

УДК 621.373.8

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ В СРЕДЕ С ТЕПЛОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Г.А. Князев, А.П. Сухоруков

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Ленинские горы, 1. с.2, Москва, 119991, Россия
g_knyazev@mail.ru*

Поступила в редакцию 4 ноября 2011 г.

Рассмотрено взаимодействие оптических пучков в средах, показатель преломления которых зависит от температуры. Оптический пучок накачки, частично поглощаясь средой, индуцирует область с неоднородным показателем преломления. В результате наблюдаются полное отражение, преломление или дифракция сигнального пучка на индуцированной оптической неоднородности. Представлены результаты экспериментального исследования особенностей данного явления. Реализовано волноводное распространение света в области, образованной двумя узкими пучками накачки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловая нелинейность, оптический пучок, полное отражение, индуцированная неоднородность, самодефокусировка.

Розглянуто взаємодію оптичних пучків у середовищах, показник заломлення яких залежить від температури. Оптичний пучок накачування, частково поглинаючись середовищем, індукує область з неоднорідним показником заломлення. В результаті спостерігаються повне відбиття, заломлення або дифракція сигнального пучка на індукованій оптичній неоднорідності. Представлено результати експериментального дослідження особливостей даного явища. Реалізовано хвилевідне поширення світла в області, яка утворена двома вузькими пучками накачування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: теплова нелінійність, оптичний пучок, повне відбиття, індукована неоднорідність, самодефокусування.

The interaction of optical beams in media characterized by a refractive index depending on temperature is examined. The optical pump beam is partially absorbed by the medium induces a region with an inhomogeneous refractive index. As a result complete reflection, refraction or diffraction of the signal beam on the induced optical inhomogeneity may be observed. Experimental results on the research of this phenomenon are presented. Waveguide propagation of light in the region formed by two narrow pump beams is realized.

KEYWORDS: thermal nonlinearity, optical beam, total reflection, induced inhomogeneity, self-defocusing.

В последнее время в нелинейной физике большое внимание уделяется эффекту полного отражения при взаимодействии оптических пучков. Данный эффект может наблюдаться в том случае, когда мощная оптическая волна накачки изменяет эффективный показатель преломления среды создавая оптическую неоднородность. Если максимуму интенсивности света соответствует минимум эффективного показателя преломления, сигнальная волна другой частоты, распространяющаяся под малым углом к пучку накачки, будет отражаться от индуцированной неоднородности. Отражение сигнального луча будет наблюдаться, если угол падения достаточно мал и не превышает критического значения [1 - 5]. Данный эффект был подробно изучен теоретически [1, 2] как в средах с квадратичной нелинейностью, так и на примере фоторефрактивных кристаллов и сред с тепловой нелинейностью.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Взаимодействие пучков в слабо поглощающих средах с тепловой нелинейностью имеет ряд интересных особенностей, т.к. отклик в подобных материалах является нелокальным [6]. Более того, оптические нелинейные свойства слабо поглощающих сред с тепловой нелинейностью как правило выражены весьма сильно, поэтому эффект полного отражения пучков в таких средах могут наблюдаться при малых мощностях света и относительно больших углах между пучками. Тем не менее, экспериментальные исследования полного отражения в средах с тепловой нелинейностью проводилось недостаточно подробно [3, 4]. Поэтому целью данной работы является исследовать в эксперименте взаимодействие пучков, скрещивающихся в среде с тепловой нелинейностью показателя преломления.

