

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛИТОННОЙ ПАРЫ В ФОТОРЕФРАКТИВНОЙ СРЕДЕ ПРИ СИНХРОННОЙ МОДУЛЯЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.Д. Кундикова<sup>1</sup>, И.В. Новиков<sup>2</sup>

Исследовано взаимодействие экранированных когерентных солитонных пучков в знакопеременном поле, синхронизированном по фазе с интенсивностью излучения. Экспериментально и численно показано, что увеличение нелокального отклика фоторефрактивной среды с достаточной подвижностью фотозарядов приводит к увеличению эффективности энергообмена между пучками.

*Ключевые слова:* фоторефрактивный кристалл, пространственный солитон, самофокусировка, перекачка энергии.

Исследованию фоторефрактивных солитонов в настоящее время уделяется большое внимание [1]. Это связано как с особенностями фоторефрактивных сред (для реализации нелинейных эффектов не требуются большие значения интенсивностей), так и особенностями солитонов (возможность формировать индуцированный волноводный режим). Фоторефрактивные солитоны используются в управляемых устройствах сопряжения оптических линий связи, устройствах оптической памяти, оптических переключателях [2] и для формирования волноводов с управляемой структурой [3]. Способы управления волноводным режимом или несколькими волноводами зависят от механизма формирования фоторефрактивного нелинейного отклика. Для увеличения отклика обычно используют знакопеременное или постоянное внешние электрические поля [3]. При использовании внешнего знакопеременного электрического поля, синхронизированного по фазе с глубиной модуляции интенсивности излучения, отклик среды заметно увеличивается [4, 5] и существует простая возможность его регулирования. Цель настоящей работы – исследование возможности регулирования взаимодействия пространственных солитонов варьированием нелинейного отклика среды во внешнем знакопеременном электрическом поле, синхронизированном по фазе с глубиной модуляции интенсивности излучения.

В работе [4] теоретически описан механизм пространственной фазовой самомодуляции света в фоторефрактивном кристалле с группой симметрии  $mm2$  с приложенным знакопеременным меандровым электрическим полем  $E(x,t) = E_0(x,t) \text{sign}(\cos(\omega t))$  при синхронной модуляции интенсивности излучения  $I(x,t) = I_0(x,t)(1 + \text{sign}(\cos(\omega t)))$ . Механизм формирования отклика был качественно рассмотрен в работе [5]. Выражение для поля пространственного заряда согласно работе [4] в одномерной модели можно представить в линейном приближении в виде двух слагаемых:

$$E_{sc} = E_{loc} + E_{noloc} = -E \frac{mI}{I + I_d} - \frac{E \cdot L_e}{I + I_d} \frac{dI}{dx}, \quad (1)$$

где  $E$  – внешнее поле, направленное по оси  $x$ , параллельное оптической оси кристалла,  $m$  – глубина модуляции интенсивности луча,  $m = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ , где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – максимальная и минимальная интенсивности излучения,  $I$  и  $I_d$  – интенсивность пучка и темновая освещённость,  $L_e = \mu\tau_r E$  – дрейфовая длина электрона,  $\mu\tau_r$  – произведение подвижности электрона на время рекомбинации носителей заряда,  $\omega$  – частота внешнего поля.

Первое слагаемое  $E_{loc}$  в выражении (1) является локальной компонентой нелинейного отклика, которая может приводить к изменению эффективности самофокусировки луча [6]. Второе

<sup>1</sup> Кундикова Наталия Дмитриевна – доктор физико-математических наук, профессор, декан физического факультета, отдел нелинейной оптики Института электрофизики РАН, кафедра оптики и спектроскопии, Южно-Уральский государственный университет.  
E-mail: knd@susu.ac.ru

<sup>2</sup> Новиков Игорь Владимирович – ассистент, кафедра общей и экспериментальной физики, Южно-Уральский государственный университет.

## Краткие сообщения

слагаемое  $E_{noloc}$  является нелокальной компонентой, которая может приводить к самоискривлению пучка [4] и энергообмену между взаимодействующими пучками. Величину нелокального отклика среды согласно выражению (1) ( $E_{noloc} \sim \mu\tau_r E \sim E^2$ ) можно регулировать варьированием амплитуды внешнего поля  $E$ , а величину локального отклика ( $E_{loc} \sim Em$ ) – варьированием амплитуды внешнего поля  $E$  и глубины модуляции интенсивности излучения  $m$ . Это даёт простую возможность варьирования нелинейными откликами фоторефрактивной среды.

