

克尔效应对高斯光束质量 M^2 因子的影响及抑制*

马再如¹ 冯国英¹ 陈建国¹ 赵华君¹ 李小东¹ 王绍朋¹ 朱启华²

(1 四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(2 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘 要 用分步傅里叶方法计算了高斯光束在克尔介质中的传输过程, 采用最小均方根办法对光场进行二项式曲线拟合得到光束质量因子, 计算结果表明: 当 B 积分在 2rad 以内, 克尔效应越强则它对因子影响越大; 同时, 它的这种影响能力也受到光束宽度和光束腰平面到克尔介质的距离的两个因素的影响, 即光束越宽, 影响越小, 距离越大, 影响反而较小; 最后, 基于 B 积分的可叠加性, 提出用具有负非线性折射率系数的非线性介质来补偿正克尔效应、降低光束因子, 并指出两端补偿是最优的方式之一。

关键词 非线性光学; 光束质量 M^2 因子; 克尔效应; 非线性补偿

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

0 引言

随着激光技术的深入发展和广泛应用, 光束质量问题得到了越来越多的关注, 自 Sigeman 建议以光束质量因子 M^2 (以下简称 M^2 因子) 作为评价光束质量参量以来^[1], 由于其能够将光束宽度和其远场发散角联系起来, 作为光束可用性标准, 得到了广泛的接受和应用^[2~5]. 对于形状复杂的光束, 常采用光强二阶矩来定义光束的宽度^[3~5].

在光束的传输放大过程中, 很多因素会劣化光束质量^[4~6]. 如在高功率激光领域中, 克尔效应是常见的非线性效应之一, 它是由介质的折射率随光强的变化引起的. 通常它引起的非线性位相延迟并会叠加在传输光束的波前, 导致光束的波前畸变, 使强激光束产生自聚焦和自散焦等现象^[7~9]. 同样, 它对传输光束的 M^2 因子有重要的影响, 文献[2]从理论上对全光束自聚焦现象的 M^2 因子进行分析, 得出该种情况下 M^2 因子能够小于 1 的结论; 文献[10]从实验上证明了自聚焦破坏情况下的 M^2 因子能够小于 1 的结论; 而实际激光在传播放大过程中的非线性相位延迟一般较小, 因此研究克尔效应在这种情况下对 M^2 因子有何影响就有必要, 迄今为止, 笔者鲜见有克尔效应对 M^2 因子影响的研究.

本文用 B 积分来表示光束在克尔介质中经历的最大非线性位相延迟, 它可以表征克尔效应的强弱, 使用傅里叶分步积分的方法来研究光束在克尔介质中的非线性传输放大行为, 定义光强的二阶矩

为光束的宽度, 用最小二乘法来拟合光束宽度方程, 对不同参量的高斯光束, 研究克尔效应对 M^2 因子的影响; 并提出在两端对 B 积分进行非线性补偿的方法, 来提高输出激光光束质量.

1 光束传输方程和光束质量因子 M^2 的确定

光束质量因子 M^2 为

$$M^2 = \frac{w \times \theta}{w_0 \times \theta_0} \quad (1)$$

式中, w 为实际光束的束腰半径, w_0 为基模高斯光束的束腰宽度, θ 为实际光束的远场发散角, θ_0 为基模高斯光束的远场发散角, 一般情况下, M^2 因子大于 1.

激光束在非线性克尔介质中传输时, 可以用非线性薛定谔方程来描述其行为^[11]

$$\nabla_{\perp}^2 E + 2ik \frac{\partial E}{\partial z} + \frac{2\gamma I}{n_0} k^2 E = 0 \quad (2)$$

式中 $\nabla_{\perp}^2 = \nabla_x^2 + \nabla_y^2$; k 是真空中波数; γ 为介质的非线性折射率系数. 等号左边第一项表示光束的衍射; 第二项表示光束沿 z 轴传输; 第三项表示非线性效应, 若 γ 大于 0, 则为本文所指的正克尔效应, 若 γ 小于 0, 则为负克尔效应; E 为入射的高斯光束, 可表示为

$$E(x) = \sqrt{I_0} \exp[-(x/w_0)^2] \quad (3)$$

式中 I_0 为入射光强峰值; w_0 为光束宽度. 克尔效应带来的非线性位相延迟^[7]为

$$B(x, l) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l \gamma I(x, z) dz \quad (4)$$

