

文章编号: 1002-2082(2007)03-0380-05

级联介质的空间排布对光场特性的影响

邓亚红, 罗 斌, 潘 炜

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 基于菲涅尔衍射原理, 应用傅里叶变换方法, 从理论上推导了高斯光束经级联非线性介质传输后任意位置处光场分布的解析表达式, 研究了光场峰值强度、峰值出现的位置以及光束的束宽和调制因子等参量在级联介质中的变化规律。结果表明: 随着非线性效应的增强, 光场峰值强度逐渐增大, 峰值距离逐渐缩短, 光束束宽不断减小而调制因子逐渐增大。在介质排布中要尽量错开光束峰值位置, 采用均匀排布方案虽然可以降低元件受损的风险, 但还需对介质均匀配置的间距进行有效优化。

关键词: 非线性光学; 光束传播; 菲涅耳衍射; 非线性介质

中图分类号: TN012; O437

文献标志码: A

Effects of cascade nonlinear medium spatial configuration on optical field characteristics

DENG Ya-hong, LUO Bin, PAN Wei

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The expression of the optical field distribution in arbitrary location after Gaussian beam passes through cascade nonlinear mediums is derived with Fourier transform method and Fresnel diffraction principle. The variation relation of the optical field peak intensity, the peak power location, beam width and modulation factor in the cascade nonlinear mediums is investigated. The result shows that the optical field peak intensity increases gradually, the peak-to-peak amplitude becomes shorter, the beam width becomes narrower, and the modulation factor becomes bigger as the nonlinear effects enhance. The configuration of the nonlinear mediums should be located equidistantly, and kept away from the peak location of the optical beam by all means. The equidistance of the nonlinear mediums has to be optimized to reduce the risk of the optical element damage.

Key words: nonlinear optics; beam propagation; Fresnel diffraction; nonlinear medium

引言

在高功率激光装置中, 强激光通过非线性介质时所产生的自聚焦现象是增大光学元件遭受成丝破坏风险、限制高功率激光系统输出功率的一个重要因素^[1-3]。实用中为降低非线性效应, 希望缩短一次光束在非线性介质中的传输距离, 例如在片状放

大器中就采用了周期性串联薄介质的方案^[4]。因此, 研究光束在级联非线性介质中的传输规律是人们关注的主要问题之一。尽管采用串联配置方式可以有效地避免成丝破坏, 但在光学元件的实验中, 仍然会出现损伤点, 这种奇特的光损伤仅在高功率激光中较为明显, 而且不易追迹。1993年J. T.

收稿日期: 2006-10-23; 修回日期: 2006-11-20

作者简介: 邓亚红(1980—), 女, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要从事激光及非线性光学研究工作。E-mail: yhdeng99@163.com

Hunt 等人提出了“热像”概念^[5], 随后, Williams 等人从数值计算以及实验上得到验证^[6]。虽然很多学者的研究结果均对损伤点的产生作了合理的解释^[5-8], 但就元件排布方式造成元件损伤的理论分析未见报道。

在实际应用中, 常见的激光光束为高斯空间分布, 通常的研究都是将入射光束表示为一个强的“背景场”加上一个弱的“调制场”, 但在这种模型下很难得到级联介质中出射光场的解析表达式。为此, 本文仅对强高斯光束经过级联非线性介质传播后, 在任意位置处光束振幅分布的解析表达式进行了理论推导, 分析了光束各参量在级联介质中的变化关系, 研究了介质之间不同的空间配置对光束峰值出现位置

的影响。借此希望能为“热像”问题的解释提供有价值的帮助, 为工程应用提供理论设计依据。

1 理论模型

要得到光束通过级联薄介质传输系统后每一级光场强度峰值点的位置以及任意位置光场强度的分布表达式, 可先分析单级非线性介质组成的光传输系统的场分布规律, 进而得到普遍的传输规律。

如图1所示, 将一个薄非线性介质 L_1 置于入射光束传播平面 P_0 后方 z_{10} 处, 令入射光束的分布为 $f_0(x, y)$, 现考察经过介质 L_1 相距为 z_{12} 的 P_3 平面的场分布 $f_3(x, y)$ 。

