

文章编号: 0253-2239(2006)07-1083-8

三维自散焦介质中的暗光束诱导亮光束聚焦*

阳红梅^{1,2} 江秀娟³ 郭旗^{1,2**}

1 华南师范大学光子信息技术广东省高校重点实验室, 广州 510006
2 华南师范大学信息光电子科技学院传输光学实验室, 广州 510006
3 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800

摘要: 为了获得一种对称压缩圆光束的方法,系统研究了三维自散焦介质中亮-暗光束对的共同传输。数值结果表明:当两光束中心重合时,若抽运光(暗光束)初始振幅远大于信号光(亮光束)初始振幅,抽运光将通过交叉相位调制(XPM)诱导信号光聚焦,使得信号光的圆形光斑被对称压缩。讨论了光束参量对信号光聚焦效果的影响,发现抽运光初始振幅越大,信号光聚焦越强。当抽运光初始振幅一定时,暗光束的初始束宽存在最佳值使得信号光压缩最强。当抽运光与信号光的波长比取值为0.5~1.5时,信号光聚焦程度随着波长比的增大而有所降低。还设计了验证理论结果的实验方案。

关键词: 非线性光学; 诱导聚焦; 数值模拟; 三维自散焦介质; 暗光束; 交叉相位调制

中图分类号: O437 文献标识码: A

Focusing of Bright Beam Induced by Dark Beam in Three-Dimensional Self-Defocusing Media

Yang Hongmei^{1,2} Jiang Xiujuan³ Guo Qi^{1,2}

1 Key Laboratory of Photonic Information Technology, South China Normal University, Guangzhou 510006
2 Laboratory of Transmission Optics, Information and Electron Technological Institute, South China Normal University, Guangzhou 510006
3 National Laboratory of High-Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, 201800

Abstract: To contract the circular beam symmetrically, the co-propagation of the bright and dark beams in three-dimensional self-defocusing media is studied systematically. Numerical results indicate that the signal beam is induced to the focus and symmetrically contracted during the evolution due to the cross-phase modulation effect by the pump beam, when the two beam centers are completely superposed and the initial intensity of the dark pump beam is much stronger than that of the bright signal beam. The effect of the beam parameters on the focusing performance of the signal beam is discussed, and it is found that the larger the initial intensity of the pump beam is, the stronger the focusing of the signal beam is. There exists an optimum value for the initial spot size of the dark beam for the strongest focusing of the signal beam, for a given initial pump intensity. When the wavelength ratio of the pump beam and the signal beam is 0.5~1.5, the focusing of the signal beam decreases with the rise of the ratio. And the theoretical result is validated experimentally.

Key words: nonlinear optics; induced focusing; numerical simulation; three-dimensional self-defocusing media; dark beam; cross-phase modulation effect

1 引 言

众所周知,单光束在自聚焦介质的传输过程中,

由于非线性效应引起的光束自相位调制(SPM)能够抵消衍射造成的光束展宽,并且在光束功率超过

* 国家自然科学基金(10474023)和广东省自然科学基金重点项目(04105804)资助课题。

作者简介: 阳红梅(1979~),女,湖南隆回县人,硕士,主要从事导波光学与光通信技术的研究。

E-mail: ouyanghongmei@126.com

** 通信联系人. E-mail: guoqi@scnu.edu.cn

收稿日期: 2005-07-08; 收到修改稿日期: 2005-11-17

某一临界值时能够使光束压缩,此即光束的自聚焦现象^[1,2]。而在自散焦介质中,非线性效应加强光束衍射使之展宽,即为自散焦现象。

然而,1990年Agrawal通过理论研究发现^[2]:一束强的抽运光和一束弱的信号光在自散焦介质中同向共同传输,当两光束的中心错开一定距离时抽运光能够诱导信号光聚焦。接着Stentz和Hickmann^[3,4]的小组便分别在实验中观察到了这种诱导聚焦现象。此后,学者们对其进行了更为深入的研究。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克尔非线性平面波导中共同传输时的时空特性^[5]。郭旗的小组讨论了强的抽运光与弱的信号光在1+1维自散焦介质中的耦合传输过程中,光束的参量对诱导信号光聚焦的影响,发现一些参量具有最佳值,通过选择最佳的参量值可以提高信号光的聚焦效率^[6,7];之后又研究了在1+2维自散焦体介质中强的抽运光与弱的信号光的耦合传输^[8,9]。在1+2维自散焦介质中,信号光也能被诱导聚焦。但X束宽和Y束宽的演变不同步,致使信号光光束面由圆形逐渐演变为不对称的弯月形。与此同时,信号光光束中心逐渐远离Z轴(两光束中心有一个初始间距,Z轴为传输轴)。类似于1+1维自散焦介质中的情况,在1+2维自散焦介质中同样可以通过选择最佳参量值提高光束压缩的效率^[10]。在自散焦介质中,当两光束中心错开一定距离时,不仅一强一弱两光束在同向共同传输过程中强光能诱导弱光聚焦,在对向共同传输的过程中

强光也能诱导弱光汇聚,而且弱光的中心也发生横向偏移^[11]。在以上所有的由一束强亮光束诱导弱亮光束聚焦的模式中,弱光均被不对称压缩,且弱光的光束中心在传输过程中沿横向发生偏移。

