

文章编号: 0258-7025(2002)07-0613-03

圆对称高斯光束在吸收克尔介质中的 稳态自聚焦行为

张科军^{1,2}, 林晓东¹, 景 峰², 李大义¹, 陈建国¹

(¹ 四川大学光电系, 四川成都 610064; ² 中国工程物理研究院高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 四川绵阳 621900)

提要 由光束在吸收克尔介质中传输的非线性近轴波方程, 推导出具有二次相位分布的圆对称高斯光束在线性吸收介质中的耦合传输方程以及光束束腰的演化方程。数值计算的方法证实了光束束腰变化的几种可能, 分析了稳态自聚焦的阈值特性。在给定参数的情况下, 得到了稳态自聚焦的阈值入射光强和阈值聚焦长度。

关键词 圆对称高斯光束, 吸收克尔介质, 稳态自聚焦, 光束束腰

中图分类号 O 437.5 文献标识码 A

Specify Steady-state Self-focusing Behaviors of Circular Gaussian Beamstravelling inside Absorptive Keer Medium

ZHANG Ke-jun^{1,2}, LIN Xiao-dong¹, JING Feng², LI Da-yi¹, CHEN Jian-guo¹

(¹ Optoelectronics Department, Sichuan University, Chengdu, 610064)
(² National Key Laboratory of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900)

Abstract Equations describing circular Gaussian beams (CGB) propagating inside the absorptive Keer medium have been derived from nonlinear paraxial equation. Based on these equations, an evolution equation of the beam waist has been obtained. The evolution equation indicates that, depending on the beam and material parameters, the circular Gaussian beams may be convergent or divergent when travelling inside the nonlinear medium. There is a special threshold beam whose waist approaches zero at the point where the self-focusing can just compensate for the diffraction. After solving the evolution equation, the threshold intensity and threshold focal length of the threshold beam have also been specified.

Key words circular Gaussian beam (CGB), absorptive Kerr medium, steady-state self-focusing, beam waist

1 引 言

三阶非线性相互作用最普遍的表现之一是引起与强度有关的非线性折射率, 从而引发许多非线性光学效应, 例如激光束的自聚焦、自散焦、自弯曲^[1-6]、各类空间孤子^[7,8]等。本文则对强激光在克尔损耗介质中传输的稳态自聚焦行为进行讨论。在初级近似下, 可以认为非线性介电常数 $\epsilon_{nl} \propto I$, 而介质的吸收是线性的。在本文中, 我们对具有二次位相分布的圆对称高斯光束在线性吸收介质中的

传输行为进行了研究。

本文从克尔介质中光传输的非线性近轴波方程出发, 推导了具有二次位相分布的圆对称高斯光束的耦合传输方程, 首次抓住“束腰”这个特征参量进行研究, 通过其在传输过程中的变化而得出光束的传输行为, 在此基础上讨论了有吸收损耗存在时, 那种刚好能在非线性介质中汇聚成点的阈值光束的重要参量, 得出了稳态自聚焦的阈值入射光强、阈值聚焦长度等新结果。

收稿日期 2001-04-10; 收到修改稿日期 2002-03-11

基金项目 国防科技重点实验室基金资助。

作者简介 张科军(1973—)男, 湖北荆门人, 硕士, 1998年就读于四川大学光电系, 主要从事激光和光通信方面的研究。

E-mail: zhang-kejun@163.net

2 基本方程

2.1 光束在损耗介质中传输的非线性耦合方程

当光束在损耗介质中沿 z 方向传输时,场 A 满足非线性近轴波方程^[3]

$$i2k_0(\partial A/\partial z + \alpha A/2) + \nabla_{\perp}^2 A = -2k_0(\delta n/n_0)A \quad (1)$$

这里 $k_0 = n_0 2\pi/\lambda$ 为波数, α 为介质的损耗系数, n_0 为介质的背景折射率, δn 为非线性效应引起的介质折射率的变化量, $\nabla_{\perp}^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ 。对于圆对称光束, 可令

$$A = u(r, z, t) \exp[ik_0 S(r, z, t)] \quad (2)$$

其中 $u(r, z, t)$ 为正数, $s(r, z, t)$ 为实数, s 是程函, 与相位变化有关, (x, y) 代表光束剖面的坐标, t 为脉冲坐标系的时间。将(2)代入(1), 分离虚部和实部后可得到两个耦合的非线性方程

$$2\partial S/\partial z + (\partial S/\partial r)^2 = (1/k_0^2 I^{1/2}) \{ \partial^2 I^{1/2}/\partial r^2 + r^{-1} \partial I^{1/2}/\partial r \} + 2n_2 I/n_0 \quad (3)$$

$$\partial I/\partial z + (\partial S/\partial r) \partial I/\partial z + \{ \partial^2 S/\partial r^2 \} + (1/r) \partial S/\partial r = -I/L_a \quad (4)$$

