

双光束在自散焦介质中对向共同传输时的诱导聚焦*

江秀娟 李华刚 郭旗† 胡巍

(华南师范大学传输光学实验室, 广州 510631)

(2003 年 6 月 10 日收到, 2004 年 4 月 5 日收到修改稿)

对二维自散焦介质中双光束对向共同传输问题进行了系统研究. 数值模拟结果表明: 在适当的条件下, 强的抽运光能通过交叉相位调制效应诱导弱的信号光聚焦. 讨论了样品长度、抽运光初始振幅、信号光初始振幅及两光束中心初始横向间距 4 个参数对信号光聚焦过程的影响, 发现存在最佳参数值, 选择恰当的参数可提高光束聚焦的效率.

关键词: 自散焦介质, 对向传输, 诱导聚焦, 交叉相位调制效应

PACC: 4265J, 4225B

1. 引 言

足够强的单光束在自聚焦介质中传输时, 由非线性效应引起的自相位调制 (SPM) 能抵消线性衍射效应, 使光束发生会聚, 称为自聚焦^[1,2]. 在自散焦介质中, 情况相反, 非线性效应加强衍射, 加速光束的发散. 但在 1990 年, Agrawal 通过理论研究发现, 一强一弱两光束在自散焦介质中同向共同传输时, 在一定条件下强光束会通过交叉相位调制 (XPM) 效应诱导弱光束聚焦^[3]. 不久, 该现象分别被 Stenta 和 Hickmann 的小组在实验中观察到^[4,5]. 此后, 学者们对该现象进行了更深入的研究. Pietrzyk 通过变分法与数值模拟方法分析了两个脉冲高斯光束在 Kerr 非线性平面波导中共同传输时的时空特性^[6]. Guo 等人讨论了弱光束被诱导聚焦时两光束参数的影响, 发现可以通过选择最佳参数提高光束聚焦的效率^[7]. Li 等人还将相关的研究从平面介质 (二维) 推广到体介质 (三维)^[8].

以上研究工作都是基于双光束同向共同传输的, 双光束对向传输的情况至今未见报道. 本文对二维自散焦介质中双光束对向共同传输问题进行了系统研究, 发现在适当条件下同样存在由交叉相位调制引起的诱导聚焦现象, 对影响弱光束聚焦程度的若干参数进行了分析. 本文所得结果对于相关的实验设计具有参考价值.

2. 双光束对向传输的数学模型

两束连续或准连续光波在二维平面 Kerr 介质中对向共同传输 (如图 1 所示), 其光场可分别表示为

$$E_1 = A_1(x, z) \exp[-i(k_1 z + \omega_1 t)] + c.c. \quad (1)$$

$$E_2 = A_2(x, z) \exp[i(k_2 z - \omega_2 t)] + c.c., \quad (2)$$

其中 c.c. 表示共轭复数, A_j 为光束的慢变包络振幅, $k_j = 2\pi n_{0j} / \lambda_j$, n_{0j} 为光波长为 λ_j 时的线性折射率. ($j = 1, 2$, 下同. 我们约定 $j = 1$ 表示强的抽运光, $j = 2$ 表示弱的信号光.)

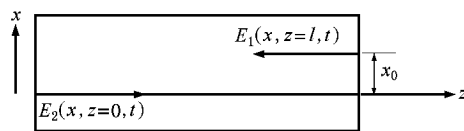


图 1 两光束在介质中对向共同传输示意图. 样品的长度为 l

假设介质为均匀、稳定且无损耗, 在傍轴近似下可得光束的耦合传输方程^[3,9]为

$$-\frac{\partial A_1}{\partial z} - \frac{i}{2k_1} \frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} = \frac{ik_1 n_2}{n_{01}} (|A_1|^2 + 2|A_2|^2) A_1, \quad (3)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} - \frac{i}{2k_2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} = \frac{ik_2 n_2}{n_{02}} (|A_2|^2 + 2|A_1|^2) A_2, \quad (4)$$

* 广东省自然科学基金 (批准号: D31516 和 011455) 和广东省自然科学基金团队项目 (批准号: 20003061) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: guoq@senu.edu.cn

其中 n_2 为非线性折射率系数,对自聚焦介质, $n_2 > 0$ 对自散焦介质, $n_2 < 0$. (3)和(4)式中等号右边的第一、第二项分别对应于自相位调制效应与交叉相位调制效应.本文的讨论忽略了光在介质样品前后端面的反射,通过折射率匹配技术,在实际中这是可以实现的.

