

УДК 535.34

ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В СРЕДАХ С ТЕПЛОВОЙ И РЕЗОНАНСНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

© 2011 г. Д. В. Горбач¹, О. Г. Романов¹, А. П. Сухоруков², А. Л. Толстик¹

E-mail: gorbach@tut.by; romanov@bsu.by; apsmsu@gmail.com

Исследованы процессы формирования оптических волноводных динамических структур в средах с резонансно-тепловой нелинейностью. Экспериментально оптический волновод был сформирован в растворе поглощающего органического красителя с отрицательным термооптическим коэффициентом при воздействии мощного сингулярного светового пучка (оптического вихря).

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое внимание уделяют системам, работающим на принципе управления светом с помощью света [1–3]. Определенный интерес вызывает изучение эффектов отражения, туннелирования и дифракции при взаимодействии оптических пучков в нелинейных средах [4–6]. Одним из наиболее интересных проявлений эффектов нелинейного взаимодействия световых пучков представляется реализация волноводного распространения одного из них в области оптической неоднородности, созданной другим световым пучком. Интерес к данным исследованиям связан с расширяющимися возможностями переключения оптических сигналов и использования динамических волноводных структур при манипуляциях микрочастицами [7].

В работе теоретически и экспериментально исследованы процессы формирования динамических волноводных структур в средах с резонансно-тепловой нелинейностью, проанализирована возможность управления пространственной структурой сигнального светового пучка при его распространении в локализованной области пространства с волноводным профилем показателя преломления, созданным мощным пучком накачки. Для формирования волноводной структуры под воздействием мощного сингулярного светового пучка был выбран раствор поглощающего органического красителя с отрицательным термооптическим коэффициентом ($dn/dT < 0$).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для теоретического описания процесса формирования пространственно-неоднородных волноводных структур показателя преломления предположим, что мощная волна накачки E_1 , распростра-

няющаяся в нелинейной среде, характеризуется оптической частотой ω_1 , совпадающей с центром линии поглощения $S_0 - S_1$ раствора красителя. Пробная волна E_S на частоте ω_S , для которой среда является прозрачной, направляется коллинеарно волне накачки. При теоретическом моделировании учитываем, что для растворов красителей наряду с резонансной нелинейностью заметную роль в формировании оптического отклика может играть тепловая нелинейность.

В указанных условиях выражения для нелинейной восприимчивости среды на частотах ω_1 и ω_S имеют вид

$$\chi(\omega_1) = \frac{n_0 \kappa_0}{2\pi} \left(\frac{\bar{\Theta}_{12}}{B_{12}} - \frac{\bar{\alpha} I}{1 + \alpha I} \right), \quad (1)$$

$$\chi(\omega_S) = \frac{n_0 \kappa_0}{2\pi} \frac{a_T I}{1 + \alpha I}, \quad (2)$$

где $\bar{\alpha} = a + i\alpha = (\bar{\Theta}_{12} + \bar{\Theta}_{21})/\nu P_{21} - a_T$, $\bar{\Theta}_{kl}(\omega) = \Theta_{kl}(\omega) + iB_{kl}(\omega)$. Коэффициенты $\Theta_{kl}(\omega)$ связаны соотношениями Крамерса–Кронига с коэффициентами Эйнштейна для вынужденных переходов $B_{kl}(\omega)$ в спектральном канале $S_0 - S_1$; $\nu = c/n_0$ – скорость света в среде, κ_0 – начальный коэффициент экстинкции, n_0 – показатель преломления; P_{21} – суммарная вероятность спонтанных и безызлучательных переходов. Величина $\alpha = (B_{12} + B_{21})/\nu P_{21}$ определяет интенсивность насыщения резонансного перехода ($I_{sat} = \alpha^{-1}$). Коэффициент $a_T = 2\omega(1 - \mu_{21})(dn/dT)\tau/cC_p$ характеризует тепловое изменение показателя преломления раствора красителя. Здесь τ – длительность взаимодействия, C_p – теплоемкость единицы объема, dn/dT – термооптический коэффициент, μ_{21} – квантовый выход люминесценции в канале $S_0 - S_1$.

Уравнения для комплексных амплитуд световых волн E_1 и E_S с учетом нелинейной модуляции коэффициента поглощения и показателя прелом-

¹ Белорусский государственный университет, Минск.

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.