其中, 已用衰减长度 $L_a = 1/\alpha$ 来表征吸收损耗, 对克尔介质, $\delta n \sim n_2 I$, 其中 $I = |A|^2 = u^2$, n_2 为非线性折射率系数。

2.2 在吸收克尔介质中传输的圆对称高斯光束束腰的演化方程

假设光强为高斯分布, 程函是横向坐标的二次函数, 即

$$k(r, z) = I_0(z) \exp[-r^2/b^2(z)], \quad S = a(z)r^2 \quad (5)$$

式中 $b(z)$ 为光束束腰, $a(z)$ 为波数啁啾系数, 在这种自相似解的假定下, 将尝试解代入(3)(4)式, 可得到(将指数函数展为二次)

$$2r^2 \frac{da}{dz} + 4a^2 r^2 = -\frac{2}{k^2 b^2} + \frac{r^2}{k_0^2 b^4} + \frac{2n_2 I_0}{n_0} - \frac{2n_2 I_0 r^2}{n_0 b^2} \quad (6)$$

$$\frac{dI_0}{dz} + \frac{2I_0}{b^3} \frac{db}{dz} r^2 - \frac{4aI_0}{b^2} r^2 + 4aI_0 = -\frac{I_0}{L_a} \quad (7)$$

因 r 是任意的, 比较 r 的各次幂的系数, 可得四个耦合方程, 联立求解并引入无量纲光束束腰 $f = b/b_0$, 可得

$$f^3 \frac{df}{dz} = 1/L_d^2 - (1/R_{nl}^2) \exp(-z/L_a) \quad (8)$$

式中

$$L_d = k_0 b_0^2 \quad (9a)$$

$$R_{nl}^2 = n_0 b_0^2 / 2n_2 I_{in} = n_0 L_d / 2n_2 k_0 I_{in} \quad (9b)$$

其中 b_0 为入射高斯光束束腰。以上式子中, L_d 表征光束的衍射长度, R_{nl} 是由几何光学方法近似得到的以束腰入射的光束在无损耗非线性介质中的自聚焦长度。

3 光束束腰的演化行为

我们对(8)式进行数值求解, 查看不同光强下, 光束束腰的演化趋势。假设初始光束以束腰入射, 则有边界条件

$$f(0) = 1, \quad f'(0) = 0 \quad (10)$$

其中 f' 是 f 的一阶导数。

令 $\lambda = 1.05 \mu\text{m}$, 高斯光束的初始入射束腰 $b_0 = 1 \text{ mm}$, 介质的折射率 $n_0 = 1.52$, 非线性折射率系数 $n_2 = 3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{GW}$, 损耗系数 $\alpha = 0.02/\text{cm}$ 。图1中, 我们画出了入射光强 I_{in} 分别为(a) $3.12 \times 10^{-2} \text{ GW/cm}^2$ (b) $3.14 \times 10^{-2} \text{ GW/cm}^2$ (c) $3.3 \times 10^{-2} \text{ GW/cm}^2$ 时, $f(z)$ 的变化趋势。

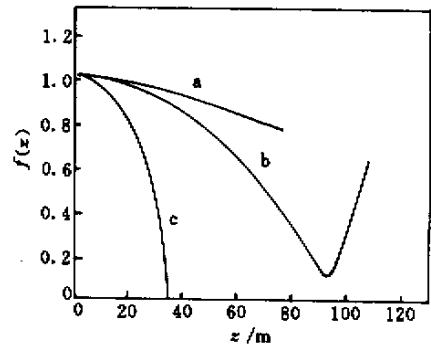


图1 光束束腰的演化曲线

Fig.1 Evolution of the beam waist

对于 $n_2 > 0$ 的损耗介质(8)式右端第一项代表衍射, 第二项代表非线性自聚焦效应和损耗作用的影响。由于我们关心的是聚焦问题, 因而讨论的情况应是: 在 $z = 0$ 时(8)式右边为负。否则, 一开始衍射就起主导作用, 光束不会聚焦。同时, 由(8)式可知, 入射光强应满足

$$I_{in} \geq n_0 (2n_2 k_0^2 b_0^2) \quad (11)$$

令(8)式右端等于零, 可得到一个特征值 z_0

$$z_0 = 2L_a \ln(L_d/R_{nl}) = L_a \ln(2n_2 k_0 L_d I_{in}/n_0) \quad (12)$$

由于在 $z > z_0$ 的区域(8)式右端为正, 衍射作用大

于非线性自聚焦作用。由此可以推断:如果光束在非线性介质中汇聚成点的话,那么收缩成点的地方应满足 $z < z_0$,如图 1 中的曲线 c。若光束在 z_0 处还未汇聚成点,那么,它在介质中是不会汇聚成点的,即 $f(z)$ 不会下降为零。在这种情况下,光束在非线性介质内一开始收缩,在收缩到一个极小值 $f(z)_{\min}$ 后又开始扩大。图 1 中的 a、b 曲线所示的就是这种情况。看来,也应该存在着区分上述两种情况的一种“阈值”光束,它刚好在 z_0 处收缩成点。