取初始输入的抽运光和信号光均为高斯分布光束

$$A_1(x, l) = A_{10} \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{2w_{10}^2}\right], \quad (5)$$

$$A_2(x, 0) = A_{20} \exp\left[-\frac{x^2}{2w_{20}^2}\right], \quad (6)$$

其中 A_{j0} 为初始输入光束的中心振幅, w_{j0} 为其束宽, x_0 为两光束中心的初始横向间距, l 为样品长度.

作如下变换:

$$X = \frac{x}{w_{20}}, \quad Z = \frac{z}{L_D}, \quad U_j = \frac{A_j k_2 w_{20} |n_2|^{1/2}}{n_{02}^{1/2}}, \quad (7)$$

其中 $L_D = k_2 w_{20}^2$ 为信号光的衍射长度(又称瑞利距离),可得归一化的传输耦合方程

$$-\frac{\partial U_1}{\partial Z} - \frac{i}{2} r \frac{\partial^2 U_1}{\partial X^2} = \text{sgn}(n_2) \frac{i}{r} (|U_1|^2 + 2|U_2|^2) U_1, \quad (8)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial Z} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 U_2}{\partial X^2} = \text{sgn}(n_2) (|U_2|^2 + 2|U_1|^2) U_2, \quad (9)$$

及归一化的初始输入光束

$$U_1(X, L) = U_{10} \exp\left[-\frac{(X - X_0)^2}{2w_0^2}\right], \quad (10)$$

$$U_2(X, 0) = U_{20} \exp\left[-\frac{X^2}{2}\right], \quad (11)$$

其中 $X_0 = x_0/w_{20}$, $L = l/L_D$, $r = \lambda_1/\lambda_2$, $w_0 = w_{10}/w_{20}$. 对自散焦介质(8)和(9)式中 $\text{sgn}(n_2) = -1$. 上面推导中忽略了介质的线性色散,认为 $n_{01} \approx n_{02}$, 此假设在 $0.5 \leq r \leq 1.5$ 范围内成立^[7].

3. 信号光与抽运光相对传输过程的数值模拟

用解析方法求解耦合的非线性薛定谔方程(8)和(9)非常困难,本文用分步傅里叶算法^[10]对其进

行数值求解.光束在传输过程中会出现会聚或发散的情况,故光束束宽是描述光束传输特性的一个基本参量.下文将采用熵束宽描述光束的演化^[1],它定义为

$$W = \exp(S),$$

其中

$$S = - \int [(\ln |U|^2/P) \ln (|U|^2/P)] dX,$$

$$P = \int |U|^2 dX,$$

U 即为由(8)和(9)式解出的光束函数.

我们发现,抽运光与信号光在自散焦介质中对向共同传输时,弱的信号光对抽运光的影响非常小,所以抽运光主要受自相位调制的作用,在传输过程中是发散的,但在适当条件下,抽运光对信号光的交叉相位调制作用会引起信号光的诱导聚焦,并使信号光发生小的横向偏移.图2给出抽运光与信号光典型的演化过程.

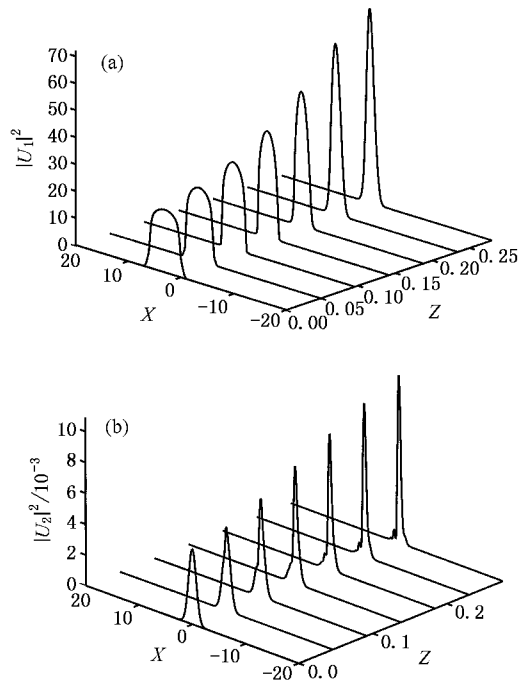


图2 抽运光与信号光的演化过程 $L = 0.28$, $U_{10} = 8.5$, $U_{20} = 0.07$, $X_0 = 3$. (a)为抽运光的演化,抽运光在传输过程中发散;(b)为信号光的演化,信号光在传输过程中被诱导聚焦