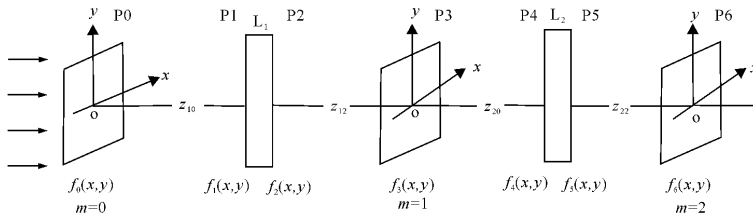


图1 两级非线性介质组成的光传输系统平面图

Fig. 1 Optic transmission system composed of double-step nonlinear medium

1.1 光束通过单片介质的振幅分布

依照光波传播过程(如图1所示), 要得到光束从 P_0 平面经过非线性介质传输后传播到 P_3 平面的场分布, 可分3步求解: 首先应用菲涅耳衍射原理得到光波从 P_0 平面到 P_1 平面的空间衍射分布; 其次通过非线性介质将光波传输到 P_2 平面; 第3步再经空间衍射得到 P_3 平面光场分布的空域表达式。

考虑入射光束为沿 z 方向传播的高斯光束^[9], 其分布为

$$f_0(x, y) = A \exp\left[-\frac{1}{2a_0^2}(x^2 + y^2)\right] \quad (1)$$

式中: A 表示入射光场中心振幅, 单位为 $W^{1/2}/cm$; a_0 是光束的初始束宽, 单位为 cm 。

利用菲涅耳近似^[10-11]可得到入射光场经过自由空间传播一段距离 z_{10} 后的衍射场分布:

$$f_1(x, y) = \frac{2a_0^2\pi A}{2a_0^2\pi + i\lambda z_{10}} \exp(ikz_{10}) \times \exp\left[-\frac{\pi(x^2 + y^2)}{4a_0^4\pi + i\lambda z_{10}}\right] \quad (2)$$

若不计吸收和散射, P_1 平面的光场强度为

$$I_1(x, y) = |f_1(x, y)|^2 = \frac{4a_0^4\pi^4 A^2}{4a_0^4\pi^4 + \lambda^2 z_{10}^2} \exp\left[-\frac{2a_0^2\pi^2(x^2 + y^2)}{4a_0^4\pi^4 + \lambda^2 z_{10}^2}\right] \quad (3)$$

从上式可以看出, 光束衍射后的强度与高斯光束的束宽、入射功率以及传输距离有关。

衍射场 $f_1(x, y)$ 经过厚 L_1 的非线性薄介质层时, 会产生与入射光强有关的非线性相移:

$$\varphi_{NL_1} = kn_2 L_{eff1} I_1(x, y) = kn_2 L_{eff1} \frac{4a_0^4\pi^4 A^2}{4a_0^4\pi^4 + \lambda^2 z_{10}^2} \times \exp\left[-\frac{2a_0^2\pi^2(x^2 + y^2)}{4a_0^4\pi^4 + \lambda^2 z_{10}^2}\right] \quad (4)$$

式中: n_2 为非线性折射率; 介质等效厚度 $L_{eff1} = [1 - \exp(-aL_1)]/a$ (a 为介质损耗)。将(4)式按泰勒公式一级近似, 引入变量:

$$f'_1 = [a_0^4 + (\frac{z_{10}}{k})^2]^2 / (n_2 L_{eff1} a_0^6 A^2) \quad (5)$$

则光束通过该介质后在 P_2 平面的场分布可以表示为

$$f_2(x, y) = f_1(x, y) \exp(i\varphi_{NL_1}) = f_1(x, y) \exp(ikn_2 L_{eff1} \frac{4a_0^4\pi^4 A^2}{4a_0^4\pi^4 + \lambda^2 z_{10}^2}) \times \exp\left[-i \frac{k}{2f'_1}(x^2 + y^2)\right] \quad (6)$$

同样, 可根据菲涅耳衍射原理得到光波在平面 P_3 的场分布:

$$f_3(x, y) = \frac{W_0 A}{w_1(z)} \exp\left[-\frac{1 + iC_1}{2a_1^2}(x^2 + y^2)\right] \quad (7)$$

式中: $W_0 = 2a_0^2\pi$; $w_1(z) = 2a_0^2\pi(1 - z_{12}/f'_1) + i\lambda(z_{10} + z_{12} - z_{10}z_{12}/f'_1)$; $W_0/|w_1(z)|$ 为振幅缩放因子,无量纲;光束束宽 $a_1 = a_0|w_1(z)|/W_0$; 调制因子 $C_1 = a_0^2k/f'_1(1 - z_{12}/f'_1) - \lambda(1 - z_{10}/f'_1)(z_{10} + z_{12} - z_{10}z_{12}/f'_1)/W_0$ 。从(1)式与(7)式的对比中可以看出:光束经过自由空间和非线性介质传输后,其光场位相发生了变化,该变化反映在调制因子 C_1 上。

