222,  $\lambda = 633\ \text{nm}$ ). Приложим к кристаллу BSO параллельно кристаллографическому направлению  $[\bar{1}11]$  внешнее электрическое поле с напряженностью  $8.5\ \text{kV/cm}$  (при большем поле появляется вероятность пробоя воздушного зазора между электродами). Картина распределения световой интенсивности на выходе из кристалла отображается на регистрирующую камеру с помощью собирающей линзы и стандартного ослабителя. Эксперимент проводится без дополнительной подсветки кристалла, так как она не является необходимым условием для наблюдения темных солитонов [7].

Из экспериментальных результатов (рис. 1) видно, что на входе в кристалл в световом пучке имеется темный провал шириной ( $d_1$ ) около  $60\ \mu\text{m}$ . Поперечные профили интенсивности (нижний ряд) были получены путем усреднения горизонтальных профилей распределений световой интенсивности в верхнем ряду. В отсутствие внешнего электрического поля (средний столбец) после прохождения кристалла толщиной  $1\ \text{cm}$  ширина провала увеличивалась до  $d_2 = 78\ \mu\text{m}$ .

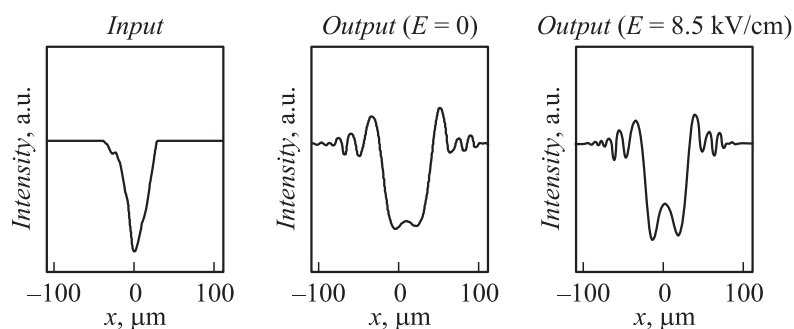
Проведено также численное моделирование (рис. 2) распространения темного четного пучка в рассматриваемом кристалле. При моделировании, которое проводилось в среде Matlab, в качестве входного



**Рис. 1.** Экспериментально полученные картины распределения интенсивности светового поля темного пучка (верхний ряд) и поперечные профили интенсивности пучков (нижний ряд): входной пучок — слева, пучок на выходе из кристалла при  $E = 0$  — посередине, пучок на выходе из кристалла при  $E = 8.5 \text{ kV/cm}$  — справа.

темного пучка используется вложенный в однородный световой фон профиль темного пучка, полученный экспериментально (рис. 1, нижний ряд, прямоугольная область, обведенная штриховой линией). Численные расчеты выполняются с помощью системы уравнений [10], где используются параметры, близкие к параметрам кристалла BSO, в пренебрежении пьезоэлектрическим эффектом:  $n_0 = 2.54$ ,  $r_{41} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$ ,  $\rho = 22^\circ/\text{mm}$ .

Следует отметить, что при распространении в кристалле четного темного пучка в отсутствие внешнего электрического поля его центральная область на выходе из кристалла частично осветляется, что видно из экспериментальных и численных результатов исследования (рис. 1 и 2, средний столбец). Если медный провод рассматривать как



**Рис. 2.** Поперечные профили интенсивности пучков, полученные с помощью численного моделирования: входной пучок — слева, пучок на выходе из кристалла при  $E = 0$  — посередине, пучок на выходе из кристалла при  $E = 8.5 \text{ kV/cm}$  — справа.

одномерную непрозрачную полосу, то можно считать, что светлая полоса в центре темного пучка появляется в результате дифракции световых лучей на краях полосы и последующей их интерференции. С использованием интегралов Френеля или уравнений дифракции [10] можно показать, что в области геометрической тени при удалении от границ достаточно широкой непрозрачной полосы световая интенсивность монотонно изменяется от некоторого фиксированного значения до нуля [11]. При уменьшении ширины полосы вплоть до наложения кривых зависимостей световых интенсивностей, возникших из-за дифракции света на краю непрозрачного экрана (полоски), в центре теневой области благодаря интерференции происходит сложение интенсивностей с удвоением результата, поскольку разность фаз в центре теневой области равна нулю из соображений симметрии. Слева и справа от центральной освещенной области будут располагаться два провала, возникшие в связи с необходимостью учета ненулевой разности фаз, возникающей при смещении от центра теневой области. Для полного объяснения дифракционной картины в остальных точках темного пучка необходимо последовательно учитывать фазу и амплитуду колебаний во всех точках и строго рассматривать сложение комплексных амплитуд света, дифрагированного на краях непрозрачной полосы.