对样品长度 L 取不同值时进行了模拟.结果表明:当 L 不大时,信号光在整个传输过程中不断被

1) 前文采用的 w_{j0} 为光束的 $1/e$ 束宽,下文之所以引入熵束宽,是因为在描述光束的演化时,相对于用其他方法定义的束宽,熵束宽具有更好的特性.具体参阅文献 [11, 12].

压缩,图 3(b)是其典型的演化过程;当 L 较大时,信号光先发散,再被压缩;当 L 取更大值时,信号光在传输中的束宽总比初始输入时大,即信号光没有被诱导聚焦.图 3 给出上面几种情况下信号光束宽随传输距离的变化.

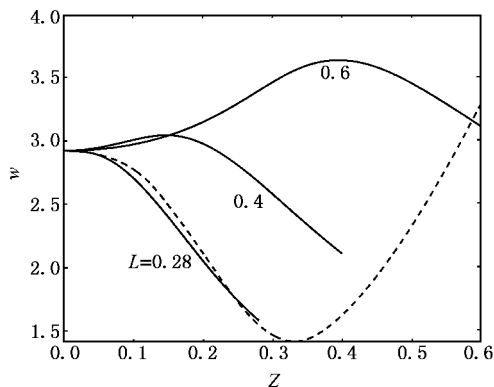


图 3 不同长度样品内,信号光束宽的演化过程(——),其他参数同图 2. 为了比较,同时给出相同参数时两光束同向传输的信号光演化过程(---)

4. 若干参数对信号光聚焦程度的影响

从方程(8)–(11)可以看出,双光束对向耦合传输过程受 6 个参数的影响,它们是抽运光与信号光的波长比 r 、最初束宽比 w_0 、抽运光与信号光的初始振幅 U_{10} 和 U_{20} 、两光束中心的初始横向间距 X_0 及样品长度 L . 对于不同的初始条件和方程参数,信号光的压缩情况不同.下面将讨论这些参数的影响,为了降低问题的复杂性,取定 $r = 1, w_0 = 1$.

数值结果表明,虽然样品长度 L 取不同值时信号光会有不同的演化过程,但只要信号光出现压缩,光束束宽最小值总是出现在介质样品的输出端面.图 4 给出信号光的束宽最小值与样品长度的关系.由图 4 可见,当其他参数都确定后,样品长度 L 只有在某个范围内取值,信号光才会被压缩,而且 L 存在一个最佳值,可以使信号光被最大程度地压缩.例如,对于图 4 中 $U_{10} = 8.5$ 的曲线,使信号光压缩的 L 取值上限约为 0.55, L 的最佳值为 0.28,这样的样品长度可使信号光的束宽被压缩 $2.92/1.58 = 1.85$ 倍.从图 4 还可以发现,抽运光越强,达到信号光最佳压缩所需的样品长度就越短,同时信号光压缩程度越大.

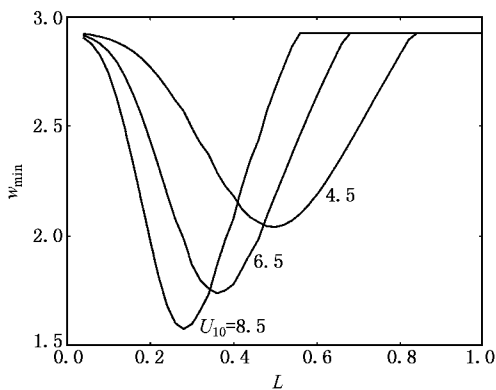


图 4 信号光束宽最小值随样品长度的变化 $U_{20} = 0.07, X_0 = 3$

束中心初始横向间距 X_0 及抽运光初始振幅 U_{10} 的变化.与图 4 相似,当其他参数确定后, X_0 与 U_{10} 都有一定的取值范围,且存在最佳值.表 1 列出相关参数的定量结果.