Так как материалы, обладающие тепловой нелинейностью относятся к кубически нелинейным, помимо полного отражения наблюдается самодефокусировка пучков. Чтобы частично избежать эффекта самовоздействия используют материалы, поглощающие свет на длине волны пучка накачки и являющиеся полностью прозрачными для сигнального пучка. Таким образом, для сигнального пучка невозмущенная среда оказывается линейной. Поэтому, при малых углах падения сигнальной волны на пучок накачки, система уравнений, описывающая нелинейное взаимодействие световых волн, может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} + i D_1 \frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} &= -i\alpha(T - T_0)A_1 - \delta A_1, \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} + i D_2 \frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} &= -i\alpha(T - T_0)A_2, \\ \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= -\delta |A_1|^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $A_1(x, z)$ и $A_2(x, z)$ – нормированные амплитуды напряженности электрического поля пучка накачки и сигнальной волны, $T(x)$ – температура нагретой среды, T_0 – равновесная температура в отсутствие лазерного нагрева, $D_j = 1/(2k_j)$ – коэффициент дифракции, $k_j = \omega_j n_j / c_0$ – волновое число, n_j – показатель преломления на частоте ω_j , c_0 – скорость света в вакууме, δ – коэффициент линейного поглощения света, χ – коэффициент теплопроводности, $\alpha = \frac{k_j}{n_j} \frac{dn_j}{dT}$ – коэффициент теплового самовоздействия, $\frac{dn_j}{dT}$ – температурный градиент показателя преломления.

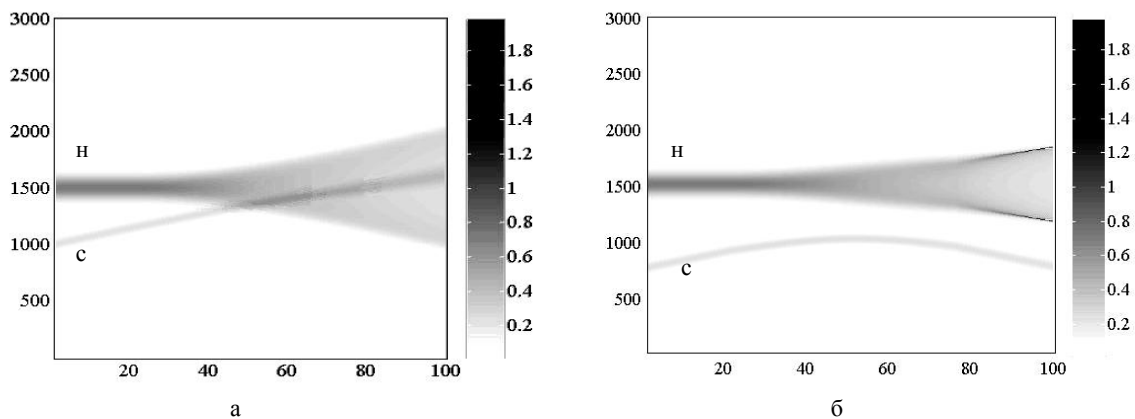


Рис. 1. Распределение интенсивностей сигнальной (с) волны и волны накачки (н) при нелинейном взаимодействии (а – преломление сигнального пучка, б – полное отражение сигнального пучка).

На рис. 1 представлены рассчитанные зависимости интенсивностей сигнального пучка (с) и пучка накачки (н), полученные в результате численного решения системы уравнений (1). На рисунке 1а представлено преломление сигнального пучка на индуцированной неоднородности, рисунок 1б соответствует случаю полного отражения сигнального пучка. Сигнальная волна распространялась под углом $0,4^\circ$ к пучку накачки. Можно видеть, что происходит самодефокусировка пучка накачки. Тем не менее, так как размеры сигнального пучка были существенно меньше, чем диаметр пучка накачки, профиль сигнальной волны практически не меняется. При малых значениях коэффициента нелинейности α происходит преломление сигнального пучка (см. рис. 1а), однако если нелинейность среды увеличить в 4 раза будет наблюдаться полное отражение света от индуцированной волной накачки неоднородности (см. рис. 1б). Особенностью нелинейного взаимодействия пучков в средах с тепловой нелинейностью является нелокальность отклика среды: можно видеть, что отражение сигнального пучка происходит от

той области среды, где интенсивность волны накачки практически равна нулю. Размеры области и коэффициенты дифракции при численном моделировании были подобраны такими, чтобы достигалось наибольшее соответствие условиям эксперимента.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ОПТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ В ЭТАНОЛЕ

В эксперименте взаимодействие пучков наблюдалось в этаноле, так как данное вещество обладает чрезвычайно сильной тепловой нелинейностью. Чтобы повысить поглощение на длине волны пучка накачки, которая равнялась 532 нм, в спирт был добавлен йод в концентрации $7 \cdot 10^{-3} \%$. Следует отметить, что поглощение на длине волны сигнального пучка при этом практически не изменилось.

