

文章编号:1002-2082(2010)01-0164-05

高斯光束通过非线性折射和吸收介质的光强分布

王 龙, 沈学举, 韩玉东, 李 征

(军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要:以衍射理论为基础,推导并模拟了高斯光束通过非线性折射和吸收效应介质后的远场光强分布。结果表明:入射高斯光束引起的介质折射率变化和光束波前曲率影响介质出射面光束的径向调制相位,安装在焦点前的有自聚焦效应的介质和安装在焦点后的有自散焦效应的介质具有闪耀光栅的能力,使远场出现中心为暗斑外侧为亮环的衍射图样。非线性折射效应为主的介质,其非线性吸收效应的变化同时改变远场衍射图样的数目和光强值,但对于非线性吸收效应为主的介质,衍射图样的数目随吸收效应的变化不明显,吸收效应只影响光强值。

关键词:高斯光束;非线性折射;非线性吸收;径向调制相位

中图分类号:TN201;O437

文献标志码:A

Intensity distribution of Gaussian beam transmitting through medium with nonlinear refraction and absorption

WANG Long, SHEN Xue-ju, HAN Yu-dong, LI Zheng

(Department of Optics & Electron Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The far-field intensity distribution of Gaussian beam transmitting through medium with both nonlinear refraction and absorption was derived and simulated on the basis of diffraction theory. The simulation results show that both the refractive index change of the medium and the wave-front curvature caused by input Gaussian beam influence the radial modulation phase of the beam emitting from the medium exit surface, and that both the medium with self-focusing effect putting in front of the focal point and the medium with self-defocusing effect putting behind the focal point have the diffraction ability similar to blazed gratings which can form a diffraction pattern having a series of bright rings with dark spots in the center of them. If the nonlinear refraction of the media is great, nonlinear absorption affects both the distribution and the intensity of the rings; but if the nonlinear absorption is great, it only affects the intensity.

Key words: Gaussian beam; nonlinear refraction; nonlinear absorption; radial modulation phase

引言

光限幅器的种类虽然繁多,但都依赖于非线性折射、非线性吸收、非线性散射和相变中的一种或者几种^[1]。国内对限幅器的研究主要集中在对材料的应用基础研究方面,其中非线性折射和非线性吸

收材料由于有很好的应用前景,在理论和实验上得到了广泛的研究^[1-4]。光限幅器的研究虽有30多年的历史,但在实用化方面的研究仍处于初级阶段,仅具有一种机制的限幅器,很难达到实用要求。大量的理论和实验研究表明^[5-8],强高斯光束通过非

收稿日期:2009-06-30; 修回日期:2009-08-20

作者简介:王龙(1985—),男,山东蒙阴人,硕士研究生,主要从事激光防护与光电对抗研究工作。

E-mail: wanglong4800533@163.com

线性折射介质后,光强分布在远场成明暗相间的同心圆环,该现象被认为可以用于光限幅,但同时考虑材料非线性折射和吸收效应对光强分布影响的研究少见报道,而这对于设计同时利用材料不同非线性效应的光限幅器有一定的参考价值。

本文以衍射理论为基础,求得了高斯光束通过非线性折射和吸收效应介质后的远场光强表达式,数值模拟并分析了入射激光功率、非线性介质安装位置和非线性吸收效应对光强分布的影响。

1 高斯光束通过非线性折射和吸收效应介质后的光强表达式

设基模高斯光束沿Z轴传播通过非线性介质,束腰取为坐标原点,介质位于z处,r是光束横截面上的径向坐标,则介质入射面的光场分布为

$$E(r, z) = E(0, 0) \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)} + \frac{ikr^2}{2R(z)} + i\theta(z)\right] \quad (1)$$

式中:k是真空中波数; ω_0 是高斯光束的束腰半径; $\theta(z)$ 为与径向无关的所有相位; $z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$ 是高斯光束的共焦参数; $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1+z^2/z_0^2}$ 是z截面处的光束半径; $R(z) = z(1+z_0^2/z^2)$ 。设 γ 是材料的非线性折射系数, α, β 分别是材料的线性和非线性吸收系数,可以求得介质出射面处的电场分布^[9]:

$$E_e(r, z) = E(r, z) e^{-\alpha L/2} \exp[i\Delta\varphi(r, z)] [1+q(r, z)]^{-1/2} \quad (2)$$

式中:

$$\Delta\varphi(r, z) = \Delta\theta_0 / (2\Delta\theta_0) \ln[1+q(r, z)],$$

$$q(r, z) = 2\Delta\theta_0 \omega_0^2 / \omega^2(z) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right) \quad (3)$$