表 1 相关参数的定量结果

	给定的参数		待研究的参数	
	U_{10}	L 的取值上限	L 的最佳值	信号光最大压缩比
$U_{20} = 0.07$	8.5	0.56	0.28	1.85
$X_0 = 3$	6.5	0.68	0.36	1.68
	4.5	0.84	0.50	1.43
	L	X_0 的取值范围	X_0 的最佳值	信号光最大压缩比
$U_{20} = 0.07$	0.28	1.8—5.0	3.0	1.85
$X_{10} = 8.5$	0.38	2.2—6.2	3.6	1.64
	0.48	2.6—7.7	4.0	1.42
$U_{20} = 0.07$	X_0	U_{10} 的取值范围	U_{10} 的最佳值	信号光最大压缩比
	2	1.3—10.0	5.5	1.47
	$L = 0.28$	3	2.5—18.0	8.5
	4	5.2—30.0	13.0	1.70

信号光能被诱导聚焦,是因为抽运光对信号光的交叉相位调制效应改变了信号光的相位分布,从而改变了其波阵面形状.在此过程中,信号光能否会聚取决于抽运光的横向强度分布,以及信号光与抽运光的相对位置^[3].衍射效应与自散焦介质中的自相位调制效应都使抽运光发散,故具有一定初始强度的抽运光在介质中沿传输方向被展宽.若样品长度小,抽运光对信号光的影响不明显,若样品长度很大,与对向传输的信号光发生作用时,抽运光则已经被展得很宽,它不能有效地使信号光发生会聚.两光束中心初始横向间距 X_0 反映两光束的相对位置,

图 5 和图 6 分别给出信号光束宽最小值随两光

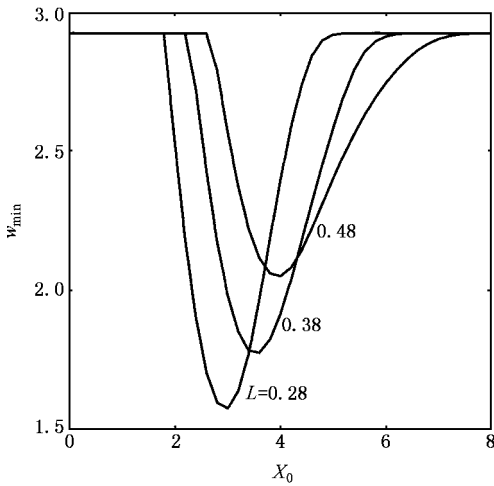


图 5 信号光束宽最小值随两光束中心初始横向间距的变化
 $U_{10} = 8.5, U_{20} = 0.07$

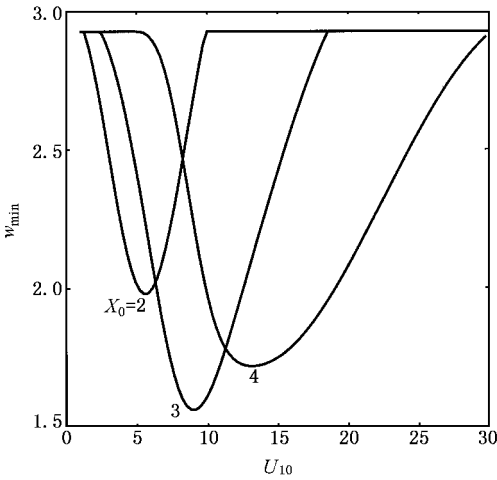


图 6 信号光束宽最小值随抽运光初始振幅的变化 $L = 0.28, U_{20} = 0.07$

X_0 很大时,两束光的相互作用很弱;由于抽运光与信号光的初始输入都是高斯波形,在 X_0 很小时,两光束中心靠得很近,由抽运光的横向强度分布决定的信号光的相移将使信号光发散而不是会聚^[3].因此, X_0 太大或太小都会影响抽运光对信号光的诱导聚焦作用.至于抽运光初始振幅 U_{10} ,它直接决定抽运光非线性作用的强弱,越强的抽运光发散程度越大,强度不够的抽运光固然不能诱导信号光会聚,但强度太大的抽运光在自散焦介质中迅速展宽,同样不能使信号光压缩.这就是 L, X_0 和 U_{10} 都有一个取值范围并且存在最佳值的物理背景.