Существенной проблемой при исследовании тепловой нелинейности показателя преломления в жидкостях является конвекция. Тепло из области пучка накачки переносится не только в результате теплопроводности, но и в результате конвекции. Конвекция приводит к существенному искажению оптических пучков. Поэтому, чтобы компенсировать неоднородное конвекционное перемешивание, в эксперименте оптические лучи распространялись в нелинейной среде вертикально. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 2.

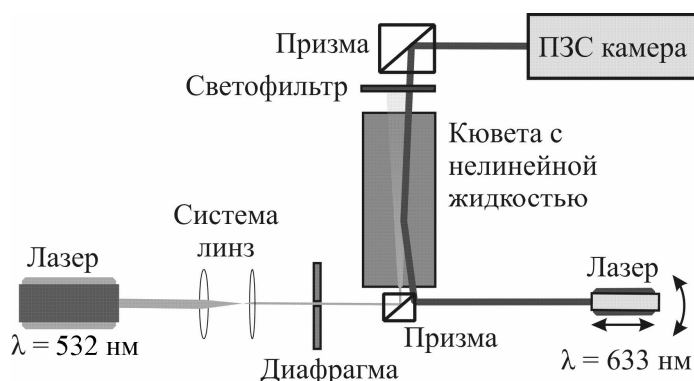


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Сигнальный пучок генерировался полупроводниковым лазером с длиной волны 633 нм. В качестве источника волны накачки использовалась вторая гармоника YAG-лазера. Мощность волны накачки могла регулироваться от 10 мВт до 310 мВт. Полупроводниковый лазер был установлен на подвижный вращающийся столик таким образом, чтобы можно было изменять положение оси вращения лазера. Вращение осуществлялось в плоскости ортогональной рисунку 2. Благодаря этому в эксперименте можно было регулировать не только угол между взаимодействующими пучками, но и точку их пересечения внутри нелинейной среды. Последнее особо важно, если необходимо получить малые размеры оптической неоднородности, т.к. пучок накачки сильно расширяется из-за самодефокусировки. Лазерные пучки распространялись на встречу друг другу, что давало возможность наблюдать взаимодействие как при нулевых, так и при относительно больших значениях угла падения света $\theta = 0 - 5^\circ$. При помощи делительной призмы оптические лучи отклонялись вертикально в верх и направлялись в кювету со спиртовым раствором йода. На выходе из кюветы второй призмой свет направлялся на матрицу ПЗС-камеры, которой фотографировалось распределение интенсивности в пучке. Чтобы избежать попадания мощного излучения пучка накачки в камеру использовался светофильтр.

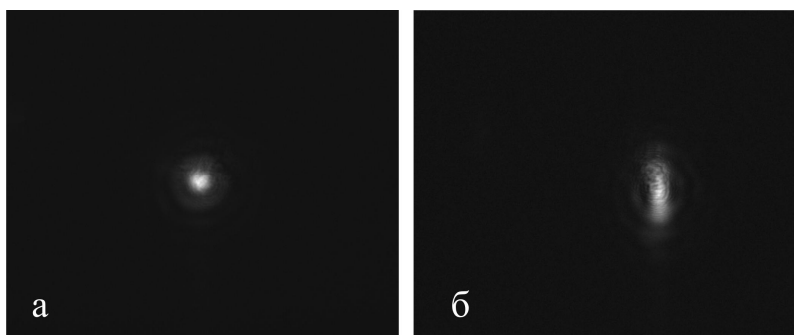


Рис. 3. Распределение интенсивности сигнального пучка, падающего на широкий пучок накачки (а – волна накачки отсутствует, б – мощность волны накачки равна $P = 300$ мВт).