交叉相位调制(XPM)是诱导聚焦的主要物理机理,强光通过交叉相位调制改变了弱光的相位分布而使弱光聚焦。交叉相位调制的效果与抽运光的波形密切相关,但在以上所有的研究中都是利用亮的高斯型抽运光诱导亮的高斯型信号光聚焦。关于在1+1维自散焦介质中一强一弱两光束耦合传输的最新研究^[12]发现,若抽运光为暗光束,信号光依然为亮高斯形,在抽运光的交叉相位调制作用的诱导下,弱信号光仍能汇聚。与亮光束诱导亮光束聚焦不同的是,当暗光束的中心与亮光束的中心完全重合时,信号光的聚焦最强,且在传输过程中信号光被完全对称地压缩,与此同时,信号光光束中心保持在Z轴上(Z轴为传输轴),在横向不会产生任何偏移。由此,可以期望在1+2维体介质波导中也有相似的现象,并能由此获得一种使圆光束对称压缩的方法。基于此,本文研究了1+2维体介质中暗光束对亮光束的诱导聚焦。

2 两光束共同传输的理论模型

在傍轴近似下,两束连续或准连续光束在无耗、均匀、稳定的1+2维体介质中同向传输时应满足如下耦合非线性薛定谔方程组^[2]:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} - \frac{i}{2k_1} \left(\frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2} \right) = \frac{ik_1 n_2}{n_{01}} (|A_1|^2 + 2|A_2|^2) A_1, \quad (1)$$

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

其中 z 为传输轴, A_j 是慢变包络振幅, $k_j = 2\pi n_{0j}/\lambda_j$, n_{0j} 是波长为($j = 1, 2$, $j = 1$ 代表抽运光, $j = 2$ 代表信号光,下同)的线性折射率, n_2 是非线性系数,在自散焦介质中为负值。方程(1)、(2)中左边第二项均为衍射项,右边两项分别为自相位调制项和由于与另一光束的非线性耦合而引起的交叉相位调制项。此时两光束均在衍射、自相位调制及交叉相位调制三种效应的影响下传输。

引入如下归一化变换:

$$X = \frac{x}{w_{20}}, \quad Y = \frac{y}{w_{20}}, \quad Z = \frac{z}{L_{Dp}}, \quad U_j = \frac{A_j k_2 w_{20} |n_2|^{1/2}}{|n_0|^{1/2}}, \quad (3)$$

其中 w_{20} 为信号光的初始束宽, $L_{Dp} = k_2 w_{20}^2$ 是信号光的衍射长度,又称瑞利距离。应用上述变换对方程(1)、(2)归一化,得到归一化的耦合传输方程如下:

$$\frac{\partial U_1}{\partial z} - \frac{i}{2} r \left(\frac{\partial U_1}{\partial X^2} + \frac{\partial U_1}{\partial Y^2} \right) = \text{sgn}(n_2) \frac{i}{r} (|U_1|^2 + 2|U_2|^2) U_1, \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial z} - \frac{i}{2} r \left(\frac{\partial U_2}{\partial X^2} + \frac{\partial U_2}{\partial Y^2} \right) = \text{sgn}(n_2) \frac{i}{r} (|U_2|^2 + 2|U_1|^2) U_2, \quad (5)$$

其中 $r = \lambda_1 / \lambda_2$ 为两光束的波长比。(4) 式和(5) 式忽略了线性折射率的色散, 即认为 $n_{01} \approx n_{02}$ 。在本文自散焦介质中, 有 $\text{sgn}(n_2) = -1$ 。

为了讨论满足方程组(4) 式和(5) 的亮-暗光束对的共同传输, 抽运光与信号光分别取为暗光束与亮光束。

亮光束是指暗背景中具有一定强度的光场分布。本文将取为高斯型光束, 如(6) 式所示。理想暗光束是指均匀连续的无限亮背景中一个窄的凹陷, 但在实验中, 这样的光束并不存在, 而且在数值模拟中也不可能取得无限宽背景, 因此在实际数值模拟中以有限宽高斯形亮背景取代无限宽连续亮背景, 如(7) 式所示:

$$U_2(X, Y, 0) = U_{20} \exp\left(-\frac{X^2 + Y^2}{2}\right), \quad (6)$$

$$U_1(X, Y, 0) = U_{10} \tanh\left(\frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{w_d}\right) \times \exp\left(-\frac{X^2 + Y^2}{2w_b^2}\right), \quad (7)$$

其中 U_{10} 和 U_{20} 分别是抽运光和信号光的输入振幅, w_d 是暗光束的束宽, w_b 是高斯亮背景的束宽均为归一化的量。 w_b 取值越大式(7) 所示暗光束越接近于理

想暗光束, 当 w_b 趋近于无穷大时, 近似于理想暗光束^[12]。本文引言中已指出, 在 1+1 维自散焦介质中的耦合传输中已知当两光束中心完全重合时信号光能被对称地最大压缩^[12], 为了研究体介质中信号光的对称压缩, 上两式取两光束的中心完全重合, 且都在坐标原点。