Экспериментальные исследования проводились в кристалле ниобата-бария-натрия  $Ba_2NaNb_5O_{15}$  (BNN). Впервые фоторефрактивный эффект в кристаллах BNN с приложенным знакопеременным электрическим полем при синхронной модуляции интенсивности излучения наблюдался в работе [7]. Влияние нелокального отклика фоторефрактивной среды на формирование солитонного режима исследовалось в работе [6]. В работе [6] экспериментально показано, что солитонный режим формируется при одинаковых значениях локального отклика  $E_{loc} \sim Em = 6,5$  кВ/см. Кристалл был вырезан по орторомбическим осям  $a \times b \times c = 6 \times 3,5 \times 3$  мм<sup>3</sup>, величина  $\mu\tau_r \approx 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/В. Два когерентных пучка с примерно одинаковыми интенсивностями и радиусами  $r_0 = 19$  мкм и 20 мкм сводились под углом  $\beta = 2,7^\circ$  в кристалле, а расстояние между их центрами на входной грани кристалла составляло  $d = 60$  мкм.

Экспериментально определялась степень энергообмена солитонных пучков  $\gamma = I_1 / (I_2 + I_1)$  при различных значениях внешнего поля  $E$  и глубины модуляции интенсивности излучения  $m$ , где  $I_1$  – интегральная интенсивность усиливающегося пучка, а  $I_2$  – интегральная интенсивность пучка, теряющего энергию. Величина внешнего поля  $E$  варьировалась от 6,5 кВ/см до 9,5 кВ/см с шагом 1,5 кВ/см, а глубина модуляции  $m$  изменялась в пределах от 0,68 до 1 таким образом, что всегда выполнялось условие формирования солитонного режима:  $Em = \text{const} = 6,5$  кВ/см [6].

На рисунке приведена экспериментальная зависимость степени энергообмена солитонных пучков от величины внешнего поля  $E_s$ , необходимого для формирования солитонного режима.

Из рисунка следует, что при увеличении внешнего поля  $E$ , а значит, и нелокального отклика кристалла ( $E_{noloc} \sim E^2$ ), необходимого для формирования солитонного режима, происходит увеличение эффективности энергообмена между пучками. Зависимость степени энергообмена от величины внешнего поля  $E$  носит монотонно возрастающий линейный характер.

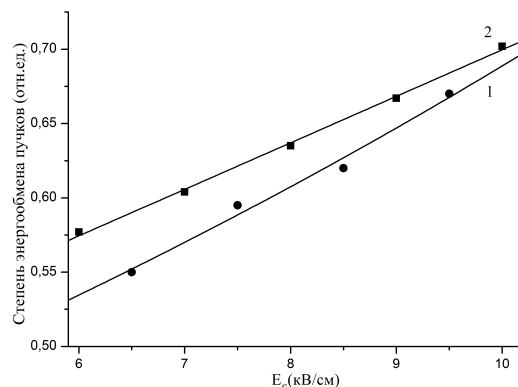
Численное моделирование взаимодействия когерентных самофокусирующихся и солитонных пучков проводилось на основе методики, рассмотренной в работе [4]. Использовались следующие значения, характеризующие фоторефрактивный кристалл и огибающую  $u(x)$  для солитонного пучка,  $\beta = 2,7^\circ$  ( $\alpha = 6^\circ$  в вакууме),  $d = 60$  мкм,  $r_0 = 20$  мкм,  $\mu\tau_r = 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/В,  $I_d = 0,001$ ,  $n_0 = 2,221$ ,  $\lambda = 633$  нм,  $\varphi = 0$ ,  $r_{eff} = 48 \cdot 10^{-12}$  м/В,  $mE_s = 6$  кВ/см. Комплексная амплитуда огибающей двух солитонных пучков на входе в кристалл имела вид

$$A(x, 0) = (u_1(x+d)e^{-ik \sin(\alpha/2)x} + u_2(x-d)e^{ik \sin(\alpha/2)x + i\varphi}) \sqrt{I_d}. \quad (2)$$

Огибающая солитонного пучка определялась из следующего уравнения методом Адамса:

$$\frac{d^2 u}{d\xi^2} - u + \delta \frac{u^3}{1+u^2} = 0, \quad (3)$$

где  $\delta$  – нелинейный коэффициент, а  $\xi \sim x$ .



**Зависимость степени энергообмена пучков от величины внешнего поля  $E_s$  при формировании солитонного режима: 1 – экспериментальные значения; 2 – результаты численного моделирования. Сплошные линии – аппроксимация линейной зависимостью**

Укороченное параосиальное уравнение с входными условиями для огибающей двух солитонных пучков решалось разностно-сеточным методом Дугласа [12]. Было установлено, что неупругое взаимодействие пучков может формироваться только при  $\mu\tau_r \approx 10^{-13}-10^{-14}$  м<sup>2</sup>/В. Это соответствует значениям в экспериментально исследуемом кристалле.

На рисунке приведена зависимость степени энергообмена от величины внешнего поля при формировании солитонного режима, полученная численным моделированием. Из рисунка видно, что зависимость имеет линейный характер. Экспериментальные и численные результаты хорошо согласуются друг с другом.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально и на основе численного моделирования доказано, что увеличение нелокального отклика фоторефрактивной среды приводит к увеличению эффективности энергообмена между когерентными солитонными пучками.