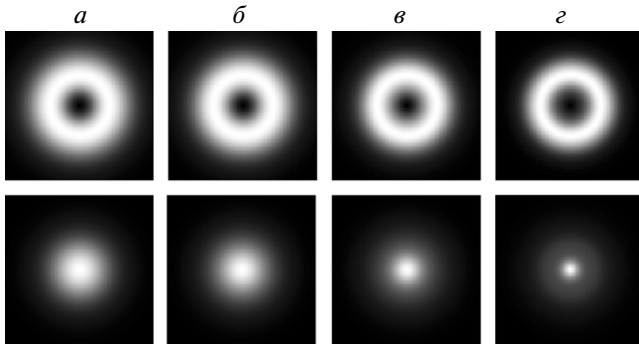


Рис. 1. — Распределение интенсивности световых пучков на входе (а) и выходе (б–г) нелинейной среды. $\alpha I_{01} = 1$ (б), 5 (в), 30 (г).

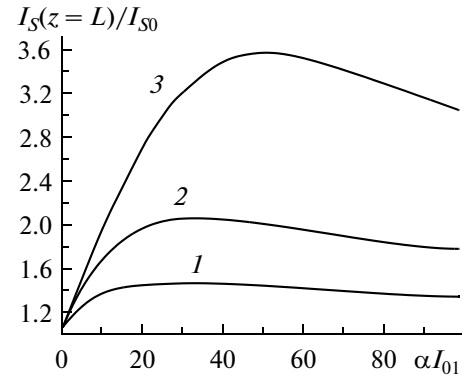


Рис. 2. Зависимость степени фокусировки сигнального пучка от интенсивности пучка накачки. $k_a = 0.5$ (1), 1 (2), 2 см^{-1} (3).

ления в поле мощной волны накачки могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_1}{\partial z} + \frac{1}{2ik_1} \Delta_{\perp} E_1 &= \frac{i2\pi\omega_1}{cn_0} \chi(\omega_1) E_1; \\ \frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{1}{2ik_S} \Delta_{\perp} E_S &= \frac{i2\pi\omega_S}{cn_0} \chi(\omega_S) E_S, \end{aligned} \quad (3)$$

где $k_1 = \omega_1/v$ и $k_S = \omega_S/v$; $\Delta_{\perp} = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ — поперечный лапласиан.

С учетом явного вида выражений для нелинейной восприимчивости $\chi(\omega)$ (1) и $\chi(\omega')$ (2) система связанных волновых уравнений (3) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_1}{\partial \zeta} &= i\Delta'_{\perp} E_1 + ik_a L_{D1} \left(\frac{\bar{\Theta}_{12}}{B_{12}} - \frac{\bar{\alpha} I_1}{1 + \alpha I_1} \right) E_1, \\ \frac{\partial E_S}{\partial \zeta} &= i\Delta'_{\perp} E_S + ik_a L_{DS} \left(\frac{a_T I_1}{1 + \alpha I_1} \right) E_S, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Delta'_{\perp} = \partial^2/\partial \xi^2 + \partial^2/\partial \eta^2$; пространственные координаты нормированы следующим образом: $\xi = x/r_0$, $\eta = y/r_0$, $\zeta = z/2L_{D1}$. Дифракционная длина $L_{D1} = 2\pi r_0^2/\lambda_1$ определяется шириной пучка накачки r_0 ; $L_{DS} = 2\pi r_0^2/\lambda_S$; k_a — коэффициент поглощения излучения накачки.

При численном моделировании системы уравнений (4) предполагалось, что световой пучок накачки на длине волн $\lambda_1 = 532$ нм, направляемый на границу $z = 0$ нелинейной среды, характеризуется трубчатый в поперечном сечении распределением интенсивности и содержит винтовую фазовую дислокацию порядка m : $E_1(z=0) = E_{01}[r/r_{01}]^{|m|} \times \exp[-(r/\sqrt{2}r_{01})^2 + im\varphi]$ (рис. 1а, верхний ряд). Сигнальный пучок на длине волн $\lambda_S = 0.63$ мкм на входе нелинейной среды имеет гауссов профиль интенсивности: $E_S(z=0) = E_{0S} \exp[-(r/\sqrt{2}r_{0S})^2]$ (рис. 1а, нижний ряд). Полуширина световых

пучков полагалась равной $r_{01,0S} = 200$ мкм, пиковая интенсивность пучка варьировалась в пределах $\alpha I_{01} = 1-100$, начальный коэффициент поглощения выбирался порядка $k_a = 1 \text{ см}^{-1}$, спектроскопические и термооптические параметры нелинейной среды соответствовали этанольному раствору красителя родамин 6Ж.

На рис. 1б–г представлены результаты численных расчетов распределения интенсивности (максимальные значения обозначены белым цветом) в пучке накачки (верхний ряд) и в сигнальном пучке (нижний ряд) на выходе нелинейной среды $z = 0.1L_{D1}$, полученные при различных значениях интенсивности пучка накачки на входе. Как видно, несмотря на наличие поглощения, сингулярный пучок накачки при распространении в нелинейной среде сохраняет кольцообразное распределение интенсивности в поперечном профиле. При этом пространственный профиль показателя преломления в среде дефокусирующего типа, сформированный мощным пучком накачки, подобен профилю оптического волновода (максимальное значение n достигается на оси светового пучка). Сигнальный световой пучок, захваченный в области светонаведенного волновода, локализуется на поперечных размерах, определяемых пучком накачки (рис. 1б–г, нижний ряд).