式中: $\Delta\varphi_0 = k\gamma I_0 L_{\text{eff}}/2$ 和 $\Delta\theta_0 = \beta I_0 L_{\text{eff}}/2$ 分别是介质位于束腰位置时的峰值非线性折射和峰值非线性吸收相移; $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$ 是介质在考虑线性吸收效应时的有效厚度。由非线性介质出射面光场分布的圆对称特性知,经过自由空间传输后的衍射光场也呈圆对称分布^[10]。介质出射面和接收屏均用极坐标表示,设介质上任意点P的坐标为(r, φ),因为接收屏上半径相同的点有相同的光场分布,取坐标为(ρ, 0)的Q点进行计算,根据夫琅和费衍射公式得Q点复振幅:

$$E_Q = \frac{\exp(ikD)}{i\lambda D} \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2D}\right) \int_0^\infty \int_0^{2\pi} E_e(r, z) \cdot \exp\left(-\frac{ik\rho r \cos\theta}{D}\right) r dr d\varphi \quad (4)$$

利用贝塞尔函数 $J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(ix \cos\theta) d\theta$ 的定义及其偶函数性质可将(4)式化简为

$$E_Q = \frac{\exp(ikD)}{i\lambda D} \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2D}\right) \int_0^\infty 2\pi k J_0(k\rho r/D) \cdot E_e(r, z) r dr \quad (5)$$

对于高斯光束,当 $r = \sqrt{5} \omega(z_1)$ 时,振幅因子 $\exp[-r^2/\omega^2(z_1)]$ 趋于0,于是上式变为

$$E_Q = \frac{2\pi C}{\lambda D} \int_0^{\sqrt{5}\omega(z_1)} J_0(k\rho r/D) \cdot E_e(r, z) r dr \quad (6)$$

式中:C是模为1的复常数,D为接收屏与非线性介质的距离。

将(4)式代入 $I = \frac{1}{2} n c \epsilon_0 E^2$ 并与高斯光束束腰位置处的光强关系 $I(0, 0) = 2p_i / (\pi\omega_0^2)$ 联立,可得接收屏上半径为ρ的圆周上点的光强:

$$I(z, p_i, \rho) = p_i \frac{8\pi \exp(-\alpha L)}{\omega^2(z) \lambda^2 D^2} \left| \int_0^{\sqrt{5}\omega(z)} J_0(k_0 n_0 \rho r/D) \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] [1+q(r, z)]^{-1/2} \exp\left[i\frac{kr^2}{2R(z)} + i\Delta\varphi(r, z)\right] r dr \right|^2 \quad (7)$$

当 $\beta=0$ 时,对(3)式求极限得:

$$q(r, z) = 0$$

$$\Delta\varphi(r, z) = \Delta\varphi_0 \frac{\omega_0^2}{\omega^2(z)} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right) \quad (8)$$

根据(3)式和(7)式即可以计算出不同功率照射到非线性介质时的远场光强分布。

2 远场光强分布的数值模拟与分析

取高斯光束波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, $\omega_0 = 20 \text{ } \mu\text{m}$, $z = 1.2 \text{ mm}$, $n_0 = 1.0$, $\gamma = 1.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{W}$, $\beta = 3.1 \times$

10^{-5} m/W ,对远场距离 $D = 1.0 \text{ m}$ 进行数值模拟。

2.1 入射功率对光强分布的影响分析

分别取入射光束功率 $p_i = 1, 20, 50 \text{ mW}$,由(3)式和(7)式计算出不同功率激光入射,接收屏上的光强分布如图1(a)~1(c)所示。可以看出,小功率激光入射时,介质的非线性效应很弱,对光束传输的影响可以忽略,远场光强基本呈高斯分布;入射激光功率增大使介质的非线性效应显现,远场光强分布范围变大,如图1(b)所示;入射功率继续增大,使出射光束的衍射能力进一步增强,接收屏上