式中 λ 为波长, l 为非线性介质的长度. 研究非线性效应时, 通常采用 B 积分来表征峰值非线性位相延迟, 可见, 它可以用来描述克尔效应的强弱. 为方

* 中国工程物理研究院-国家自然科学基金委联合基金资助课题(10176019)

Tel: 028-85405373 Email: zairu-sima@163.com

收稿日期: 2005-01-19

便描述,用 $T(v)$ 来表示介质的传输放大函数, v 为角谱理论中光束的空间频率,得到光束从介质出射的频谱分布为

$$E_{\text{out}}(v, l) = E_{\text{in}}(v, 0) T(v) \quad (5)$$

对式(5)进行逆傅里叶变换,就可以得到出射光束 $E(x, l)$, 利用夫琅和费衍射公式,可以得到它在远场 z 处的场分布

$$E_z(x, z) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[ik\frac{x^2}{2z}\right] F\{E_{\text{out}}(x, l)\} \quad (6)$$

F 为傅里叶变换符号,通过它就可以求得光强分布;在测量 M^2 因子的实验中,就是通过多次测量它的分布,利用最小二乘法对多个光场分布图样进行二次曲线拟合而得到的。

本文用 4σ 方法计算克尔效应对光束质量因子 M^2 的影响,利用二阶矩求得式(6)的有效宽度,得到了沿 z 轴变化的一组束宽数据,用最小二乘法对式(7)进行二项式拟合^[12]

$$w_z^2 = A + Bz + Cz^2 \quad (7)$$

则 $w_0^2 = A - \frac{B^2}{4C}$; $z_r = \frac{w_0^2}{\sqrt{C}}$; $\theta = \sqrt{C}$; 这样就可以求得光束质量因子

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{AC - \frac{B^2}{4}} \quad (8)$$

一般而言,式(2)没有解析解,但可以使用分步傅里叶方法^[13]求它的数值解,然后解以上各式,分析克尔效应对 M^2 因子的影响。

2 计算结果和分析

为突出克尔效应对光束 M^2 因子的影响,计算模拟的参量为,光束中心波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, 输入峰值光强 $I_0 = 100 \text{ GW/cm}^2$, 正非线性折射系数 $\gamma = 3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{GW}$, 高斯光束宽度及其他参量见下面的图文标示。

2.1 光束宽度的影响

图1给出了在不同束腰宽度下的 B 积分对 M^2 因子的影响。图1(a)给出的是光束宽度 w 分别为 0.3 mm 、 0.5 mm 和 0.7 mm 情况下,正克尔效应对 M^2 因子的影响。从该图可以看出克尔效应影响 M^2 因子的两个特点,一是随着克尔效应增强,它对 M^2 因子的影响随之增大;二是高斯光束的宽度越宽,克尔效应对 M^2 因子影响越小。图1(b)给出的是负克尔效应对 M^2 因子的影响,与前者不同之处在于高斯光束的宽度越宽,克尔效应对 M^2 因子的影响越大。克尔效应越强,其波面畸变越厉害,发散角越大。因而 M^2 因子将随克尔效应的增强而增大。当光束宽度较小时,由于其衍射效应,它发散的更快一些。

