

УДК 535.42

МНОГОСОЛИТОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАК ОСНОВА СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В. В. Давыдовская

кандидат физико-математических наук, доцент
Мозырский государственный педагогический университет
имени И. П. Шамякина

В. Н. Навныко

кандидат физико-математических наук, доцент, ректор университета
Мозырский государственный педагогический университет
имени И. П. Шамякина

А. В. Федорова

студент
Мозырский государственный педагогический университет
имени И. П. Шамякина

Д. С. Блоцкая

аспирант
Мозырский государственный педагогический университет
имени И. П. Шамякина

Теоретически обоснована актуальность использования солитонных матричных систем в фоторефрактивных кристаллах в устройствах оптической обработки данных и передачи информации с возможностью увеличения количества оптических информационных линий для параллельной обработки информации.

Ключевые слова: двумерный супергауссов световой пучок, фоторефрактивный кристалл, солитон, взаимодействие, фокусировка, солитонный режим, стабилизация.

Введение

В настоящее время открытым и актуальным остается вопрос разработки эффективной структурной базы для систем скоростной обработки информации, которые могут использоваться в оптических компьютерах, радиолокационных системах, устройствах хранения информации и др. [1].

В связи с этим не ослабевают интерес к исследованиям сложных оптических явлений в нелинейных средах, к которым можно отнести и фоторефрактивные кристаллы, так как они обладают подходящими для этого электрооптическими свойствами и могут использоваться при создании волноводных систем и задач динамической голографии.

Многие из задач нелинейной оптики могут иметь высокие перспективы практического использования, в частности выявление закономерностей распространения и взаимодействия световых пучков, при которых достигается их квазисо-

литонный режим распространения, либо энергетический обмен между пучками, осуществление адресной локализации световых пучков [2].

Одной из актуальных задач является изучение многосолитонного взаимодействия в матричных системах фоторефрактивных кристаллах, которые могут использоваться в устройствах оптической обработки данных и передачи информации с возможностью увеличения количества оптических информационных линий для параллельной обработки информации.

Можно выделить целый ряд научных работ по изучению солитонных матричных систем [напр. 3–5], однако следует отметить, что в основном в таких работах преобладают экспериментальные исследования.

В настоящее время растет интерес к исследованиям световых пучков, отличных от классического гауссова пучка, при этом особый интерес представляют пучки с плоским верхом, т. к. они имеют ряд преимуществ при изучении некоторых оптических явлений, например локализация пучков, стабилизация квазисолитонного режима распространения [6, 7].

Модель двумерного пучка

В качестве двумерных световых пучков в работе использовались двумерные супергауссовы пучки с квадратным верхом [8–10].

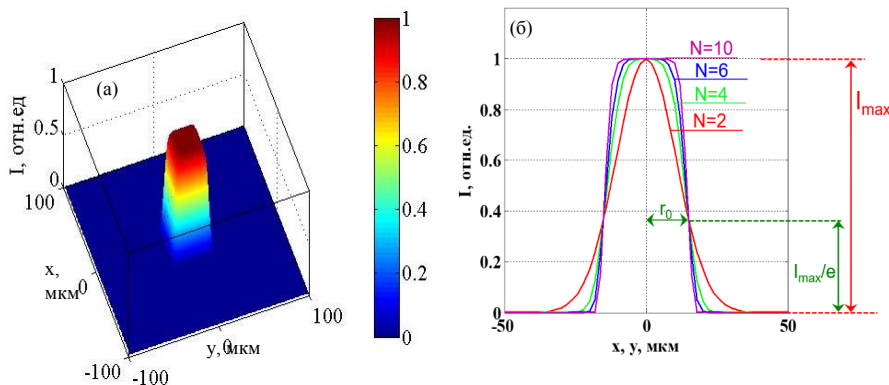


Рисунок 1 – Двумерная модель супергауссова пучка с квадратным верхом ($r_0 = 20$ мкм, $I_{\max} = 1$); а – распределение интенсивности пучка $I(x, y)$; б – профили поперечных сечений супергауссовых пучков различного порядка

Математическая модель

Образующим элементом любой матричной солитонной системы является ячейка из четырех симметрично расположенных световых пучков, поэтому представляет интерес исследование всех составляющих взаимодействий между пучками в таком базовом солитонном массиве.