Отметим, что при значениях интенсивности накачки, существенно превышающих интенсивность насыщения ($\alpha I_{01} > 30-50$), наблюдается снижение эффективности фокусировки сигнального пучка (рис. 2), обусловленное эффектом насыщения поглощения и искажением профиля оптического волновода. При этом степень фокусировки (отношение пиковой интенсивности сигнального пучка на выходе нелинейной среды к пиковой интенсивности на входе, $I_S(z=L)/I_{S0}$) существенно зависит от коэффициента поглощения нелинейной среды и может варьироваться в

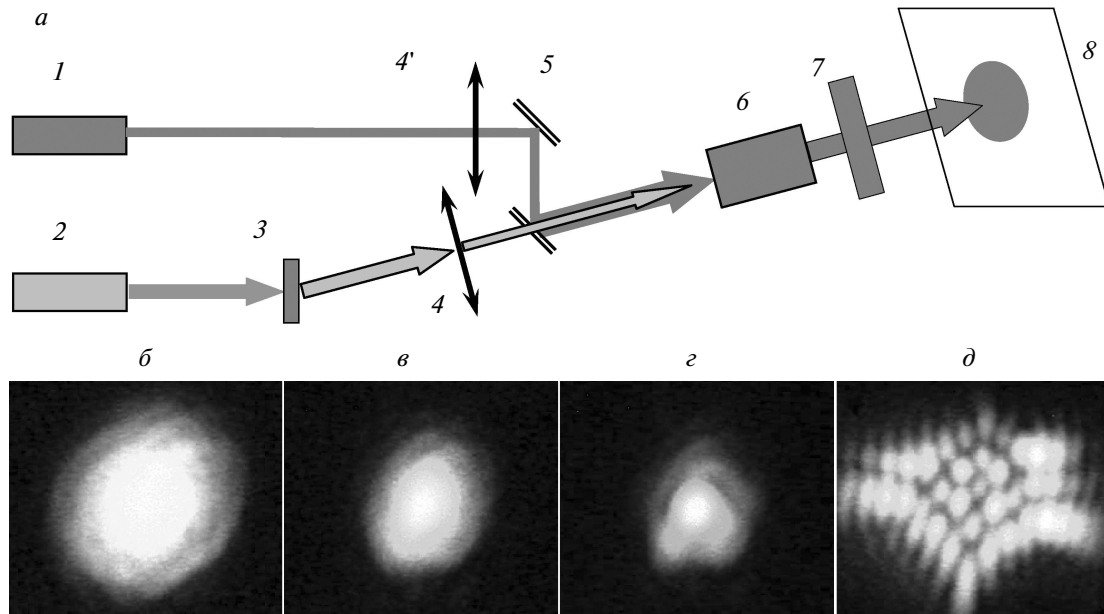


Рис. 3. — Схема нелинейного взаимодействия световых пучков (а) (1 – гелий-неоновый лазер, 2 – лазер на иттрий-алюминиевом гранате, 3 – оптический транспарант, 4, 4' – линзы, 5 – зеркала, 6 – нелинейная среда, 7 – светофильтр, 8 – экран) и вид распределения интенсивности сигнального пучка на выходе из нелинейной среды в отсутствие пучка накачки (б) и при интенсивности накачки $I = 40$ (в) и $70 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (г, д); фокусы сигнального пучка и пучка накачки разнесены на 2 см (б–г) либо совпадают (д).

широких пределах путем изменения интенсивности накачки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная установка для изучения процесса формирования волноводной структуры в растворе красителя представлена на рис. 3. В качестве сигнального пучка использовали непрерывное излучение гелий-неонового лазера 1 на длине волны $\lambda_s = 632.8 \text{ нм}$. Мощный световой импульс на длине волны $\lambda_1 = 532 \text{ нм}$ генерировался лазером на иттрий-алюминиевом гранате 2. Лазер работал в режиме активной модуляции добротности с удвоением частоты генерации (длительность импульса $\tau = 20 \text{ нс}$, расходимость лазерного излучения 1.5 мрад, частота следования импульсов $\nu = 1 - 10 \text{ Гц}$). Голографический транспарант 3 преобразовывал излучение лазера накачки в сингулярный световой пучок с топологическим зарядом $m = 1$. Для увеличения мощности накачки применялась длиннофокусная линза 4. Линза 4' предназначалась для согласования поперечных размеров сигнального пучка и пучка накачки. Система подвижных зеркал 5 позволяла изменять угол между взаимодействующими пучками, а также точку их пересечения в кювете с нелинейной средой 6. Длина кюветы 5 см. В качестве нелинейной среды использован этанольный раствор красителя родамин 6Ж, эффективно по-

глощающий излучение на длине волны генерации лазера накачки и практически прозрачный для сигнального пучка. Результирующую картину взаимодействия регистрировали на экране 8 с помощью камеры, при этом излучение накачки, прошедшее через кювету, отсекалось светофильтром 7.