3 数值模拟

以下用分步傅里叶方法主要从两个方面进行数值模拟和分析。一方面, 对于给定的初始亮-暗光束对, 模拟它们在同向耦合传输过程中的演化, 证实了亮光束能被暗光束诱导聚焦。另一方面, 具体讨论和分析几个主要的参量如何影响亮光束的诱导聚焦。

3.1 耦合传输的数值模拟

为了模拟双光束的演化过程, 以分步傅里叶变换方法求解方程(4) 和(5) 的数值解, 初始输入由(6) 式和(7) 式给出。为了分别讨论理想暗光束与亮背景为有限宽的实际亮光束的影响, 本节中取 $w_1 = 2$ 和 $w_3 = 10$, 在第 3.2.1 节中将说明这样的取值是合理的。根据数值模拟的结果, 图 1、图 2 展示了双光束的典型演化过程。

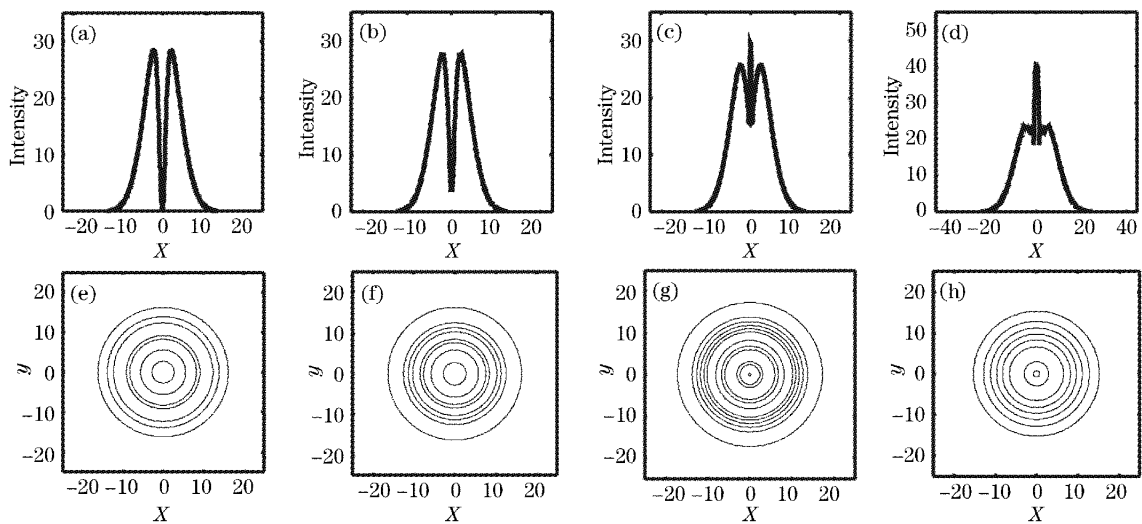


图 1 抽运光的演化图

Fig. 1 Evolvement of the pump beam

图 1 给出的是抽运光的典型演化情形, 图 1(a)~图 1(d) 分别为 $z/(k_2 w_{b0}^2) = 0, 0.15, 0.3, 0.45$ 处光强的 X 轴(Y 轴) 剖面图, X 轴剖面图和 Y 轴剖面图完全相同。图 1(e)~图 1(h) 分别为 $Z = 0, 0.15, 0.3, 0.45$ 处的光强等高线图。其他初始参量的取值分别为 $U_{10} = 6, U_{20} = 0.01, w_d = 2, w_b = 10, r = 1.1$, 纵、横坐标均为归一化的量。在传输过程中, 抽运光始终保

持其圆对称分布, 其光强分布的 X 轴剖面图和 Y 轴剖面图始终完全重合, 因此在图中分辨不了这两个方向光强分布的差别。在演化过程中暗光束凹陷部分逐渐变窄且底部逐渐被抬升, 甚至演变成一个峰。该现象的物理机理在于: 在两束光的共同传输中, 由于抽运光光强远远大于信号光光强, 信号光交叉相位调制对抽运光的影响可忽略, 抽运光主要在自相位调制

影响下传输,与其单独在介质中传输时的演化几乎完全相同。抽运光在本文讨论的自散焦介质中传输的过程中是散焦的,因此,暗光束的亮背景部分在传输过程中逐渐展开。这种扩展使得暗光束凹陷部分被