Наиболее интересными являются два случая взаимодействия: когда оптическая неоднородность существенно больше диаметра сигнального пучка, и когда сигнальный пучок превышает размеры оптической неоднородности. Чтобы регулировать размер пучка накачки, индуцирующего неоднородность, использовалась система линз и диафрагма.

Если диаметр пучка накачки достаточно большой по сравнению с сигнальным пучком, наблюдается полное отражение от индуцированной оптической неоднородности. При этом оптическая неоднородность является практически плоской, и отражение сигнальной волны сопровождается лишь незначительными искажениями профиля. На рисунке 3 показаны распределения интенсивности в сигнальном пучке при отсутствии волны накачки (а) и при пучке накачки диаметром 8,6 мм мощностью 300 мВт (б). Диаметр сигнального пучка в данном эксперименте равнялся 1,3 мм. Рисунки 3а и 3б имеют одинаковый масштаб. Можно видеть, что в результате нелинейного взаимодействия сигнальный пучок отклоняется. Угол отклонения в эксперименте составлял $0,33^\circ$.

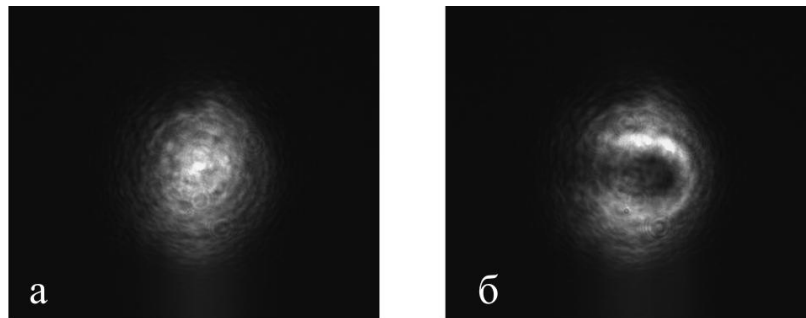


Рис. 4. Распределение интенсивности сигнального пучка, падающего на узкий пучок накачки (а – волна накачки отсутствует, б – мощность волны накачки равна $P = 300$ мВт).

Другой предельный случай – когда диаметр пучка накачки выбирается как можно меньше, приводит к тому, что сигнальная волна не отражается от неоднородности, а “обтекает” её. Данные эксперимента на рисунке 4 иллюстрируют этот эффект. Диаметр пучка накачки в данном случае равнялся 0,3 мм, в то время как размер сигнального пучка достигал 3,5 мм. Угол между взаимодействующими лучами в данном эксперименте равнялся 2° . В связи с тем, что тепловая нелинейность является нелокальной, и тепло из области, в которой распространяется волна накачки, уносилось за счет конвекции, относительно сложно добиться того, чтобы размеры индуцированной неоднородности показателя преломления были сравнимы с диаметром оптического светового пучка. Для этого экспериментальная установка была съюстирована так, чтобы область пересечения взаимодействующих пучков находилась у нижнего края кюветы.