图 7 给出其他参数选定后,初始振幅不同的信号光的聚焦情况.结果表明,抽运光初始振幅 U_{10} —

定时,随信号光增强,信号光的被压缩程度变小,但当抽运光强度远大于信号光强度时,信号光变化所起的影响不明显,所以图 7 所示是一条缓慢变化的曲线.若 $U_{20}/U_{10} < 0.01$,可以认为信号光在演化过程中最小束宽不随其初始输入振幅 U_{20} 的变化而变化.这是因为在传输过程中,相对于抽运光对信号光的交叉相位调制效应,信号光的自相位调制效应小,可以忽略.

以上所讨论的参数都是在归一化系统中的,通过 (7) 式可将其变换到实际的物理系统.若取 $U_{10} = 10$ 实际要求 $|n_2| |A_{10}|^2 \sim 10^{-4}$,不同材料的非线性折射率系数 n_2 值差别很大,所以抽运光束峰值强度的量级约为 $10-10^3 \text{ MW/cm}^2$.可取信号光强度比抽运光强度弱 4 个数量级.若输入信号光的 $1/e$ 束宽为 $100 \mu\text{m}$,其衍射长度 L_D 约为 10 cm ,两光束中心横向距离可取几百微米,样品长度只需几个厘米.

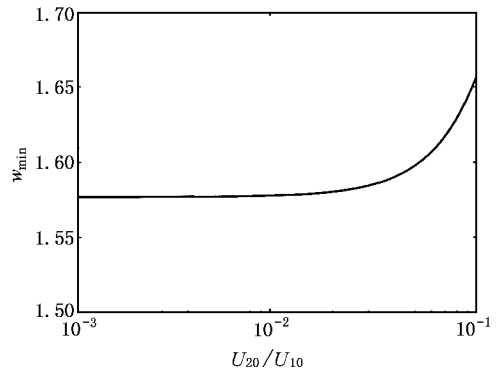


图 7 信号光束宽最小值随信号光与抽运光初始振幅比的变化
 $L = 0.28, U_{10} = 8.5, X_0 = 3$ (横轴采用了対数坐标)

5. 双光束对向传输与同向传输的比较

双光束在自散焦介质中同向共同传输时信号光束宽的典型演化过程^[3,7]如图 3 中虚线所示.在这种情况下,信号光的演化方式与介质样品长度无关,光束束宽总是先会聚(当样品足够长时),再发散.但在对向传输的情形,信号光的演化却强烈地依赖样品长度.不同长度样品内信号光的演化方式完全不同.对于较短的样品,信号光是会聚的;当介质样品足够长时,信号光反而先散后聚.为什么对向传输与同向传输时信号光的演化对样品长度有不同的依赖关系呢?这是因为信号光的演化过程主要由抽运光的波形决定,而抽运光的横向强度分布随传输距离变化.

若信号光与抽运光同向传输, 无论样品长度如何, 沿着传输方向的相同点上, 信号光“看到”的抽运光波形总是一样的, 但若信号光与抽运光对向传输, 对不同的样品长度, 信号光在沿着传输方向的相同点上“看到”的抽运光波形会有很大差异, 从而造成信号光的不同演化结果.

双光束对向共同传输时, 要使信号光压缩, 抽运光初始振幅 U_{10} 有一定的取值范围, 且存在最佳值. 但双光束同向传输时, 抽运光越强, 信号光聚焦程度越大, 信号光束宽最小值是抽运光初始振幅 U_{10} 的单调减小函数^[7]. 可见, 这两种情况下 U_{10} 对信号光的影响有较大区别.

无论双光束同向还是对向共同传输, 在适当条件下, 信号光都会被诱导聚焦, 同时发生横向偏移. 图 8 给出两种情况下信号光横向偏移量随传输距离

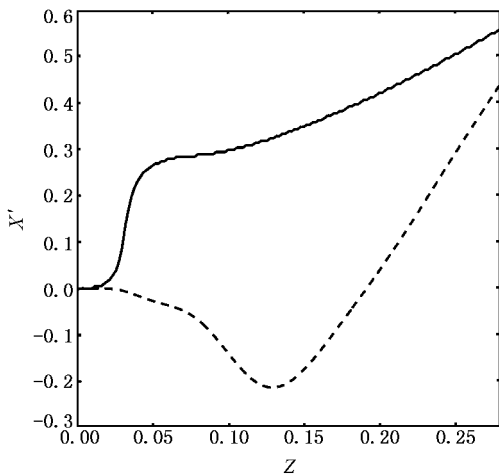


图 8 信号光横向偏移量 X' 随传输距离的变化 —— 为对向传输的情况, - - - 为同向传输的情况. $L = 0.28$, $U_{10} = 8.5$, $U_{20} = 0.07$, $X_0 = 2$

的变化(以远离抽运光的方向为正). 可见, 对向传输时, 信号光一直都在远离抽运光, 而同向传输时, 信号光先靠近抽运光, 然后再远离它.