Для описания распространения и взаимодействия двумерных световых пучков в кристалле SBN из уравнений Максвелла и основных уравнений фоторефрактивного эффекта [11] в параксиальном приближении была получена система четырех нелинейных уравнений, представленная в [7]:

$$\begin{cases}
 i \frac{\partial A_{1x}}{\partial z} + \frac{1}{2k_0 n_e} \left(\frac{\partial^2 A_{1x}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{1x}}{\partial y^2} \right) - \frac{k_0 n_e^3}{2} A_{1x} r_{33} \left(E_{0x} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 0, \\
 i \frac{\partial A_{1y}}{\partial z} + \frac{1}{2k_0 n_o} \left(\frac{\partial^2 A_{1y}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{1y}}{\partial y^2} \right) + \frac{k_0 n_o^3}{2} A_{1x} r_{42} \left(E_{0y} - \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0, \\
 i \frac{\partial A_{2y}}{\partial z} + \frac{1}{2k_0 n_o} \left(\frac{\partial^2 A_{2y}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{2y}}{\partial y^2} \right) - \frac{k_0 n_o^3}{2} A_{2y} r_{13} \left(E_{0x} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 0, \\
 i \frac{\partial A_{2x}}{\partial z} + \frac{1}{2k_0 n_e} \left(\frac{\partial^2 A_{2x}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{2x}}{\partial y^2} \right) + \frac{k_0 n_e^3}{2} A_{2y} r_{42} \left(E_{0y} - \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0.
 \end{cases} \quad (1)$$

Где n_o , n_e – показатели преломления обыкновенной и необыкновенной световых волн; E_{0x} и E_{0y} – проекции вектора \vec{E}_0 на оси ox и oy ; k_0 – длина волнового вектора световых пучков в вакууме; $A_{1x} = A_{1x}(x, y, z)$, $A_{1y} = A_{1y}(x, y, z)$ и $A_{2x} = A_{2x}(x, y, z)$, $A_{2y} = A_{2y}(x, y, z)$ – комплексные проекции векторных огибающих напряженностей электрического поля x - и y -поляризованных световых пучков на оси ox и oy соответственно; r_{13} , r_{33} , r_{42} – компоненты тензора линейного электрооптического эффекта \hat{r} .

Первые два уравнения системы (1) могут использоваться для изучения особенностей распространения пучка с входной x -поляризацией, а вторые два – пучка с входной y -поляризацией.

Поле пространственного заряда ϕ определяется через решение уравнения (см., напр., [12, 13])

$$\begin{aligned}
 \nabla^2 \phi + \nabla \ln(1+I) \cdot \nabla \phi - \frac{K_B T}{q} \left[\nabla^2 \ln(1+I) + (\nabla \ln(1+I))^2 \right] = \\
 = E_{0x} \frac{\partial}{\partial x} \ln(1+I) + E_{0y} \frac{\partial}{\partial y} \ln(1+I)
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$I = \frac{n_e |A_{1,2x}|^2 + n_o |A_{1,2y}|^2}{2\eta_0 I_d}, \quad (3)$$

где K_B – постоянная Больцмана, I – относительная интенсивность светового поля в области распространения световых пучков, q – элементарный заряд, T – абсолютная температура, $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}$.

Будем полагать, что взаимодействующие в упорядоченной солитонной ячейке световые пучки, имеют на входе в кристалл x -поляризацию, поэтому для описания их распространения и взаимодействия в кристалле SBN будем использовать первые два уравнения системы (1):

$$\begin{cases}
 i \frac{\partial A_{1x}}{\partial z} + \frac{1}{2k_0 n_e} \left(\frac{\partial^2 A_{1x}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{1x}}{\partial y^2} \right) - \frac{k_0 n_e^3}{2} A_{1x} r_{33} \left(E_{0x} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 0, \\
 i \frac{\partial A_{1y}}{\partial z} + \frac{1}{2k_0 n_o} \left(\frac{\partial^2 A_{1y}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{1y}}{\partial y^2} \right) + \frac{k_0 n_o^3}{2} A_{1x} r_{42} \left(E_{0y} - \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0,
 \end{cases} \quad (4)$$

Численное решение системы (4) и уравнения (2) осуществлялось с использованием двумерных разностных методов итераций и оптимизированной двумерной численной схемы Дугласа, имеющие приемлемые погрешности и вычислительные затраты.