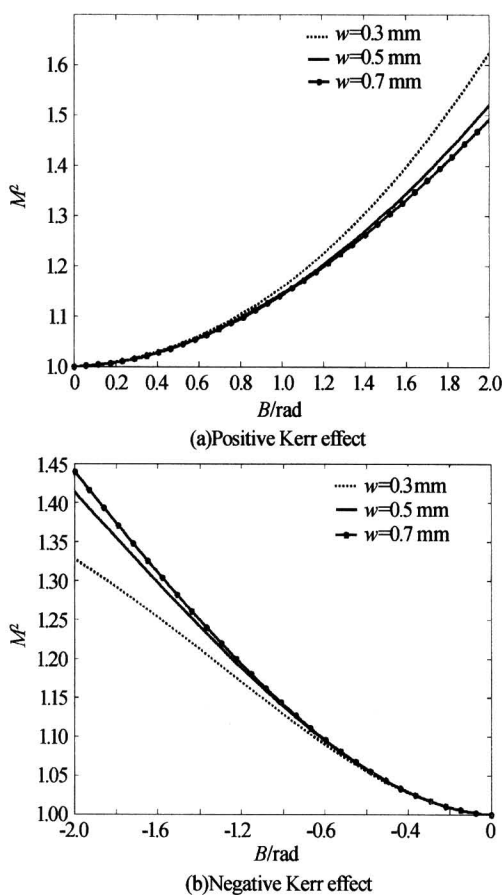


图1 克尔效应对不同宽度的 M^2 因子的影响

Fig. 1 The influence of the Kerr effect on the M^2 with waist width w

因此,在同样强度 B 积分下,有较大的 M^2 因子,对负克尔效应,有类似的解释。

2.2 光束束腰平面与介质的距离 L 的影响

光束腰平面到非线性介质入射面的距离 L 对 M^2 因子同样也有影响,在没有考虑介质对光束口径的限制条件下,图2给出了光束宽度为 0.3 mm ,

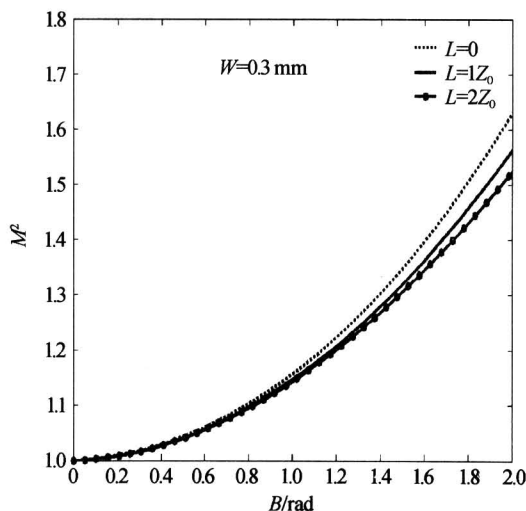


图2 克尔效应在光束经历不同传输距离后对光束质量因子的影响

Fig. 2 Kerr effect on the beam quality factor at different far between the beam waist and nonlinear medium

L 分别为 0、1 和 2 个光束瑞利长度 Z_0 ($Z_0 = \pi w^2 / \lambda$) 条件下克尔效应对 M^2 因子的影响. 从图 2 可以看出, 当克尔效应强度一定时, 距离 L 变化对 M^2 因子变化的影响很小; 但还是可以看出 L 较大时, 克尔效应的影响还是稍微大一些. 从克尔介质的类透镜效应分析, 光束在自由空间传输距离 L , 光束会有一个发散作用, 这个作用对自聚焦作用有一个抑制的作用, 因此大的距离 L , 能在某种程度上抑制克尔效应对光束 M^2 因子的影响.

3 非线性补偿方法降低 M^2 因子

由于“自聚焦”效应是限制高功率激光进一步发

展的瓶颈^[7], 因此人们提出了很多种办法来抑制这种克尔效应, 文献[14], [15]考虑到非线性位相的可叠加性, 采用负非线性折射率的介质办法补偿自聚焦的位相延迟, 取得了较好的结果. 实际上, 采用这种非线性的补偿办法, 同样能够抑制克尔效应对光束质量 M^2 因子的影响, 提高光束质量.