通过比较还知道, 对向传输信号光的最大聚焦效率比同向传输时稍低. 例如, 取抽运光初始振幅同为 8.5, 在同向传输的情形, 最大压缩比可达到 3 左右^[7], 而在对向传输的情形, 信号光可达到的最大压缩比要略低于 2.

总之, 虽然双光束同向传输或对向传输时信号光都可以被诱导聚焦, 但两个过程的特性有所差异. 最大的差异是它们具有完全不同的几何结构, 因此它们应该有不同的应用场合. 基于双光束对向传输中信号光演化过程对两光束初始参数的依赖关系, 在实际设计相关实验时, 可以取定样品长度, 然后仔细调节两光束中心的初始横向间距及抽运光的输入强度, 使信号光获得最佳的聚焦效果.

6. 结 论

一强一弱两光束在二维自散焦介质中对向共同传输, 若适当地选择初始参数, 强的抽运光能通过交叉相位调制效应诱导弱的信号光聚焦, 同时使信号光发生横向偏移. 样品长度、抽运光初始振幅及两光束中心初始横向间距是影响信号光聚焦过程的三个参数, 它们均存在一个最佳值, 能使信号光达到最佳的压缩效果. 双光束在自散焦介质中的诱导聚焦现象可用于实现对弱光的可控压缩, 而且在全光开关的设计方面也会有一定的应用价值. 利用双光束对向传输来压缩弱光的实验研究至今未见诸报道, 本文所得结果对相关的实验工作具有参考价值.

[1] Shen Y R 1984 *The Principles of Nonlinear Optics* (New York: Wiley) chap 17 p303
 [2] Guo Q and Chi S 2000 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **2** 5
 [3] Agrawal G P 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 2487
 [4] Stenta A J *et al* 1992 *Opt. Lett.* **17** 19
 [5] Hickmann J M, Gomes A S L and Araujo C 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3547
 [6] Pietrzyk M E 1999 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **1** 685
 [7] Guo Q, Tian Y and Liu C Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1057 (in Chinese) 郭旗、田野、刘承宜 2002 物理学报 **51** 1057]

Guo Q and Li H G 2003 *Acta Opt. Sin.* **23** 1127 (in Chinese) 郭旗、李华刚 2003 光学学报 **23** 1127]
 [8] Li H G and Guo Q 2003 *Chin. J. Lasers* **30** 123 (in Chinese) 李华刚、郭旗 2003 中国激光 **30** 123]
 [9] Oren C *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 133901
 [10] Agrawal G P 1989 *Nonlinear Fiber Optics* (San Diego: Academic) chap 2 p44
 [11] Porras M A and Medina R 1995 *Appl. Opt.* **34** 8247
 [12] Tian Y *et al* 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 813 (in Chinese) 田野等 2002 光学学报 **22** 813]

Induced focusing due to two optical beams counterpropagating in self-defocusing nonlinear media^{*}

Jiang Xiu-Juan Li Hua-Gang Guo Qi[†] Hu Wei

(*Laboratory of Light Transmission Optics ,South China Normal University ,Guangzhou 510631 ,China*)

(Received 10 June 2003 ; revised manuscript received 5 April 2004)

Abstract

In this paper a research work is done on two optical beams co-propagating in opposite directions in two-dimensional self-defocusing nonlinear media. Numerical results show that the probe beam can be induced to focus due to cross-phase modulation by the pump beam under certain conditions. We also discuss the effect on the focusing of the probe beam from the four parameters : the specimen length ,the initial amplitudes of the pump beam and the probe beam ,and the initial transversal distance between the centers of the two beams . We find that some of them have optimum values ,which result in the strongest focusing .

Keywords : self-defocusing nonlinear media , counterpropagation , induced focusing , cross-phase modulation effect

PACC : 4265J , 4225B

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province ,China(Grant Nos . 031516 and 011455) ,and the Team Project of the Natural Science Foundation of Guangdong Province ,China(Grant No. 20003061) .

[†] Corresponding author . E-mail : guoq@scnu . edu . cn