逐渐压缩,调制深度逐渐变浅[图 1(b)],并在进一步的传输中逐渐变得复杂,凹陷部分演变成多重结构[图 1(c)],甚至演变成一高出亮背景的峰[图 1(d)]。

信号光的典型演化则表现出聚焦,见图 2、图 3。

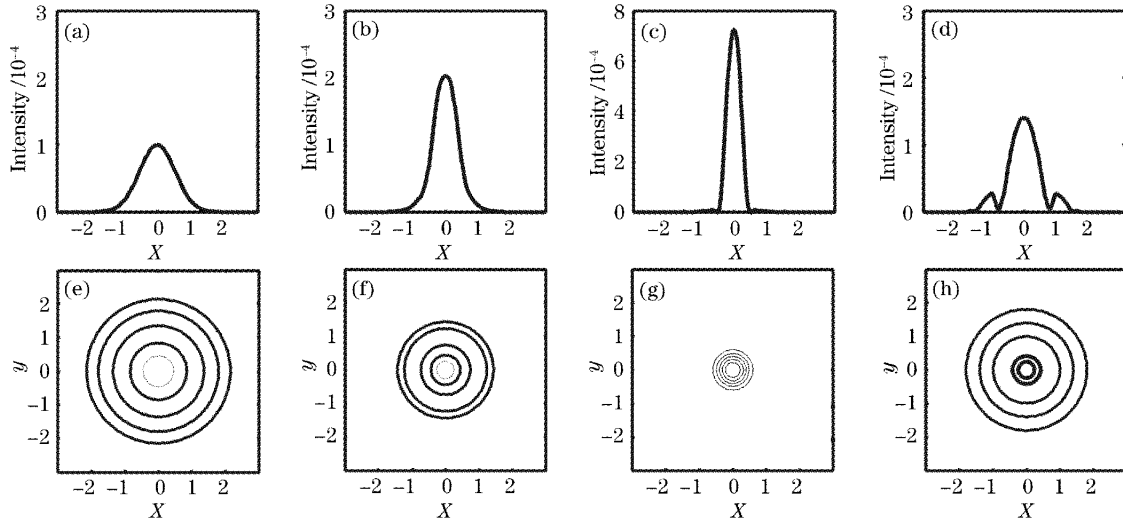


图 2 信号光的演化图

Fig. 2 Evolution of the signal beam

其中图 2(a)~图 2(d)分别为 $Z=0, 0.15, 0.3, 0.45$ 处光强的 X 轴(Y 轴)剖面图, X 轴剖面图和 Y 轴剖面图完全相同。图 2(e)~图 2(h)分别为 $Z=0, 0.15, 0.3, 0.45$ 处的光强等高线图。其他初始参量的取值同图 1。光强的 X 轴与 Y 轴的剖面图在图中看不出任何区别,是完全重合的[图 2(a)~图 2(d)],所以信号光在传输过程中也保持圆对称分布,且光束中心始终在 z 轴上,在横向不产生任何偏移。从 X 或 Y 轴的剖面图与等高线图都可看出,在从 $Z=0$ 传输到 $Z=0.45$ 的过程,信号光先汇聚后发散。光斑^[8]的具体演变过程如图 3 所示。在传输距离 $Z=0.3$

之前,信号光的光斑逐渐减小,即信号光汇聚。在 $Z=0.3$ 处光斑最小,此时信号光聚焦达到最强。此后,光斑逐渐展宽,不再有聚焦的趋势。这也说明了信号光在传输过程中被诱导聚焦,且在一次聚焦最强之后不再聚焦。图 2 和图 3 说明信号光能够被完全对称地压缩。而在亮光束诱导亮光束聚焦中^[8],信号光光斑被不对称地压缩,致使其光斑逐渐演化成弯月形,且光束中心不可避免地发生偏移。因此,我们在此获得了一种更好的压缩圆光束的方法。接下来将具体讨论究竟在什么样的条件下才能使圆光束的压缩效果最好。

3.2 初始参量对诱导聚集的影响

两束光的耦合传输由归一化耦合传输方程式(4)和(5)及初始输入式(6)和(7)共同确定,由这四个关系式易知影响本文所述耦合传输的一共有 5 个参量,包括一个方程参量:抽运光与信号光的波长比 r ;以及四个初始参量:信号光的输入振幅 U_{20} 、抽运光的输入振幅 U_{10} 、暗光束的宽度 w_a 及其亮背景的宽度 w_b 。由于 $U_{20} \ll U_{10}$,故可忽略信号光的输入振幅 U_{20} 对耦合传输的影响。则只需考虑其他四个参量的影响。

为了讨论的方便,先定义三个参量,最小光斑 $[\text{Min}(B)]$ 、聚焦因子 (F) ^[11] 和聚焦距离 (L) ^[11]。最小光斑定义为光束在一个样品长度中完整传输一次,该过程中光斑的最小值。聚焦因子定义为信号

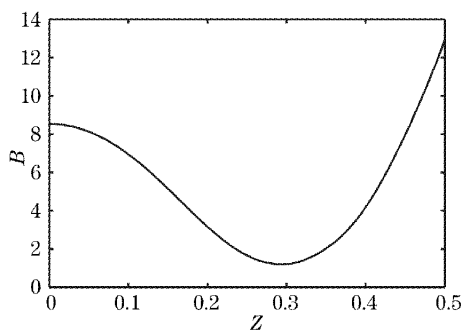


图 3 信号光光斑值随 Z 轴的演化图,

其他初始参量的取值同图 2

Fig. 3 Evolution of the signal spot size along the propagating distance. The values of other initial parameters are the same as those of Fig. 2

光初始光斑与最小光斑的比值。显然聚焦越强,则最小光斑越小,而聚焦因子越大。聚焦距离指的是从最小光斑处到初始输入位置的距离。故此可以用上述三个参量来完全描述诱导聚焦的效果。