Основные полученные результаты

Во многих работах было показано, что при взаимодействии световых пучков в фоторефрактивных кристаллах при различных условиях может наблюдаться как взаимное притяжение пучков, вплоть до полного объединения в один пучок, так и отталкивание пучков, причиной которого является возникающая между пучками оптическая разность хода и как следствие появление относительной фазы между ними [14].

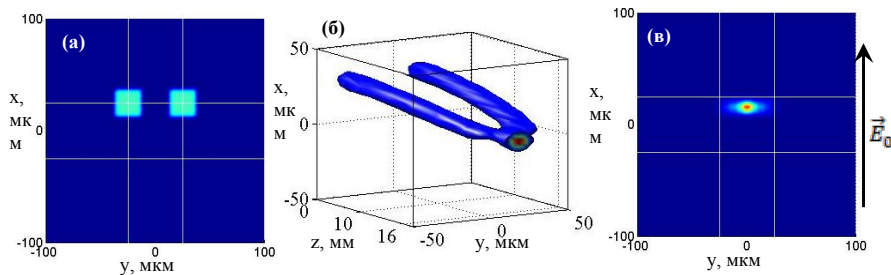


Рисунок 2 – Объединение двумерных супергауссовых световых пучков с квадратным верхом в кристалле SBN; а – пучки на входе в кристалл; б – распределение светового поля в кристалле; в – пучки на выходе из кристалла

При взаимодействии световых пучков в матричных системах одновременно могут проявляться оба явления, как притяжение, так и отталкивание, поэтому параметры выходных пучков, их относительная интенсивность, форма, смещение зависят от суммарного воздействия на пучок всех соседних пучков, входящих в упорядоченную симметричную систему.

Взаимное притяжение пучков может наблюдаться при расположении световых пучков перпендикулярно по отношению к вектору напряженности внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу SBN вдоль его оптической оси, причем в случае, когда входное расстояние между пучками сравнимо с размерами самих пучков, результатом такого взаимодействия может быть полное объединение в один световой пучок, который будет смещаться против направления внешнего электрического поля (рис. 2 б,в).

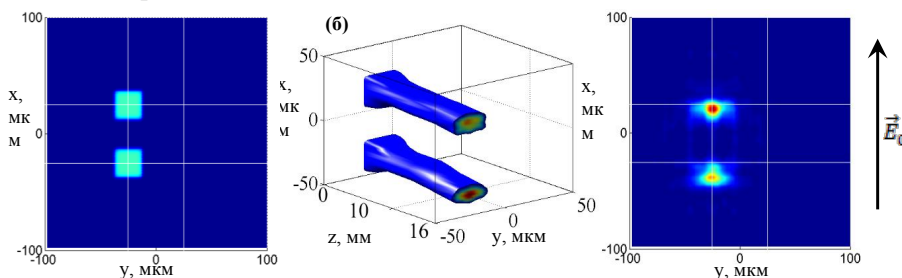


Рисунок 3 – Отталкивание двумерных супергауссовых световых пучков с квадратным верхом в кристалле SBN; а – пучки на входе в кристалл; б – распределение светового поля в кристалле; в – пучки на выходе из кристалла

При взаимодействии трех пучков можно отметить, что объединение пучков уже не наблюдается, так как в данном случае при одновременном взаимном влиянии друг на друга пучков, верхние пучки притягиваются, а влияние нижнего пучка приводит к отталкиванию световых пучков (рис. 4).