图 3(a) 给出了对宽度为 0.3 mm 的光束在经历了不同强度的克尔效应后, 分预补偿, 两端补偿和后补偿等三种方式进行了模拟计算, 横坐标为光束所经历的 B 积分, 从中可以看出当光束经历的 B 积分较小后, 三种补偿方式的结果基本一致, 但在光束经历的 B 积分较大时进行不同的补偿, 两端补偿效果

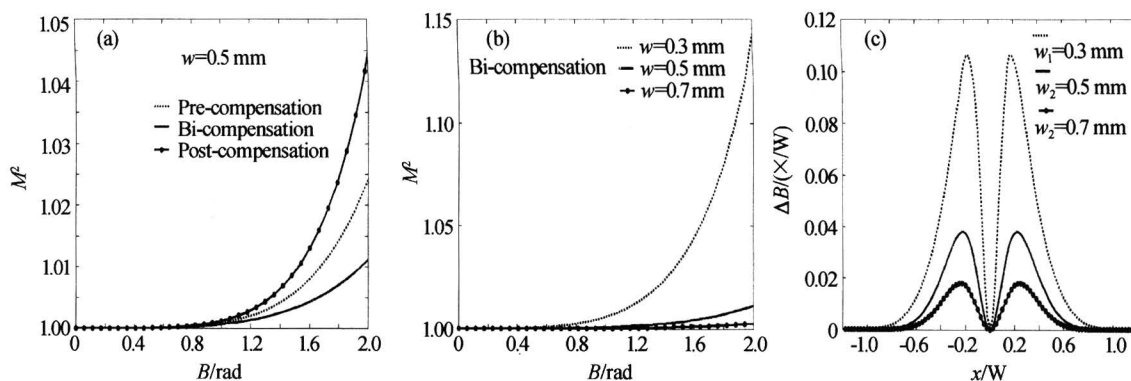


图 3 (a) 三种补偿方式比较; (b) 两端补偿结果; (c) 两端补偿后的位相畸变

Fig. 3 (a) Influence of pre-compensation, both side compensation and post-compensation on the beam quality factor; (b) Influence of both side compensation on beam quality factor with the w ; (c) Phase rescue after both side compensation at B is 2

最好, 预补偿次之, 后补偿最差.

图 3(b) 给出的是采用两端补偿的方式, 对束腰宽度分别为 0.3 mm、0.5 mm 和 0.7 mm 的高斯光束进行补偿, 横坐标为光束所经历的 B 积分. 可见光束的宽度越宽, 补偿效果就越好, 这是由于在传输过程中的变化, 宽度较小的光束的变化更为剧烈些, 使截面上有更多的非线性位相延迟 $B(x)$ 不能完全补偿. 在图 3(c) 中, 波前位相误差的来源有较好的解释, 图 3(c) 是在 B 积分为 2 时, 按非线性位相延迟峰值完全补偿的原则, 对不同宽度的光束的补偿后光束的横截面位相 $\Delta B(x)$ 分布, 光束的宽度越小, 不能补偿的 $\Delta B(x)$ 峰值越大, 因此位相波前畸变越大, 从而 M^2 因子更大.

4 结论

在激光光学中, 光束质量 M^2 因子在理论和实验中有重要的地位. 光束的传输放大过程中, 克尔效应带来的光束波前畸变, 对光束质量有很大的影响, 采用分步傅里叶方法对介质中的非线性薛定谔方程进行数值求解, 通过得到经历克尔效应后的光束的多个远场分布, 采用二次曲线拟合的办法, 得到

克尔效应对光束 M^2 因子的影响, 并分析了光束宽度和高斯光束腰平面到克尔介质的距离的两个重要因素在其中的影响; 最后利用 B 积分的可叠加性的特点, 采用非线性补偿的方法来提高光束的质量, 并指出两端补偿是三种补偿方案中最优的方式.