3.2.1 高斯背景束宽的影响

理想的暗光束应为均匀无限宽亮背景中一全窄的凹陷,而在实际数值模拟的取值上,亮背景宽度不可能取无限值,但可以使得亮背景宽度远远大于暗光束的宽度,使其近似为无限宽亮背景。事实上,在自散焦克尔介质,有限宽的亮背景并不会从本质上影响暗孤子的演化^[13]。而且在 1+1 维自散焦克尔介质中,当亮背景的宽度大于暗光束的十倍束宽时,可忽略有限宽亮背景对亮暗光束对耦合传输的影响^[12]。这些使得我们可以期望在本文所研究的耦合传输中,暗光束亮背景也能取有限值。图 4 所示的是抽运光背景宽度 w_b 的改变对信号光聚焦效果的影响,图 4 中虚线均对应 $w_d=2$,实线均对应 $w_d=3$,其他初始参量为 $U_{10}=10, U_{20}=0.01, r=1.1$ 。该图显示,对于 $w_d=2$,当 $w_b>10$ 时,对于 $w_d=3$,当 $w_b>12$ 时,信号光最小光斑与聚焦距离已几乎不随 w_b 的变化而变化。通过大量的数值模拟发现,对于初始参量 U_{10}, U_{20} 和 r 的其他取值,也有相似的规律。这表明在模拟过程中忽略背景有限宽的影响是合理的。其物理机理可通过分析信号光的相位得出。对于两光束的归一化耦合传输方程(4)和(5),当抽运光光强远远大于信号光光强时,有 $|U_{10}| \gg |U_{20}|$ 。故在耦合传输过程中,对于抽运光,可忽略信号光对抽运光的交叉相位调制,只保留

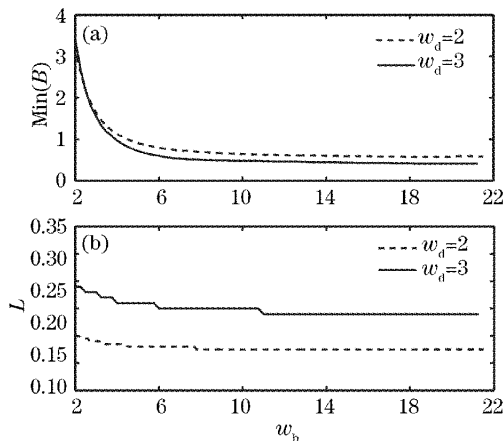


图 4 最小光斑(a)、聚焦距离(b)与背景宽度 w_b 的关系图

Fig. 4 The minimum spot size (a) and the focusing length (b) of the signal beam as the function of the background width w_b

方程(4)中的自相位调制项。对于信号光,可以忽略方程(5)中信号光自身的自相位调制,且可忽略其本身的衍射,只考虑抽运光的交叉相位调制效果对其传输的影响。则可解得信号光由于抽运光的交叉相位调制产生的附加相位为^[12]

$$\phi_{\text{NL}}(X, Y) = -2U_{10}^2 \tanh^2 \left(\frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{w_d} \right), \quad (8)$$

在(8)式推导过程中,暗光束的背景取为均匀无限宽亮背景,即为一理想暗光束。

由于抽运光与信号光均是圆对称的,在 XY 面上的任一方向上光场分布情形一致,可引入柱坐标。令 $R = (X^2 + Y^2)^{1/2}$, 上式变为

$$\phi_{\text{NL}}(R) = -2U_{10}^2 \tanh^2 (R/w_d), \quad (9)$$

则信号光的等相位面可由下式给出:

$$\phi_{\text{NL}}(R)Z + k_2^2 w_0^2 Z = C_p, \quad (10)$$

其中 C_p 为一常数。(9)式与(10)式与 1+1 维自散焦介质中的耦合传输^[12] 具有完全相同的形式,故可知只有在

$$R < w_d \text{arccosh } 2/2 \approx 2w_d/3$$

的区间内,只有在 $R(Z) > 0$ 时,分布在该区间内的信号光部分才能被抽运光诱导聚焦,也只有该区间的抽运光分布对信号光的诱导聚焦有贡献。

因此,从初始位置看,虽然抽运光实际亮背景取有限宽高斯波形,但只要宽度足够大,完全保留了暗光束对信号光聚焦有贡献的这一区域,则可认为这一背景宽度的值是合理的,此时可忽略暗光束的亮背景为有限宽对耦合传输的影响。

在以下的讨论中,背景宽度的取值都是基于这个分析结果的。

3.2.2 抽运光输入振幅的影响

在信号光的诱导聚焦中,抽运光的光强是一个非常重要的影响参量。只有当抽运的光强远远大于信号光光强时,信号光才能被诱导聚焦。而且信号光的聚焦程度随抽运光光强的增大而增大。图 5 给出了 U_{10} 对诱导聚焦影响的典型情况。当抽运光振幅 $U_{10} < 1.4$ 时,信号光最小光斑 $\text{Min}(B)$ 的值保持为 8.53,即初始位置的光斑值(见图 3),这意味着信号光在传输过程中是发散的。直到 U_{10} 继续增大,信号光才开始出现聚焦。信号光最小光斑随 U_{10} 的增大而迅速减小,当 U_{10} 增大至 8 时,此时信号光最小光斑不到 1,这说明信号光的聚焦随 U_{10} 的增大而明显增强,当 U_{10} 增大至 8 时,信号光的压缩已经很强。聚焦距离则随 U_{10} 的增大而减小,即聚焦最强的位置随 U_{10} 的增大而向初始位置移动。当 $U_{10} > 8$