出现次级衍射亮环,如图1(c)所示。对照图1(b)和图1(c)发现,接收屏中心附近光强并非随着入射功率的增加持续变大,次级亮环的生成可以显著减小亮斑的强度。

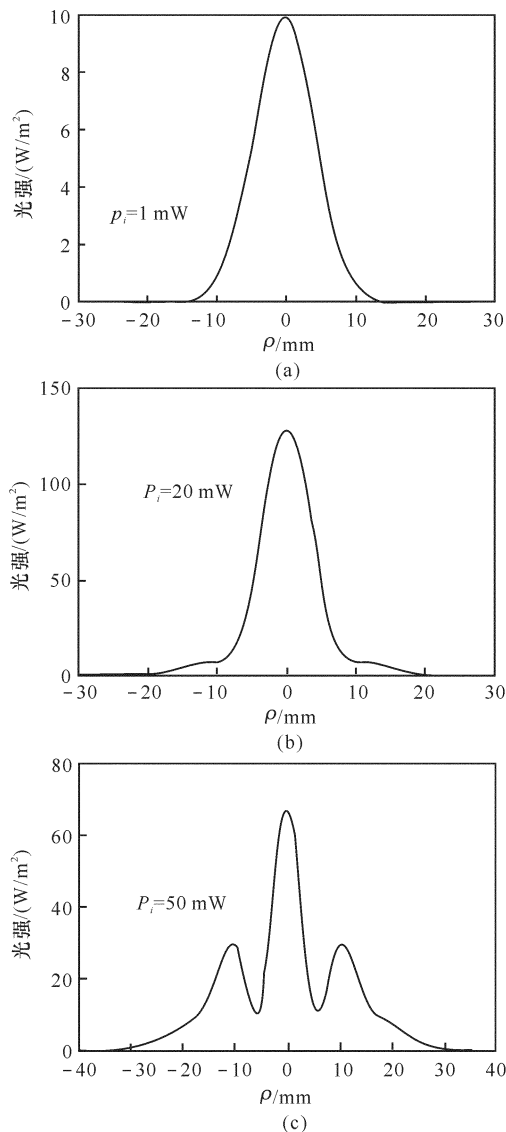


图1 不同功率激光入射时接收屏上的光强分布
Fig. 1 Intensity distribution on receiving screen as incidence of laser with different power

2.2 介质安装位置对光强分布的影响分析

取 $\gamma = \pm 1.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{W}$, $\beta = 3.1 \times 10^{-5} \text{ m/W}$, $p_i = 500 \text{ mW}$, $z = \pm 4.7 \text{ mm}$, 由(7)式计算不同情况下接收屏上的光强分布,如图2(a)和2(b)所示。分析看出,介质的安装位置对接收屏上的光强分布影响很大,发散的高斯光束通过有自聚焦效应的介质以及会聚的高斯光束通过有自散焦效应的介质(图2(a))时,远场出现中心强度最大、向外围逐渐减弱、分布尺度较小的细衍射环;会聚的高斯光束通

过有自聚焦效应的介质以及发散的高斯光束通过有自散焦效应的介质(图(b))时,远场出现中央较暗、向外围逐渐增强、分布尺度较大的粗衍射环。

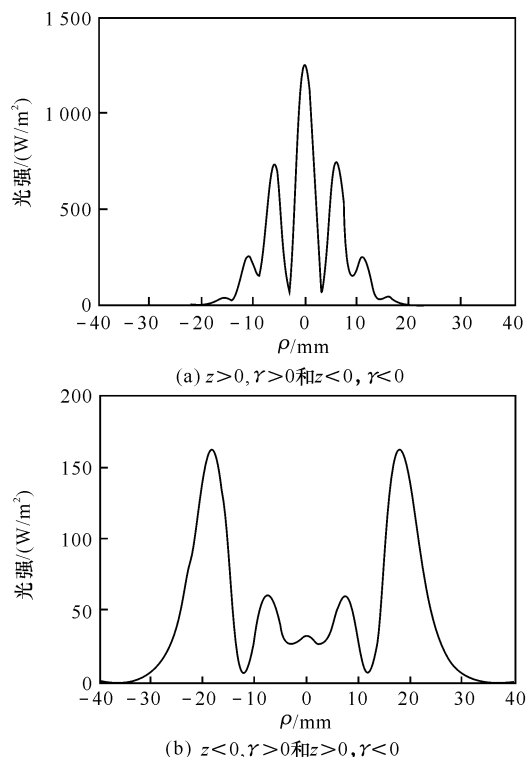
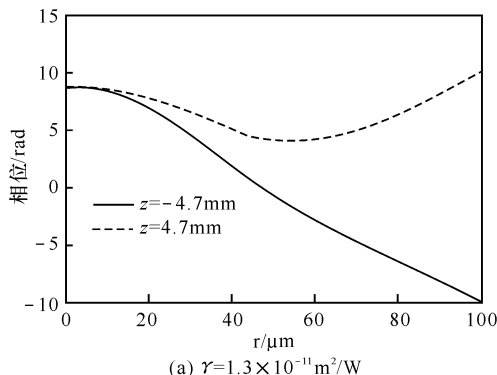