第1级出射场中心位置的振幅 $f_3(0,0)$ 随 z_{12} 而改变,当 z_{12} 在某一特定位置 $z_{12}^{\max}$ 时, $f_3(0,0)$ 具有极大值,通过计算可得:

$$z_{12}^{\max} = -[W_0^2 - \lambda^2 z_{10}(f'_1 - z_{10})]f'_1/[W_0^2 + \lambda^2(f'_1 - z_{10})^2] \quad (8)$$

下文将第 m 级出射场中心位置振幅极大值出现的位置 $z_{m2}^{\max}$ 定义为峰值传输距离。根据B积分^[1,5]

的定义,第一级B积分 $B_1 = kn_2L_{\text{eff}1}I_1(0,0)$,它表征非线性效应所引起的光束位相的变化,从(7)式可以初步分析高斯光束经过单级非线性介质传输后相位发生的变化,光束振幅的大小主要与束宽、传输距离以及初始振幅 A 有关,不同的传输距离所对应的振幅分布也不同。

1.2 任意一级光束振幅分布的解析表达式

同理,根据菲涅耳衍射原理可以得到级联非线性介质光传输系统中,第一级($m=1$)出射光场 $f_3(x,y)$ 在空间传输一段距离 z_{20} ,经过第二片非线性介质再传输一段距离 z_{22} 后的第二级($m=2$)出射光场分布 $f_6(x,y)$;依此方法,进而得到第 m 级出射光场分布的解析表达式:

$$f_{3m}(x,y) = \frac{A \prod_{j=1}^m W_{m-j}}{\prod_{j=1}^m w_j(z)} \exp\left[-\frac{1+iC_m}{a_m^2}(x^2+y^2)\right], \quad m=0,1,2,\dots \quad (9)$$

式中光束束宽为

$$a_m = a_{m-1}|w_m(z)|^2/W_{m-1} \quad (10)$$

振幅缩放因子:

$$W_m = 2a_m^2\pi, w_m(z) = 2a_{m-1}^2\pi(1 - z_{m2}/f'_m) - \lambda C_{m-1}(z_{m0} + z_{m2} - z_{m0}z_{m2}/f'_m) + i\lambda(z_{m0} + z_{m2} - z_{m0}z_{m2}/f'_m) \quad (11)$$

调制因子:

$$C_m = \frac{a_{m-1}^2}{f'_m}(1 - \frac{z_{m2}^2}{f'_m}) + C_{m-1}\{1 - (z_{m0} + z_{m2} - \frac{z_{m0}z_{m2}}{f'_m})[\frac{2}{f'_m} + \frac{\lambda C_{m-1}}{w_{m-1}(z)}(1 - \frac{z_{m0}}{f'_m})]\} \quad (12)$$

等效焦距:

$$f'_m = \frac{[(a_{m-1}^2 - \frac{z_{m0}C_{m-1}}{k})^2 + (\frac{z_{m0}}{k})^2]^{2m-1}}{n_2L_{\text{eff}m}a_{m-1}^6A^2 \prod_{j=2}^m W_{m-j}^2}, \quad m-n \geq 0 \quad (13)$$

峰值传输距离:

$$z_{m2}^{\max} = \frac{W_{m-1}^2 + W_{m-1}\lambda C_{m-1}(f'_m - 2z_{m0}) - \lambda^2 z_{m0}(1 + C_{m-1}^2)(f'_m - z_{m0})}{W_{m-1}^2 + 2W_{m-1}\lambda C_{m-1}(f'_m - 2z_{m0}) + \lambda^2(1 + C_{m-1}^2)(f'_m - z_{m0})^2} f'_m \quad (14)$$

从上述公式来看,当确定了初始入射光束的束宽、入射功率以及各级传输距离后,根据(9)~(14)式即可获得各级出射光场的特性参数,同时也可得到不同排布情况对场特性的影响规律。

2 数值计算

为了避免由于介质的空间配置不合理所引起的任意位置处场强过高,从而影响场特性或导致破

坏光学元件的现象发生,分析了各级出射光场强度峰值点的位置,为合理设置非线性介质之间的摆放距离提供参考。下面针对由5片相对较薄的片状介质级联而成的光传输系统的场特性进行研究。