4 稳态自聚焦的阈值特性

总体上说来 (8) 式的解可以分为三种类型:一类在 z 等于某个正值 z_f 处, f 趋于 0, 这对应光束的汇聚成点。另一类是在 $z > 0$ 的区域, f 永不取零值,此外还存在着介于两者之间的阈值光束,它刚好在 z_0 处汇聚成点。由上面的分析可知,稳态自聚焦的聚焦长度 z_f 必然小于或等于由 (5) 式定义的特征长度 z_0 。

下面,我们把阈值光束的聚焦长度称为阈值聚焦长度,对应的入射光强称之为阈值入射光强。由 (12) 式可以看出,稳态自聚焦的阈值聚焦长度由光束的衍射长度 L_d 、衰减长度 L_a 、非线性折射率 n_2 以及入射光强 I_{in} 决定。

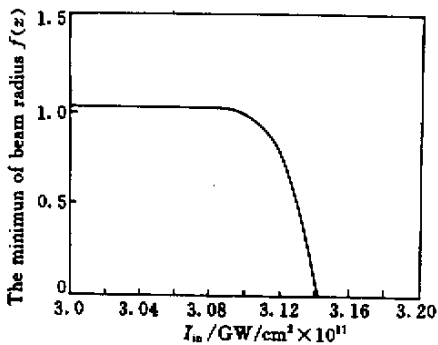


图 2 入射光强与束腰极小值之间的关系曲线

Fig. 2 Curver of $I_{in} \sim f(z)_{\min}$

我们知道,光束的束腰变化反映了光束在传输过程中的演化情况。而束腰的极小值 $f(z)_{\min}$ 则反映了光束的收缩情况。图 2 中,我们作出了入射光强 I_{in} 与 $f(z)_{\min}$ 的关系曲线,参数与图 1 相同。从图 2 可见,在入射光强较小的情况下, $f(z)_{\min} = 1$; 当入射光强增加到一定值时, $f(z)_{\min}$ 值小于 1 并随着光强的上升而迅速下降,这表明光强增加到一定程度后,

非线性自聚焦效应开始起作用,因而光束在 $z < z_0$ 区域中,光束要先经历一个缩小的过程,当 $f(z)_{\min}$ 为零时,对应的就是光束刚好在 z_0 处汇聚成点的阈值情况。对于我们所使用的参数,计算表明,对应的阈值入射光强 $(I_{in})_{th} \approx 3.145 \times 10^{-2} \text{ GW/cm}^2$, 对应的阈值聚焦长度 $(z_f)_{th} \approx 95 \text{ m}$ 。

5 结 论

我们研究了具有二次位相因子的圆对称高斯光束在线性吸收介质中的传输演化行为,导出了光束束腰的演化方程。用数值计算的方法,模拟了在不同入射光强下,光束束腰的几种典型的演化行为。在对阈值光束作了定义以后,对它的阈值特性作了研究。研究表明,光束稳态自聚焦的阈值聚焦长度与光束的衍射长度 L_d 、衰减长度 L_a 以及入射光强 I_{in} 等参量有密切的关系。我们在给定参数的情况下作出了入射光强 I_{in} 与光束束腰的极小值 $f(z)_{\min}$ 的关系曲线,得到了阈值入射光强和阈值聚焦长度的值等新结果。

参 考 文 献

- 1 Y. R. Shen. The Principles of Nonlinear Optics [M]. New York : John Wiley & Sons , Inc . , 1984 . Chapt. 17
- 2 R. W. Boyd. Nonlinear Optics [M]. New York : Academic Press . Inc , 1992
- 3 Jing Feng , Zhang Xiaomin , Zhu Qihua *et al.* . Study on characteristics of intense beam propagation in Nd^{3+} doped glass media [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束) , 2000 , **12** (5) : 551 ~ 555 (in Chinese)
- 4 J. A. Fleck , J. R. Mirrors , E. S. Bliss *et al.* . Small-scale self-focusing effects in a high power glass laser amplifier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.* , 1978 , **QE-14** (5) : 353 ~ 363
- 5 Wen Shuangchun , Fan Dianyuan . Small-scale self-focusing of intense laser beams in nonlinear media with loss [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光) , 2000 , **B9** (4) : 356 ~ 360 (in English)
- 6 Feit Fleck . Beam nonparaxiality , filament formation , and beam breakup in the self-focusing of optical beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. B* , 1988 , **5** (3) : 633 ~ 640
- 7 Tang Yonglin , Chen Jianguo , Li Dayi *et al.* . Specify Gaussian beams propagating in LSNM [J]. *J. Mod. Opt.* , 1999 , **46** (8) : 1177 ~ 1183
- 8 Li Dayi , Tang Yonglin , Chen Jianguo *et al.* . Impacts of logarithmically saturable nonlinear media on Gaussian beams [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光) , 2000 , **A27** (4) : 343 ~ 347 (in Chinese)