Поскольку для светлых областей пучков в кристалле при включении внешнего электрического поля выбран режим дефокусировки, края

светлых областей, ограничивающих темный пучок на входе в кристалл, по мере распространения светового поля расплываются и ширина темной области уменьшается (средний и правые столбцы на рис. 1, 2). При этом суммарная интенсивность света в центре темного пучка, появляющаяся за счет наложения дифракционных картин, образованных при дифракции света на краях непрозрачного препятствия, возрастает (правые столбцы на рис. 1, 2). Другими словами, „включение“ внешнего электрического поля приводит к увеличению глубины темных пучков, формирующих четный темный квазисолитон.

В этом и заключается физическая сущность формирования двух темных квазисолитонов в случае использования амплитудного транспаранта. Нетрудно провести аналогичные рассуждения для объяснения появления 4, 6 и т.д. темных квазисолитонных пучков при дальнейшем увеличении внешнего электрического поля или толщины кристалла.

Как видно из рис. 1 и 2, при включении электрического поля с напряженностью  $8.5 \text{ kV/cm}$  наблюдается уменьшение ширины темного провала до  $d_3 = 72 \mu\text{m}$  с образованием пары темных полос с шириной приблизительно  $22 \mu\text{m}$  и с расстоянием между ними около  $36 \mu\text{m}$ , т.е. в кристалле образуется волновод в виде Y-соединения [6], что также происходит и при распространении четного темного пучка в фоторефрактивных кристаллах SBN [7] и ВТО [6].

Как показывают численные расчеты, при напряженности внешнего электрического поля  $E = 11.7 \text{ kV/cm}$ , приложенного к кристаллу, наблюдается максимальное приближение значения интенсивности в центре темного четного пучка на выходе из кристалла к значению фоновой интенсивности, формируется одна пара глубоких темных пучков, что свидетельствует о квазисолитонном распространении четного темного пучка. Следует отметить, что дальнейшее увеличение напряженности внешнего электрического поля приводит к появлению дополнительной пары темных пучков (см. также [7]). При этом для предохранения от пробоя воздушного зазора между электродами кристалл помещают в прозрачную диэлектрическую жидкость [12].

Таким образом, экспериментально продемонстрированы особенности распространения одномерного темного пучка, сформированного с помощью амплитудного транспаранта, в кубическом оптически активном фоторефрактивном кристалле BSO. Показано, что при „включении“ внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу, наблюдается увеличение глубины расщепленных темных пучков вместе с уменьшением области, занимаемой этими пучками. С помощью численных

расчетов установлено, что при заданных толщине кристалла, ширине входного темного пучка и напряженности внешнего электрического поля  $11.7 \text{ kV/cm}$  достигается квазисолитонный режим распространения четного темного пучка. Предложено физическое объяснение процесса образования и распространения четного темного пучка в нелинейном кристалле на базе дифракции Фраунгофера на длинном прямоугольном экране.

## Список литературы

- [1] *Coskun T.H., Christodoulides D.N., Mitchell M.* et al. // *Opt. Lett.* 1998. V. 23. P. 418.
- [2] *Chen Z., Mitchell M., Segev M.* et al. // *Science.* 1998. V. 280. P. 889.
- [3] *Chen W.Q., Yang X., Zhong S.Y.* et al. // *Opt. Lett.* 2011. V. 36. P. 3801.
- [4] *Zhang Y.H., Lu K.Q., Guo J.B.* et al. // *Eur. Phys. News.* 2012. V. 43. P. 19.
- [5] *Кружлов В.Г., Шандаров В.М., Тан Я.* и др. // *Изв. РАН. Сер. Физ.* 2009. Т. 73. В. 12. С. 1696; *Kruglov V.G., Shandarov V.M., Tan Ya, Chen F., Kip D.* // *Izvestiya RAN. Ser. fiz.* 2009. V. 73. P. 1696. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences; Physics. 2009. V. 73. P. 1590].
- [6] *Iturbe Castillo M.D., Sanchez-Mondragon J.J., Stepanov S.I.* et al. // *Opt. Commun.* 1995. V. 118. P. 515.
- [7] *Chen Z., Segev M., Singh S.R.* et al. // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1997. V. 14. P. 1407.
- [8] *Morin M., Duree G., Salamo G.* et al. // *Opt. Lett.* 1995. V. 20. P. 2066.
- [9] *Шепелевич В.В.* // *Письма в ЖТФ.* 1981. Т. 7. В. 23. С. 1380; *Shepelevich V.V.* // *Sov. Tech. Phys. Lett.* 1981. V. 7. P. 590.
- [10] *Шепелевич В.В., Голуб А.А., Коваршик Р.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 2004. Т. 30. В. 21. С. 49; *Shepelevich V.V., Golub A.A., Kowarschik R., Kiessling A., Matusevich V.* // *Tech. Phys. Lett.* 2004. V. 30. P. 910.
- [11] *Горелик Г.С.* Колебания и волны. М.: ГИТТЛ, 1950. 552 с.
- [12] *Fasio E., Ramadan W., Belardini A.* et al. // *Phys. Rev. E.* 2003. V. 67. P. 026 611-1.