模拟中选取光束参数:波长 $\lambda = 1053 \text{ nm}$,光束束宽 $a_0 = 0.1 \text{ cm}$,入射功率的高斯光束 $P_0 = 2 \text{ GW/cm}^2$ 。非线性折射率 $n_2^I = 1.2 \times 10^{-13} \text{ esu}$,介质厚度 $L = 4 \text{ cm}$ 。模拟是在 4 cm^2 的区间内采样

1024×1024 点。

图2给出了不同入射功率下,高斯光束经过空间衍射和非线性介质传输后光强分布的解析解和模拟结果的对比。由图可看出:入射功率越小,解析解和数值解之间的近似程度越高。从图中还可以看出,当入射功率在 2 GW/cm^2 以内时,相对误差可以控制在1%以内。随着入射功率的增强,误差也越来越大,这是由于采用光学薄近似引起的误差所造成的。

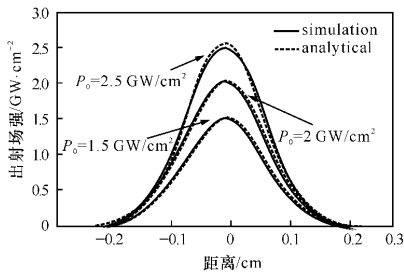


图2 $z_{10}=z_{12}=20\text{ cm}$ 时,第一片介质出射场振幅分布的解析解与数值结果的对比

Fig. 2 Contrast between analytical and numerical results of amplitude distribution in first medium emergent field when $z_{10}=z_{12}=20\text{ cm}$

图3给出了高斯光束经过薄的非线性级联介质传输后出射光场在传输极值处的振幅分布。可以看出,光束在空间衍射后又受到非线性作用影响而聚焦,每经过一级非线性介质,光束能量都得到了相应地提高。当光束通过第5片介质时,光场强度已经达到了 9 GW ,相当于入射光场强度的5倍,该片的B积分值达到了1.46,这对处于其附近的光学元件而言非常危险。因此,在高功率激光装置设计过程中,应特别注意避免这类情况的发生。

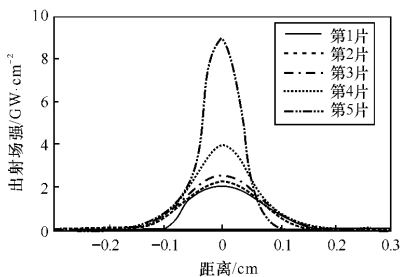
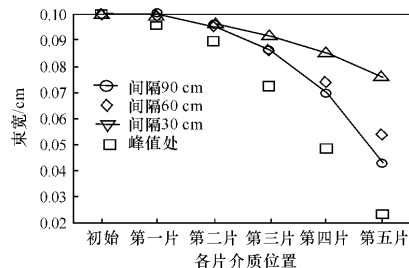


图3 $z_{10}=10\text{ cm}$ 时,介质置于各级峰值距离处的光场强度

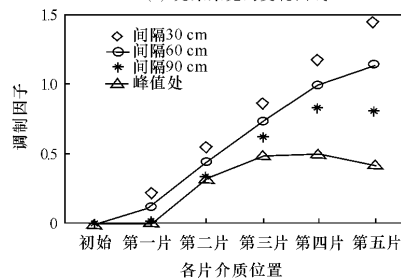
Fig. 3 Optical field intensity of medium located in peak point when $z_{10}=10\text{ cm}$

相应的变化。图4给出了几种不同情况下各个参量的变化曲线。一种是将介质放置于各级最大距离处进行传输,另一种是间距为 90 cm 、 60 cm 和 30 cm 的均匀排布情况。从图4来看,随着级联非线性介质片数的增加,光束的束宽逐渐减小,调制因子不断增大,非线性效应逐渐增强。在均匀配置中,按间隔 30 cm 排布元件,光束束宽的变化比较平稳,调制因子增大时趋于线性变化。但对排布间隔为 60 cm 和 90 cm 2种情况,光束特性的变化越来越趋近于峰值位置时相应参数的变化幅度,这对其附近的光学元件也是很危险的。

光强峰值与元件均匀间隔的变化关系如图5所示。从图中可以看出,每经过一片介质,光场强度就会有所增强,非线性效应也越来越显著。将介质放置于各片介质后表面光场峰值的位置进行传输时,光束经过第5片介质后的强度为 9 GW 。而采用均匀配置方案,当级联介质按照 30 cm 排布时,光束通过第5片介质后表面的峰值强度与入射光束强度相比变化不大,仅为 2.32 GW/cm^2 ,而该片的B积分也只有0.38,这确实降低了元件受损伤的风险。但从图中可以看出,并非所有均匀配置均能避免破坏的产生。当均匀排布间距为 90 cm 时,第5片介质后表面的光强达到了 4.13 GW/cm^2 ,约为