时,该位置已经非常接近初始位置,聚焦距离仅为约 0.2 个瑞利距离。

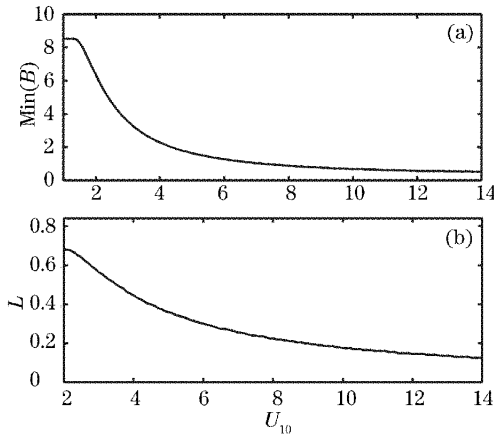


图 5 最小光斑(a)、聚焦距离(b)与抽运光振幅的关系图。

其他初始参量为 $U_{20}=0.01, w_d=2, r=1.1$

Fig.5 The minimum spot size (a) and the focusing length (b) of the signal beam as the function of the amplitude of the pump beam, the other parameters are with $U_{20}=0.01, w_d=2, r=1.1$

对于上述现象,可作如下定性分析:信号光的自相位调制引起光束展宽,而抽运光交叉相位调制的影响诱导信号光聚焦。显然只有当自相位调制远远小于交叉相位调制时,光束才能聚焦。其中自相位调制与交叉相位调制作用的强弱分别由信号光的光强与抽运光的光强确定。因此,对于信号光,只有当抽运光的输入光强远远大于信号光的输入光强时,才能忽略自相位调制引起的展宽,只考虑抽运光交叉相位调制的影响,信号光被抽运光交叉相位调制的影响诱导聚焦,而且信号光的聚焦随抽运光输入振幅的增大而增强。

定量地来看,信号光相位波前曲率 κ 为负值时,信号光聚焦,且 κ 绝对值越大,信号光波前曲率半径越小,聚焦越强。 κ 表达式如下所示^[12]:

$$\kappa \approx -\text{sgn}(\phi_{NL}) \frac{Z \|\phi_{NL}\|}{k_2^2 w_0^2},$$

其中

$$\phi_{NL} \propto \frac{4U_{10}^2 Z \text{sech}^4(R/w_d) [\cosh(2R/w_d) - 2]}{w_d^2},$$

由上两式可知 κ 正比于 U_{10}^2 ,故当 $\kappa < 0$,信号光的聚焦程度随 U_{10}^2 的增大而增大。

3.2.3 暗光束凹陷部分束宽的影响

数值模拟的结果表明:暗光束束宽对信号光的诱导聚焦具有很重要的影响,而且这种影响与 1+1 维中的情形非常类似^[12],如图 6 所示。图 6 中虚线

均对应初始参量 $U_{10} = 6$,实线均对应初始参量 $U_{10} = 10$ 。其他初始参量为 $U_{20} = 0.01, r = 1.1$ 。当暗光束束宽很窄时,信号光聚焦程度随暗光束的束宽增大而增强,但当暗光束宽度增大到一定值后,信号光聚焦强度反而随暗光束束宽的增大而减弱,即暗光束束宽存在一个最佳值,在该值处信号光聚焦最强。抽运光振幅越大,这个最佳值也越大。由第 3.2.2 节可知这是因为暗光束聚焦程度随抽运光振幅的增大而增强。对于一定输入振幅值的抽运光,信号光的聚焦距离则几乎随 w_d 的增加线性增长(图 6 中下图)。抽运光通过交叉相位调制效应改变信号光的相位分布,从而诱导信号光聚焦。暗光束束宽对信号光诱导聚焦的影响,是由两方面的影响共同确定的。一方面,由第 3.2.1 节已知只有分布在 $|R|/w_d < \text{arccosh}(2)/2 \approx 2/3$ 范围内的信号光才有可能被诱导聚焦。当暗光束凹陷部分足够小时,随着暗光束束宽的增大,处在这一范围内的信号光分布增多,信号光聚焦也就增强。另一方面,对于一定振幅的抽运光,暗光束凹陷部分越宽,抽运光的最大值越小(图 7),对信号光的非线性作用也越弱。在暗光束凹陷部分增大的过程中,这两种不同的影响同时起作用。但当凹陷部分由足够小逐渐增大时,前一种影响起主要作用,因而信号光聚焦强度随暗光束的增大而增强;但在后一阶段情况则相反,因而信号光的聚焦强度反而随凹陷部分增大而减弱。因而对于一定振幅的抽运光,暗光束束宽具有一最佳值,在该值处信号光聚焦最强。