### Литература

1. Abbasi, Z. Incoherent interaction between bright–bright photovoltaic soliton in an unbiased series two-photon photorefractive crystal circuit / Z. Abbasi, M. Hatami, A. Keshavarz // Optics and Laser Technology. – 2012. – Vol. 44, № 8. – P. 2413–2417.
2. Chen, Z. Observation of incoherently coupled photorefractive spatial soliton pairs / Z. Chen, M. Mitchell, M. Segev // Optics Letters. – 1996. – Vol. 21, № 18. – P. 1436–1438.
3. Frejlich, J. Photorefractive materials. Fundamental concepts. Holographic, Recording and Materials / J. Frejlich. – WILEY, 2007. – 309 p.
4. Фролова, М.Н. Самовоздействие светового пучка в фоторефрактивном кристалле с приложенным знакопеременным электрическим полем при синхронной модуляции интенсивности / М.Н. Фролова, С.М. Шандаров, М.В. Бородин // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32, № 1. – С. 45–48.
5. Пространственная фазовая самомодуляция света в фоторефрактивном кристалле во внешнем поле / Б.Я. Зельдович, Н.Г. Катаевский, Н.Д. Кундикова, И.И. Наумова // Квантовая электроника. – 1995. – Т. 22, № 11. – С. 1161–1162.
6. Ассельборн, С.А. Роль локального отклика фоторефрактивной среды в формировании пространственного экранированного солитона / С.А. Ассельборн, Н.Д. Кундикова, И.В. Новиков // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 9. – С. 859–861.
7. Ассельборн, С.А. Экспериментальное исследование самовоздействия светового пучка в фоторефрактивном кристалле во внешнем знакопеременном электрическом поле / С.А. Ассельборн, Н.Д. Кундикова, И.В. Новиков // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, № 4. – С. 50–57.

*Поступила в редакцию 6 сентября 2012 г.*

### SOLITON PAIR INTERACTION IN A PHOTOREFRACTIVE MEDIUM AT SYNCHRONOUS MODULATION OF LIGHT INTENSITY

N.D. Kundikova<sup>1</sup>, I.V. Novikov<sup>2</sup>

The interaction of shielded coherent soliton beams in an alternating field, phase-locked to the intensity of the light, is analyzed. It is experimentally and numerically shown that the increase of non-local response of a photorefractive medium with the sufficient mobility of photoinduced charges increases the efficiency of energy transfer between the beams.

*Keywords: photorefractive crystal, spatial soliton, self-focusing, the energy transfer.*

#### References

1. Abbasi Z., Hatami M., Keshavarz A. Incoherent interaction between bright–bright photovoltaic soliton in an unbiased series two-photon photorefractive crystal circuit. *Optics and Laser Technology*. 2012. Vol. 44, no. 8. pp. 2413–2417.
2. Chen Z., Mitchell M., Segev M. Observation of incoherently coupled photorefractive spatial soliton pairs. *Optics Letters*. 1996. Vol. 21, no. 18. pp. 1436–1438.
3. Frejlich J. *Photorefractive materials. Fundamental concepts. Holographic, Recording and Materials*. Wiley, 2007. 309 p.
4. Frolova M.N., Shandarov S.M., Borodin M.V. Self-action of a light beam in a photorefractive crystal in an alternating electric field upon synchronous intensity modulation. *Quantum electron*. 2002. Vol.32, no. 1. pp. 45–48. DOI: 10.1070/QE2002v032n01ABEH002124.
5. Zel'dovich B.Ya., Kataevskii N.G., Kundikova N. D., Naumova I.I., Spatial self-phase-modulation of light in a photorefractive crystal subjected to an external alternating field. *Quantum electron*. 1995. Vol. 25, no. 11. pp. 1125–1126. DOI: 10.1070/QE1995v025n11ABEH000547.
6. Assel'born S. A., Kundikova N.D., Novikov I.V. Role of the local response of a photorefractive medium in the formation of a spatial screened soliton. *Quantum electron*. 2008. Vol. 38, no. 9. pp. 859–861. DOI: 10.1070/QE2008v038n09ABEH013734.
7. Assel'born S.A., Kundikova N.D., Novikov I.V. *Pis'ma v ZhTF*. 2008. Vol. 34, no. 4. pp. 50–57. (in Russ.).

---

<sup>1</sup> Kundikova Nataliya Dmitrievna is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Dean of Physics Faculty, Joint Nonlinear Optics Laboratory of IEF RAS, Optics and Spectroscopy Department, South Ural State University.  
E-mail: kno@susu.ac.ru

<sup>2</sup> Novikov Igor Vladimirovich is Assistant, General and Experimental Physics Department, South Ural State University.