(a) 光束束宽的变化曲线



(b) 调制因子的变化曲线

图4 光束经过级联非线性介质时各参量的变化关系

Fig. 4 Relation of (a) beam width and (b) modulation factor when beam goes through cascade nonlinear medium

在介质不同的排布情况下,光场的特性也会有

入射强度的2倍,这种均匀配置情况也会对系统安全产生一定的影响。当级联介质增多时,元件受破坏的风险更大。

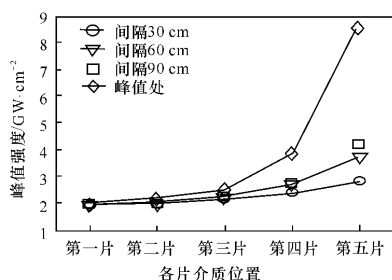


图5 光场峰值强度

Fig. 5 Peak intensity of optical field

3 结论

本文通过解析方法得到了高斯光束经级联非线性介质传输后任意位置处光束的振幅分布表达式,研究了光束峰值强度、峰值出现的位置以及束宽、调制因子等参数在不同配置情况下的变化规律,并进一步分析了级联非线性介质的排布方式与光场特性之间的关系。结果表明:将元件放置于各级的光强峰值处,会使出射场峰值强度达到入射场强的数倍,很可能导致元件损伤,所以在元件排布中要尽量错开光强峰值位置。若将元件按照均匀间隔排布,虽然可以避免光强峰值位置,但并非所有的均匀配置方案都能避免破坏的产生。将非线性元件排布间隔控制在合适的范围以内可以有效地避免后级元件损伤,故在高功率激光系统中要对元件位置进行有效地优化,以降低元件受损伤的风险。

参考文献:

[1] BESPANLOV V I, TANALOV V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids [J]. JETP Lett., 1966,3:471-476.

[2] SIMMONS W W, HUNT J T, WARREN W E. Light propagation through large laser systems[J]. IEEE J. Quant. Elec., 1981,17(9):1727-1743.

[3] Jr FLECK J A, MORRIS J R, BLISS E S. Small-scale self-focusing effects in a high power glass laser amplifier[J]. IEEE J. Quant. Elec., 1978, QE 14 (5): 353-363.

[4] 张科军,景峰,林晓东,等. 超高斯光束在片状放大器中传输的特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2000,12 (sup1): 175-178.

ZHANG Ke-jun, JING Feng, LIN Xiao-dong, et al. Characterizing super-Gaussian beams propagation in the amplifier of stacked-slabs[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000,12 (sup1):175-178. (in Chinese)

[5] HUNT J T, MANES K R, RENARD P A. Hot images from obscurations[J]. Appl. Opt., 1993, 32(30): 5973-5982.

[6] WILLIAMS W H, MANES K R, HUNT J T, et al. Modeling of self-focusing experiments by beam propagation codes [R]. Livermore CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1996.

[7] 谢良平,赵建林,栗敬钦,等. 位相调制产生“热像”效应理论研究[J]. 物理学报, 2004,53(7):2175-2179.

XIE Liang-ping, ZHAO Jian-lin, SU Jing-qin, et al. Theoretical analysis of hot image effect from phase scatterer [J]. Acta. Phys. Sin. 2004,53(7):2175-2179. (in Chinese)

[8] 景峰,张小民,朱启华,等. 钕玻璃介质中强激光束传输特性的初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2000,12 (5):551-555.

JING Feng, ZHANG Xiao-min, ZHU Qi-hua, et al. Study on characteristics of intense beam propagation in Nd³⁺doped glass media[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000,12(5): 551-555. (in Chinese)

[9] 薛冬,李国华,王伟,等. 柱坐标下光波场在垂直光轴方向的参考面上的复振幅表示[J]. 应用光学, 2003,24(3): 8-10.

XUE Dong, LI Guo-hua, WANG Wei, et al. The complex amplitude of light wave fields reference plane vertical to optical axis in circular cylindrical coordinates[J]. Journal of Applied Optics, 2003,24 (3):8-10. (in Chinese)

[10] 王仕璠. 信息光学理论与应用[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2004:85-89.

WANG Shi-fan. Information optics and application [M]. Beijing: Publishing House of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004: 85-89. (in Chinese)

[11] GOVIND P, AGRAWAL. Nonlinear fiber optics [M]. 3th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002:129-163.