图2 非线性介质不同安装位置时光阑平面上的光强分布

Fig. 2 Intensity distribution on diaphragm plane when medium position is different

把出射高斯光束沿径向等间隔分成100个周期,作出相位的径向分布,如图3所示。

由图3可看出,高功率激光照射时,会聚高斯光束通过有自聚焦效应的非线性介质和发散高斯光束通过有自散焦效应的介质时,介质出射面的相位在径向上近似线性单调变化(图3实线所示),这种相位分布使非线性介质具有闪耀光栅的功能,因此,接收屏中心为暗斑,光强分布到偏离中心的圆环上;在另外的两种情况下,如图3中虚线所示,非



(a) $\gamma = 1.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{W}$

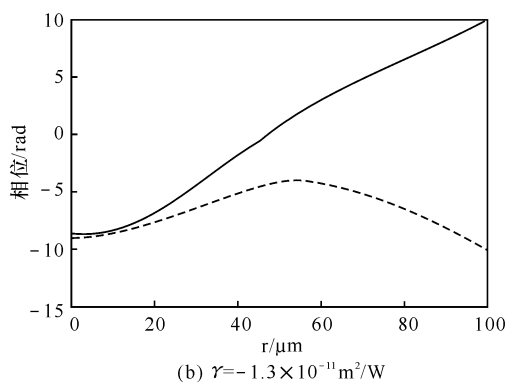


图3 不同非线性介质的径向相位分布
Fig. 3 Radial phase distribution of different nonlinear media

线性介质无闪耀能力,接收屏中心光强最大,光强沿径向衰减震荡。

2.3 非线性吸收效应对光强分布的影响分析

定义 $K = \Delta\theta_0 / \Delta\phi_0 = \beta / (2k\gamma)$, K 的取值可被用来描述介质非线性吸收效应的强弱。取 $\gamma = 1.3 \times 10^{-11} m^2/W$, $z = -4.7 mm$, $w_0 = 20 \mu m$, $K = 0.2, 0.5, 1, 2$ 和 5 , 在 $500 mW$ 功率照射下,根据(7)式计算出远场接收屏上的光强分布,如图4所示。

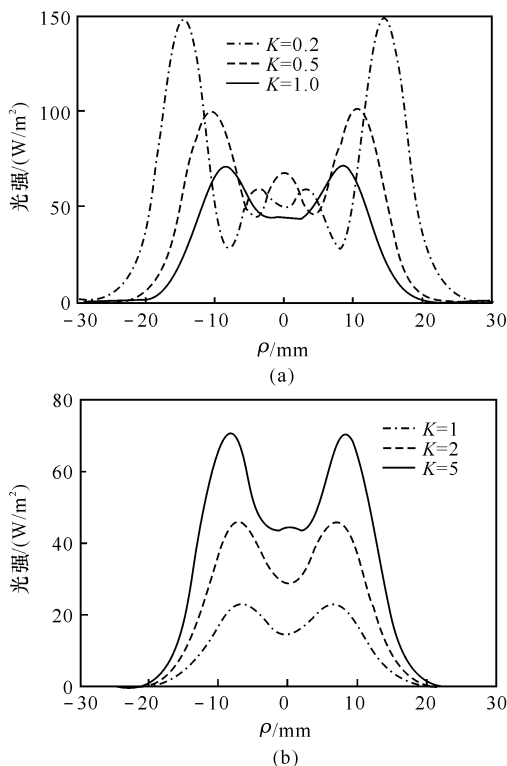


图4 不同非线性效应下光阑平面上的光强分布
Fig. 4 Intensity distribution on diaphragm plane with different nonlinear absorption

可以看出,当 $K < 1$ 时,非线性介质以非线性折射效应为主,非线性吸收效应一方面体现出对入

射激光能量的吸收作用,接收屏上的激光总能量随 K 值的增加显著减小;同时非线性吸收效应对非线性折射效应有较强的抑制作用,非线性吸收效应的增强使接收屏上能量的分布范围明显减小,衍射条纹数目减少,这是非线性折射效应被抑制导致光束的衍射能力变弱引起的。 $K > 1$ 时,非线性介质主要表现为非线性吸收效应, K 值的增加对接收屏上光强分布范围和衍射条纹数目影响不明显,但是使接收屏上每一位置的光强显著减小。