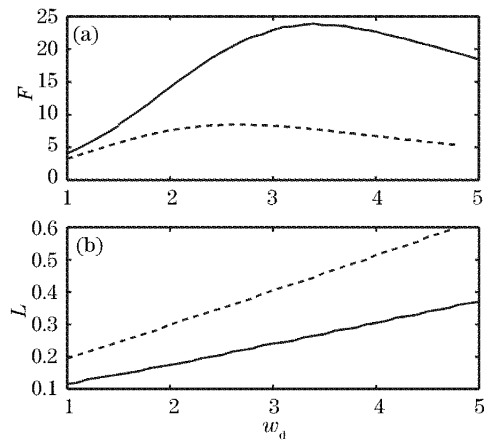


图 6 聚焦因子(a)、聚焦距离(b)与暗光束束宽的关系图

Fig.6 The focusing factor (a) and the focusing length (b) of the signal beam as the function of the dark width of the pump beam

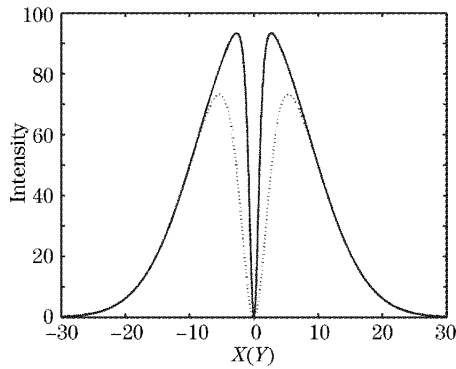


图 7 抽运光振幅一定 ($U_{10} = 10$)、暗光束束宽不同的抽运光剖面图。其中实线所示暗光束束宽 $w_d = 1$ ，虚线所示暗光束束宽 $w_d = 3$

Fig. 7 Profile comparison between the two pump beams with the same initial amplitude $U_{10} (= 10)$ but different initial dark notch widths. The value of w_d are 1 and 3 in solid curve and dash curve, respectively

3.2.4 两光束波长比 r 的影响

图 8 所示的是信号光聚焦与亮暗光束波长比 r 的依赖关系。图 8 中虚线均对应初始输入 $U_{10} = 6$ ，实线均对应初始参量 $U_{10} = 10$ 。其他初始参量为 $U_{20} = 0.01$, $w_d = 2$ 。 r 的取值从 0.5 到 1.5，在这一范围内，可忽略线性色散^[6]。如图中所示，信号光聚焦强度随 r 的增大而略有减弱。其原因可从耦合传输方程(4)和(5)来分析。当 r 增大时，抽运光的散焦增强，导致抽运光光强分布降低，对信号光的非线性作用也随之有所降低，因而信号光的聚焦程度在 r 的间接影响下有所降低，但降低的幅度很小。

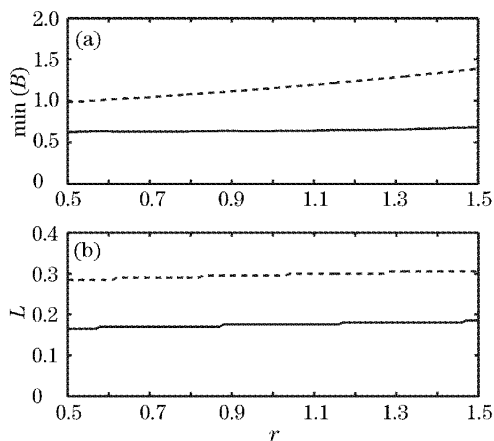


图 8 最小光斑(a)、聚焦点距离(b)与波长比的关系图

Fig. 8 The minimum spot size (a) and the focusing length (b) of the signal beam as the function of the ratio of the pump wavelength to the probe wavelength

4 实验设计

为了验证以上理论结果，我们设计了用强暗光束压缩弱亮光束的实验方案，如图 9 所示。在该的实验方案中，用输出波长为 514 nm 的激光器为抽运源，输出波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器为信号源，它们输出的均为连续光。以非线性热散焦介质作为工作物质，采用波前扰动法使强光束在其中传输时形成空间暗光束。抽运光与信号光通过分光镜 BS 耦合到工作物质 sample 中，出来后的信号光用 CCD 进行观测。图 9 中，P 为偏振片，用于调节抽运光的输入功率，SL 为扩束透镜组， M_1 和 M_2 为反射镜，F 为仅使信号光通过的滤光片，L 为聚焦透镜。目前，我们正在进行的实验工作已有进展，将在后续的文章中报道。