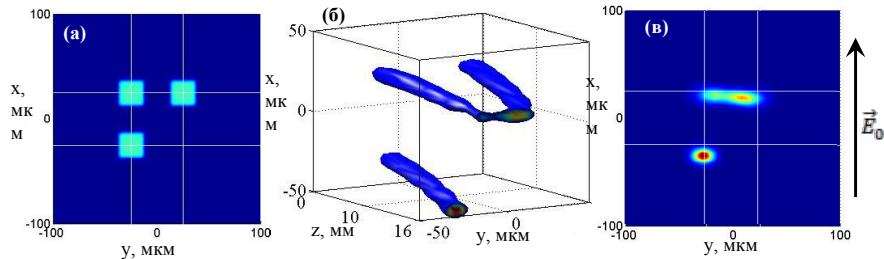


Рисунок 4 – Взаимодействие трех двумерных супергауссовых световых пучков с квадратным верхом в кристалле SBN; а – пучки на входе в кристалл; б – распределение светового поля в кристалле; в – пучки на выходе из кристалла

При распространении в фоторефрактивном кристалле SBN двумерных световых пучков, расположенных параллельно вектору напряженности внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу между пучками возникает оптическая разность хода, за счет одновременного отталкивания световых пучков и их смещения вследствие диффузионного эффекта противоположно направлению внешнего электрического поля (рис. 3 б,в).

При исследовании взаимодействия световых пучков в полной элементарной упорядоченной ячейке световых пучков, состоящей из четырех симметрично расположенных световых пучков можно отметить, что пучки сохраняют свою структуру и продолжают распространяться индивидуально в квазисолитонном режиме, что может иметь большое перспективы в использовании каждого из пучков в качестве параллельной информационной оптической линии (рис. 5).

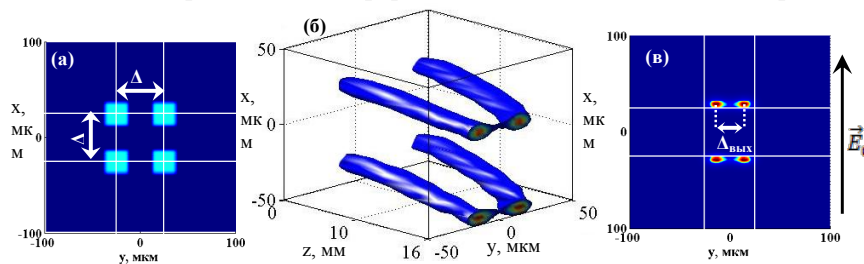


Рисунок 5 – Взаимодействие двумерных супергауссовых световых пучков с квадратным верхом в фоторефрактивном кристалле SBN в составе симметричной упорядоченной структуры; а – пучки на входе в кристалл; б – распределение светового поля в кристалле; в – пучки на выходе из кристалла

Рассмотрим особенности взаимодействия световых пучков в массиве удвоенного размера 4×4 .

Из рисунка 6 видно, что на средние ряды пучков оказывается большее влияние соседних пучков массива, вследствие парного взаимодействия данные пучки рассеиваются, однако вносят вклад в относительную интенсивность крайних пуч-

ков. Диффузионный режим распространения приводит к смещению массива противоположно направлению внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу вдоль оси x , причем нижние пучки смещаются в большей степени.

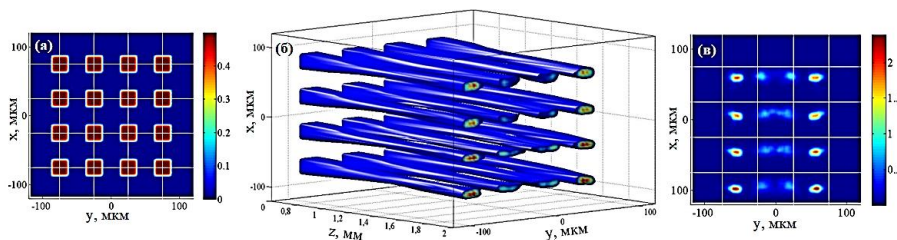


Рисунок 6 – Распространение массива 4×4 двумерных световых пучков с квадратным верхом в кристалле SBN: а – массив пучков на входе в кристалл; б – распределение светового поля в кристалле; в – пучки на выходе из кристалла.

Следует отметить, что для использования каждого пучка в качестве параллельной оптической информационной линии, следует использовать упорядоченные массивы из уединенных базовых массивов 2×2 , с увеличенным расстоянием между крайними пучками базовых массивов.