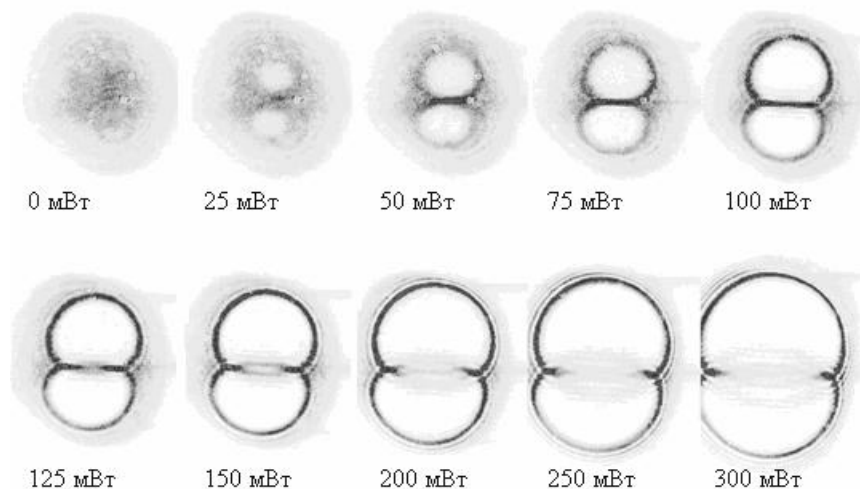


Рис. 5. Взаимодействие света с двойным пучком накачки

ИНДУЦИРОВАННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД

Важной задачей является исследование нелинейного взаимодействия пучков, когда волна накачки состоит из нескольких распространяющихся близко друг к другу узких пучков. Такая конфигурация взаимодействия позволяет наблюдать эффект волноводного распространения сигнального пучка, захваченного между пучками накачки. В эксперименте было реализовано взаимодействие широкого сигнального пучка диаметром 10 мм с двумя узкими пучками накачки диаметром 0,3 мм, распространяющимися параллельно друг другу. Расстояние между пучками накачки достигало 0,5 мм. Чтобы избавиться от искажений картины взаимодействия конвекционными потоками в нелинейной жидкости и обеспечить меньшие размеры индуцированных неоднородностей, в качестве нелинейной среды использовалась жидкая эпоксидная смола. Данное вещество обладает близкими к окрашенному йодом этанолу нелинейными характеристиками, однако из-за высокой вязкости смолы конвекционные потоки в ней практически отсутствуют.

На рисунке 5 представлено распределение интенсивности сигнальной волны для различных значений мощности накачки. Можно видеть, что нелинейные эффекты наблюдаются при суммарной мощности пучков накачки 25 мВт. С увеличением мощности происходит фокусировка света в области между пучками накачки. Дальнейшее повышение интенсивности накачки приводит к тому, что свет, локализованный между пучками накачки, расплывается за счет дифракции сразу после выхода из нелинейной среды.

ВЫВОДЫ

Полученные в работе результаты иллюстрируют предсказанные в теории эффекты, полного отражения света от широкого пучка накачки и “обтекания” сигнальной волной узкой индуцированной оптической неоднородности. Данные эксперимента показывают, что при помощи оптических пучков можно сформировать в нелинейной среде индуцированный волновод.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 09-02-01028-а, № 10-02-90010-Бел_а и № 11-02-00681-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобанов В. Е., Сухоруков А. П. Эффект параметрического отражения в квадратичных одноосных кристаллах с двулучепреломлением // Изв. РАН. Сер. физ. – 2008. – Т. 72, № 12. – С. 1691.
2. Калинович А. А., Лобанов В. Е., Сухоруков А. П. Взаимное отталкивание оптических пучков в средах с нелокальной нелинейностью // Изв. РАН, Сер. физ. – 2010. – Т. 74, № 12. – С. 1789.
3. Lobanov V. E., Kalinovich A. A., Sukhorukov A. P., Bennet F., Neshev D. Nonlinear reflection of optical beams in the media with a thermal nonlinearity // Laser Physics. – 2009. – V. 19, № 5. – P. 1112.
4. Горбач Д. В., Романов О. Г., Сухоруков А. П., Толстик А. Л. Формирование динамических волноводных структур в средах с тепловой и резонансной нелинейностью // Изв. РАН, Сер. физ. – 2011, – Т.75, № 12, – С. 1737.
5. Князев Г. А., Мещеряков А. В., Сухоруков А. П. Эффект параметрической рефракции при акустооптическом взаимодействии // Изв. РАН, Сер. физ. – 2011, – Т.75, № 12, – С. 1756.
6. Рубинов А. Н., Корда И. М., Зинкевич Э. А. Динамика лазера с нелинейным затвором на полном внутреннем отражении // Квант. эл. – 2002. – Т. 32, № 4. – С. 319.