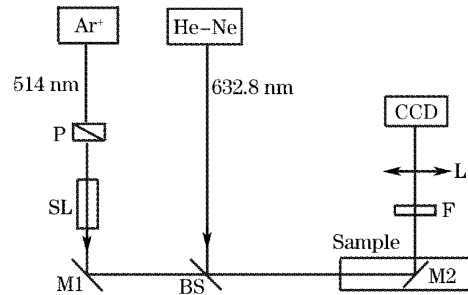


图 9 实验方案框图

Fig. 9 Block diagram of the experimental scheme

5 结 论

数值模拟的结果表明，选取抽运光为暗光束，信号光为亮的高斯光，这样的亮-暗光束对在 1+2 维自散焦体介质中共同传输时，若暗光束的输入振幅远远大于亮光束的输入振幅，则当两光束中心完全重合时，暗光束通过交叉相位调制的影响能诱导弱的亮光束聚焦，使得亮光束的圆形光斑被完全对称地压缩。抽运光的输入振幅是诱导聚焦的主要影响因素，抽运光的输入振幅越大，诱导聚焦越强，信号光的圆形光斑的压缩程度越大。对于抽运光输入振幅值一定的情况，暗光束的束宽有一最佳值，在该值处信号光圆光束面压缩最强。两光束的波长比 r 取值范围为 0.5~1.5 时，可忽略线性色散的影响。在该范围内，信号光圆形光斑的压缩程度随波长比 r 的增大略有降低。本文的研究结果为对称压缩圆形光束提供了一个良好的方法，文中还给出了验证理论结果的实验设计方案。

致谢 第一作者感谢与复旦大学光科学系谢逸群博

士的深入讨论.

参 考 文 献

- 1 Y. R. Shen. *The Principles of Nonlinear Optics* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1984. 303~333
- 2 G. P. Agrawal. Induced focusing of optical beams in self-defocusing nonlinear media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(21): 2487~2490
- 3 A. J. Stenta, M. Kauranen, J. Maki *et al.*. Induced focusing and spatial wave breaking from cross-phase modulation in a self-defocusing nonlinear medium[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1): 19~21
- 4 J. M. Hickmann, A. S. L. Gomes, C. B. Araujo. Observation of spatical cross-phase modulation effects in a self-defocusing nonlinear medium [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68** (24): 3547~3550
- 5 M. Pietrzyk. On the properties of two pulses propagating simultaneously in different dispersion regimes a nonlinear planar waveguide[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 1990, **1**(6): 685~696
- 6 Guo Qi, Tian Ye, Liu chenyi. Optimum parameters for focusing of optical beams in self-defocusing nonlinear media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(5): 1057~1062 (in Chinese)
郭 旗, 田 野, 刘承宜. 自散焦介质中光束聚焦的最佳参量选择[J]. *物理学报*, 2002, **51**(5): 1057~1062
- 7 Guo Qi, Li Huagang. Influence of beam widths on the induced focusing of optical beams in self-defocusing nonlinear media[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1127~1132 (in Chinese)
郭 旗, 李华刚. 光束束宽对自散焦介质中诱导光束聚焦的影响[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1127~1132
- 8 Li Huagang, Guo Qi. Focusing of optical beams induced by cross-phase modulation in three-dimensional self-defocusing nonlinear media[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(2): 123~128 (in Chinese)
李华刚, 郭 旗. 三维自散焦介质中由交叉相位调制效应引发的光束聚焦[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 123~128
- 9 Li Huagang, Guo Qi. Induced focusing of Gaussian elliptic beam in self-defocusing media[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 520~524 (in Chinese)
李华刚, 郭 旗. 椭圆高斯光束在自散焦介质中的诱导聚焦[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 520~524
- 10 Li Huagang, Guo Qi. Optimum parameters for focusing of optical beams in three dimensional self-defocusing nonlinear media[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 937~940 (in Chinese)
李华刚, 郭 旗. 三维自散焦介质中光束聚焦的最佳参量选择[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 937~940
- 11 Jiang XiuJuan, Guo Qi, Li Huagang *et al.*. Induced focusing from counter-propagation of two optical beams in self-defocusing media[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **233**(1~3): 1~6
- 12 Qi Guo, Jiang Xiujuan. Induced focusing from co-propagation of a pair of bright-dark optical beams in self-defocusing Kerr media [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **254**(1~3): 19~29
- 13 Zhigang Chen, Matthew Mitchell, Ming-feng Shih *et al.*. Steady-state dark photorefractive screening solitons [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 629~631



征 订 启 事

《中国激光》增刊

第十七届全国激光学术会议于2005年10月19~22日在四川绵阳富乐山大酒店召开。本次会议由中国光学学会与中国电子学会联合主办。共有350多名来自高校、研究所以及公司激光领域的研究人员参加了本次会议。

本次大会共收到论文330篇,《中国激光》将其中的优秀论文126篇汇编成册,以增刊形式出版了《第十七届全国激光学术会议论文集》,为广大激光工作者提供了一份有价值的参考资料。

按照研究方向,论文集分为激光物理、非线性光学、高能固体激光与超短脉冲激光、新型激光器、激光技术及晶体材料、激光应用、光束传输、激光薄膜及元器件等专栏。较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果,显示了激光科学技术对国家十一五规划、国家863计划、国家973计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

论文集共计462页,进口雅光纸精印,定价100元。欢迎订阅。

《光学手册》

这是我国编写的第一本基础性大型光学手册。本书顾问为著名光学专家龚祖同,主编为李景镇。

本书为16开,1541页,定价100元。全书有2700多个公式,1400余幅插图和400多个数据表格,230万字。是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。本书能使读者在较短时间内全面了解某门光学分科的主要内容,查阅公式、数据省时省力。

电话:021-69918427

电子信箱:gexiaohong@siom.ac.cn

地址:上海800-211信箱

邮政编码:201800

联系人:葛晓红