3 结论

以衍射理论为基础,推导了高斯光束通过同时具有非线性折射和非线性吸收效应介质后的远场光强分布表达式,分析了入射激光功率、介质安装位置和非线性吸收效应对光强分布的影响。结果表明,介质在大功率的高斯光束照射时,非线性效应和光束的曲率半径共同使其产生沿径向的附加相位,安装在焦点前的自聚焦介质和安装在焦点后的自散焦介质具有闪耀光栅的能力,远场形成中央较暗、向外围逐渐增强、分布尺度较大的粗衍射环。非线性折射效应为主时,远场衍射图样的光强值和径向相对光强分布随非线性吸收效应的增强明显改变;非线性吸收效应为主时,吸收效应只改变衍射图样的光强值,对径向相对光强分布无显著影响。

参考文献:

[1] 顾玉宗,干福熹. 被动光学限幅器的机制与研究进展[J]. 物理,2002,31(1):17-21.
GU Yu-zong, GAN Fu-xi. Mechanisms and advances of passive optical limiters [J]. Physics, 2002, 31(1): 17-21. (in Chinese with an English abstract)

[2] 梁志坚,干福熹,余保龙,等. 酞菁掺杂有机改性溶胶-凝胶材料 Z-扫描研究[J]. 中国激光,2000,27(5): 419-422.
LIANG Zhi-jian, GAN Fu-xi, YU Bao-long, et al. Nonlinear optical properties of phthalocyanine-doped organically modified sol gels [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(5): 419-422. (in Chinese with an English abstract)

[3] 余大斌,孙晓泉,王自荣. 光限幅材料的研究现状及其在激光防护中的应用[J]. 激光技术,1999,23(5): 222-226.
YU Da-bin, SUN Xiao-quan, WANG Zi-rong. The present research of optical limiting materials and their application to laser radiation protection [J].

- Laser Technology, 1999, 23 (5): 222-226. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 顾玉宗,梁志坚,干福熹.一种可见光波段光学限幅器的研究[J].中国激光,2002,29(1):33-36.
GU Yu-zong, LIANG Zhi-jian, GAN Fu-xi. An optical limiter for visible light of lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(1): 33-36. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 马再如,冯国英,陈建国,等.克尔效应对高斯光束聚焦特性的影响[J].光子学报,2006,35(7):997-1000.
MA Zai-ru, FENG Guo-ying, CHEN Jian-guo, et al. Influence of the Kerr effect on the focusing property of the Gaussian beam[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(7): 997-1000. (in Chinese with an English abstract)
- [6] CALLEN W R, HUTH B G, PANTELL R H. Optical patterns thermally self-defocused light [J]. Appl. Letts., 1967, 11(3): 103-105.
- [7] 郭平,孙寅官.高斯光束通过非线性介质层的限幅效[J].光学学报,1990,10(12):1091-1095.
GUO Ping, SUN Yin-guan. The amplitude-limiting effect of Gaussian beam transmitted through nonlinear medium [J]. Acta Optica Sinica, 1990, 10 (12): 1091-1095. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 何坤娜,邓罗根.高斯光束通过非线性介质后的远场衍射图样的研究[J].强激光与粒子束,2003,15(10): 940-944.
HE Kun-na, DENG Luo-gen. Far-field diffraction patterns formation of Gaussian beam transmitted through thin nonlinear medium [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(10): 940-944. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 周铁中,邓罗根.强非线性吸收下高斯光束Z-扫描衍射理论模型[J].强激光与粒子束,2004,16(6):721-725.
ZHOU Tie-zhong, DENG Luo-gen. Gaussian beam Z-scan diffraction theory model for the strong nonlinear absorption material[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16 (6): 721-725. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 姚保利,任立勇,侯洵.基于衍射模型的Z-扫描理论[J].光学学报,2002,22(1):19-23.
YAO Bao-li, REN Li-yong, HOU Xun. A new Z-scan theory based on diffraction model [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(1): 19-23. (in Chinese with an English abstract)

(上接第163页)

参考文献:

- [1] MCDOWALL P D, ANDERSEN M F. Acousto-optic modulator based frequency stabilized diode laser system for atom trapping [J]. Review of Science Instruments, 2009(80): 053101.
- [2] ENGAN H E. Acousto-optic coupling in optical fibers [J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2000, 1: 625-629.
- [3] 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京:科学出版社,1982.
- XU Jie-ping. The principle design and application of acousto-optic devices [M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese)
- [4] 石顺祥,张海兴,刘劲松.物理光学与应用光学[M].西安:西安电子科技大学出版社,2000.
SHI Shun-xiang, ZHANG Hai-xing, LIU Jin-song. Physical optics and applied optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000. (in Chinese)