В ходе эксперимента внешний диаметр сингулярного пучка накачки на входе в нелинейную среду составлял 400 мкм, а диаметр внутренней сердцевины был порядка 200 мкм. Распространяясь в растворе поглощающего органического красителя с отрицательным термооптическим коэффициентом ($dn/dT < 0$), лазерный импульс с кольцеобразным поперечным распределением интенсивности создает неоднородное распределение температуры в объеме нелинейной среды. В результате возникает локализованная пространственная область с градиентом показателя преломления, подобным профилю показателя преломления обычного световода. Если на такую фазово-модулированную среду направить сигнальный световой пучок, то в зависимости от геометрии его распространения могут проявляться эффекты полного или частичного отражения, а также волноводного распространения.

Использование сигнального пучка с поперечными размерами, большими либо равными размеру пучка накачки, приводит к выталкиванию излучения сигнального пучка из области свето-

индуцированного изменения показателя преломления, созданной мощным пучком. При уменьшении размеров сигнального пучка до 200 мкм, отвечающих размеру сердцевинки кольцеобразного распределения интенсивности пучка накачки, наблюдаются различные режимы взаимодействия, аналогичные режимам взаимодействия некогерентных гауссовых световых пучков, описанных в [5]. В случае, когда оба пучка направляются в среду соосно, изменение поперечного распределения интенсивности сигнального пучка на выходе из нелинейной среды с увеличением мощности пучка накачки подтверждает формирование в среде волноводной структуры изменения показателя преломления (рис. 3б–г). Для эффективного ввода излучения сигнального пучка в создаваемый оптический волновод применяли следующую геометрию: излучение сигнального пучка фокусировалось на переднюю стенку кюветы, а пучка накачки – на расстоянии 2 см вглубь от нее. На рис. 3в, г видно, что с увеличением мощности накачки размер сигнального пучка на выходе постепенно уменьшается. Заметные изменения в распределении излучения сигнального пучка происходили при интенсивности накачки $I = 20 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$, причем увеличение интенсивности до $I = 70 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$ позволило уменьшить поперечный размер сигнального пучка в 3 раза (рис. 3г). При дальнейшем увеличении интенсивности накачки размер сигнального пучка начинал незначительно возрастать, как и предсказывали теоретические расчеты (рис. 2). При смещении положения фокуса сигнального пучка на расстояние 2 см вглубь от передней стенки кюветы (в этом случае фокусы пучка накачки и сигнального пучка совпадали) наблюдалось более сложное строение поперечной структуры сигнального пучка на выходе из кюветы (рис. 3д), что можно связать с эффектами дифракции на деформиро-

ванной волноводной структуре в области фокусировки мощного пучка накачки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, теоретический анализ взаимодействия некогерентных лазерных пучков в среде с тепловой нелинейностью позволил определить условия, при которых имеет место режим волноводного распространения сигнального светового пучка в области оптической неоднородности, создаваемой мощным сингулярным световым пучком. Экспериментально продемонстрирована локализация интенсивности сигнального пучка около оси волновода при коллинеарном распространении пучков в этанольном растворе красителя родамин 6Ж.

Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, проект Ф10Р-070, и РФФИ, проект 10-02-90010-Бел_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gibbs H.M.* Optical bistability: Controlling Light by Light. Orlando. Acad. Press, 1985.
2. *Кившарь Ю.С., Агравал Г.П.* Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. М.: Физматлит, 2005.
3. Диссипативные солитоны Под ред. *Ахмедиев Н., Анкевич А. М.*: Физматлит, 2003.
4. *Lobanov V.E., Kalinovich A.A., Sukhorukov A.P. et al.* // Laser Physics. 2009. V. 19. P. 1112.
5. *Горбач Д.В., Романов О.Г., Сухоруков А.П., Толстик А.Л.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 12. С. 1706.
6. *Калинович А.А., Лобанов В.Е., Сухоруков А.П., Толстик А.Л.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 12. С. 1789.
7. *Dienerowitz M., Mazilu M. et al.* // Opt. Exp. 2008. V. 16. № 7. P. 4991.