参考文献

- 1 Siegman A E. New developments in laser resonators. Holmes D A, Edit, *Proc SPIE*, 1990, **1224**, 2~14
- 2 杨焕雄, 赵道木, 陆璇辉, 等. 关于光束质量因子 M^2 的几点看法. *中国激光*, 1997, **124**(8): 709~714
Yang H X, Zhao D M, Lu X H, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, **124**(8): 709~714
- 3 高春清, Weber H. 激光光束传输因子 M^2 的一些问题. *光子学报*, 2001, **30**(2): 240~243
Gao C Q, Weber H. *Acta Photonic Sinica*, 2001, **30**(2): 240~242
- 4 罗时荣, 吕百达, 孙年春. 截断光束的广义 M^2 因子. *物理学报*, 2004, **53**(7): 2145~2149
Luo S R, Lu B D, Sun N C. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7): 2145~2149
- 5 文乔, 楚晓亮, 张彬. 有振幅调制和相位畸变光束通过硬边光阑的 M^2 因子. *光学学报*, 2004, **24**(2): 274~278
Wen Q, Chu X L, Zhang B. *Acta Optica Sinica*, 2004,

- 24(2):274~278
- 6 张彬,李强,蔡邦维. 高强度三次谐波转换对光束质量的影响. 光子学报,2004,33(5):553~556
Zhang B, Li Q, Cai B W. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5):553~556
- 7 Simmons W W, Hunt J T, Warren. Light propagation through large laser systems. *IEEE J Quantum Electron*, 1981, 17(9):1727~1744
- 8 苗润才,沈常宇,叶青,等. 环形斑光束在非线性克尔介质中的自聚焦效应. 光子学报,2003,32(2):204~208
Miao R C, Shen C Y, Ye Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(2):204~208
- 9 苗润才,叶青,沈常宇,等. 环形斑光束在非线性克尔介质中环半径的偏移现象. 光子学报,2002,31(7):882~886
Miao R C, Ye Q, Shen C Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(7):882~886
- 10 王绍民,陆璇辉,林强,等. 超光束质量研究. 强激光与粒子束,1996,8(4):475~479
Wang S M, Lu X F, Lin Q, et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(4):475~479
- 11 Shen Y R. The principles of nonlinear optics. John Wiley & Sons, Inc, 1984
- 12 Chen J, Huang P. *Exact measurement of the far field divergence of the laser beam using CCD camera*. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, 9(4):552~556
- 13 Govind P. Agrawal 著,贾东方,余震虹,等译. 非线性光纤光学原理及应用. 北京:电子工业出版社,2003. 33~34
Govind P A. *Nonlinear fiber optics, Third edition & applications of nonlinear fiber optics*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 33~34
- 14 Roth U, Loewenthal F, Tommasini R, et al. Compensation of nonlinear self focusing in high power laser. *IEEE J Quantum Electron*, 2000, 36(6):687~691
- 15 赵华君,朱启华,冯国英,等. 高功率超高斯光束传输的非线性补偿研究. 强激光与粒子束,2004,16(3):291~295
Zhao H J, Zhu Q H, Feng G Y, et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(3):291~295

The Influence of the Kerr Effect on the Gaussian Beam Quality Factor and Its Reduce

Ma Zairu¹, Feng Guoying¹, Chen Jianguo¹, Zhao Huajun¹, Li Xiaodong¹, Wang Shaopeng¹, Zhu Qihua²

¹ College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064

² Research Center of Fusion CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang Sichuan 621900

Received date: 2005-01-19

Abstract The process of the Gaussian beam propagating through the nonlinear medium is calculated by step FFT, and the M^2 factor is get by minimizing the root-mean-square of the quadratic curve, the simulation results show: on the condition that the B integral is no more than 2, the stronger the Kerr effect is, and the bigger the M^2 factor is; and in which the beam width and the length between the waist plane and the nonlinear medium are two important factors on the influence between the Kerr effect and M^2 factor, namely the narrower beam width and the longer length are, the and the bigger the M^2 factors are. The compensation adopting the negative nonlinear refractive index medium to reduce the Kerr effect is studied and the beam quality is improved effectively. The both side compensation is selected as an idea method in the three types of methods.

Keywords Nonlinear optics; Factor; Kerr effect; Nonlinear compensation



Ma Zairu was born in 1972. He received his B. S. degree from Huaibei Coal Industry Normal College in 1996. Now He is a Ph. D. candidate at Department of Opto-electronics, Sichuan University. His current research interests include ultra-short optical pulse and nonlinear optics.