Заключение

Таким образом в работе проведен детальный анализ взаимодействия в фоторефрактивном кристалле SBN световых пучков, входящих в элементарную образующую ячейку матричной солитонной системы, теоретически обоснована актуальность использования таких систем в устройствах оптической обработки данных и передачи информации с возможностью увеличения количества оптических информационных линий для параллельной обработки информации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Cuniot-Ponsard, M.* Strontium Barium Niobate Thin Films for Dielectric and Electro-Optic Applications. *Ferroelectrics - Material Aspects* / M. Cuniot-Ponsard // InTech, Rijeka, Croatia – 2011. – P. 498–518.
2. *Давыдовская, В. В.* Распространение и взаимодействие двумерных световых пучков в фоторефрактивных кристаллах : дис. канд. физ.-мат. наук : 01.04.05. – Мозырь, 2014. – 116 л.
3. *Khmelnitsky, D.* Interaction of two-dimensional rectangular light beams in a photorefractive SBN crystal / D. Khmelnitsky [et. al] // *Ferroelectrics*. – 2009. – Vol. 390. – P. 116–127.
4. *Smirnov, S.* Interaction of counterpropagating discrete solitons in a nonlinear one-dimensional waveguide array / S. Smirnov [et. al] // *Opt. Lett.* – 2007. – Vol. 32, № 5. – P. 512–514.
5. *Zeng, L.* Preventing critical collapse of higher-order solitons by tailoring unconventional optical diffraction and nonlinearities / L. Zeng, J. Zeng // *Commun. Phys.* – 2020. – Vol. 3. – P. 20–29.
6. *Давыдовская, В. В.* Взаимодействие двумерных ортогонально поляризованных квадратных супергауссовых световых пучков в фоторефрактивном кристалле класса симметрии $4mm$ / В. В. Давыдовская, В. В. Шепелевич // *Вестник ПГУ*. – 2010. – № 3. – С. 124–128.
7. *Давыдовская, В. В.* Взаимодействие двумерных ортогонально поляризованных супергауссовых световых пучков в фоторефрактивном кристалле / В. В. Давыдовская [и др.] // *Квантовая электроника*. – 2010. – Т. 40, № 10. – С. 899–906.
8. *Roychoudhuri, C., Kracklauer, A.F., Creath, K.* The Nature of Light: What is a Photon? (Optical Science and Engineering) / C. Roychoudhuri, A.F. Kracklauer, K. Creath ; Taylor & Francis Inc.: CRC Press, 2008. – 454 p.
9. *Cheng, Y.-K.* Design and Evaluation of Light Spread Function for Area-Adaptive LCD System / Y.-K. Cheng [et al] // *J. Display Technol.* – 2009. – Vol. 5, № 2 – P. 66–71.

10. **Diebel, F.** Soliton formation by decelerating interacting Airy beams / F. Diebel [et al] // Optics Express. – 2015. – Vol. 23. Is.19. – P. 24351–24361.
11. **Kukhtarev, N. V.** Holographic storage in electrooptic crystals: 1. Steady state / N. V. Kukhtarev [et al] // Ferroelectrics. – 1979. – Vol. 22. – P. 949–960.
12. **Motzek, K.** Dipole-mode vector solitons in anisotropic photorefractive media / K. Motzek // Opt. Commun. – 2001. – Vol. 197. – P. 161–168.
13. **Ярус, А.** Оптические волны в кристаллах / А. Ярус, П. Юх ; пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – 616 с.
14. **Calvo M. L.** Optical Waveguides: From Theory to Applied Technologies 1st Edition / M. L. Calvo, V. Lakshminarayanan. – CRC Press, 2007. – 424 p.

Поступила в редакцию 20.12.2023 г.

Контакты: valentina_dav@list.ru (Давыдовская Валентина Владимировна), valnav@inbox.ru (Навныко Валерий Николаевич), linaf6399@gmail.com (Федорова Ангелина Вячеславовна), bloczkaya98@bk.ru (Блоцкая Дарья Степановна).

Davydovskaya V. V., Naunya V. N., Fedorova A. V., Blotskaya D. S.
MULTISOLITON INTERACTION AS A BASIS FOR MODERN OPTICAL DATA PROCESSING SYSTEMS

The relevance of using soliton matrix systems in photorefractive crystals in devices for optical data processing and information transmission with the possibility of increasing the number of optical information lines for parallel information processing is theoretically substantiated.

Keywords: two-dimensional super-Gaussian light beam, photorefractive crystal, soliton, interaction, focusing, soliton regime, stabilization.