

文章编号: 1001-3806(2008)04-441-04

一种研究不均匀介质中激光传输的新方法

刘俊国, 吕志伟*, 王雨雷

(哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了解决非均匀介质中的光传输问题, 利用光学相位共轭波的时间反演特性, 实现了对柯林斯衍射积分公式的改进。并通过改进后的计算方法对均匀及非均匀介质中的光传输进行了数值模拟。模拟结果表明, 该方法能够实现计算非均匀介质中的衍射场的近场分布的计算。这一结果对高功率激光系统中的传输模拟和参量优化等问题是有帮助的。

关键词: 非线性光学; 非均匀介质; 激光传输; 数值计算; 高功率激光系统

中图分类号: O437.2 **文献标识码:** A

A new method to study laser propagation in inhomogeneous medium

LIU Jun-guo, LÜ Zhi-wei, WANG Yu-lei

(Photoelectron Research Institute Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract In order to study laser propagation in inhomogeneous medium, Collins formula was improved by using time inversion characteristic of optic phase conjugation wave. Based on the new method, beam transmission in medium was calculated. It was proved that the new method was correct and effective in dealing with near field calculation and it was helpful for simulation and parameter optimization of beam transmission.

Key words non-linear optics; inhomogeneous medium; laser transmission; numerical calculation; high power laser system

引 言

研究激光在非均匀介质中的传输对于优化设计高功率放大系统的参量有重要意义^[1-2], 而非涅耳衍射积分公式和夫琅和费衍射积分公式是经典标量衍射传输理论中常用的公式^[3], 它对经典光学中遇到的大量空域中的衍射问题都是适用的, 在激光光学中常用来处理近轴标量光束在自由空间中的传输问题。但是, 当处理衍射面和观察面之间不是自由空间而是复杂光学系统的时候, 经典衍射理论就显得无能为力了。对此做出重要推广的是柯林斯, 推广后的柯林斯公式可以处理任意一个可以用 $ABCD$ 传输矩阵表示的复杂光学系统中的场分布的问题。然而不论是经典的标量衍射理论还是改进后的柯林斯衍射积分公式, 都只有在满足旁轴条件时才可以应用。作者利用光学位相共轭波的时间反演特性对一般意义下的柯林斯衍射积分公式进行改进, 改进后公式通过两次柯林斯衍射积分不仅可

以计算满足旁轴近似的衍射积分的远场分布, 而且对不满足旁轴近似条件的近场分布也可以进行计算。利用此算法可以研究不均匀介质中的激光传输的问题^[4-7], 包括各种畸变、自聚焦^[8-11]对激光横场模式的影响。

1 利用光学位相共轭波的时间反演特性改进柯林斯衍射积分公式

对于一个可以用变换矩阵 $ABCD$ 表征的复杂光学系统, 柯林斯衍射积分公式可表示如下^[3]:

$$E_2(x_2, y_2, z) = \left[-\frac{i}{\lambda B} \right] \exp(ikz) \iint_S E_1(x_1, y_1, 0) \cdot \exp\left\{ \frac{ik}{2B} [A(x_1^2 + y_1^2) + D(x_2^2 + y_2^2) - 2(x_1x_2 + y_1y_2)] \right\} dx_1 dy_1 \quad (1)$$

式中, λ 为波长, z 表距离。对长度为 L , 折射率为 n_0 的介质, 将其传输变换矩阵代入 (1) 式得:

$$E_2(x_2, y_2, z) = \left[-\frac{in_0}{\lambda z} \right] \exp(ikz) \iint_S E_1(x_1, y_1, 0) \cdot \exp\left\{ \left(\frac{n_0 k}{2z} \right) [(x_1^2 + y_1^2) + (x_2^2 + y_2^2) - 2(x_1x_2 + y_1y_2)] \right\} dx_1 dy_1 \quad (2)$$

上面的积分公式都是旁轴近似下的结果, 因此其适用条件为: 观察屏和衍射屏之间的距离远远大于观察屏和衍射屏的尺寸, 即 $z \gg R$, 其中 R 是衍射屏和观察屏的直径。当观察屏和衍射屏距离较近时, 采用上述公

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10476009, 60478020); 哈尔滨工业大学优秀团队支持计划基金资助项目

作者简介: 刘俊国 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事非均匀放大介质中的脉冲激光传输数值模拟的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhwei11@yeah.net

收稿日期: 2007-04-09; 收到修改稿日期: 2007-05-31

式将得不到正确结果。也就无法实现对近场强度分布的计算。

然而,任一光场分布与其相位共轭波的复振幅是复共轭的关系,在时间上则是时间反演的关系。因此,如果有一个光波沿着 z 轴方向在某介质中传播,其相位共轭波沿同一介质反方向传播相同的距离后,其场强分布的模将与传播之前一样,而相位和原相位相反。利用这一点,可以解决衍射积分的任意近处的场分布的计算问题。

下面以折射率为 n_0 的均匀介质中场传输为例说明其计算步骤。现有复振幅分布形式为 $E_1(x_1, y_1, 0)$ 的场分布(处于 $z=0$ 处),为计算该光场传输距离 z 后的场分布,这里 z 不满足旁轴近似条件。首先计算 $E_1(x_1, y_1, 0)$ 沿着 z 轴传输 z_1+z 后的场分布 $E_0(x, y, z_1+z)$, 这里 $z_1 \gg R$, 满足远场条件,从而 z_1+z 也满足远场条件。然后对 $E_0(x, y, z_1+z)$ 取复共轭,得到其相位共轭波 $E_0^*(x, y, z_1+z)$ 。最后将 $E_0^*(x, y, z_1+z)$ 反向传输 z_1 后就得到所需的场分布的复共轭,再取一次复共轭,即得到所需的场分布 $E_2(x_2, y_2, z)$ 。这样,通过将一次近场分布的计算转化为两次远场分布的计算,从而实现了在不破坏近轴假设的条件下近场分布的计算。用公式表述如下:

$$E_0(x, y, z_1+z) = \left[-\frac{i n_0}{\lambda B_1(z_1+z)} \exp\{i k(z_1+z)\} \times \iint_S E_1(x_1, y_1, 0) \cdot \exp\left\{\frac{i n_0 k}{2(z_1+z)} [A_1(x_1^2 + y_1^2) + D_1(x_2^2 + y_2^2) - 2(x_1 x_2 + y_1 y_2)]\right\} dx_1 dy_1 \right] \quad (3)$$

$$E_2^*(x_2, y_2, z) = \left[-\frac{i n_0}{\lambda B_2(z)} \exp(i k z) \iint_S E_0^*(x, y, z_1+z) \cdot \exp\left\{\frac{i n_0 k}{2z_1} [A(x_2^2 + y_2^2) + D(x_2^2 + y_2^2) - 2(x x_2 + y y_2)]\right\} dx dy \right] \quad (4)$$

2 任意传播距离的柯林斯衍射积分的计算实例及验证

为了验证上述方法,以高斯脉冲为例做一个简单的实验。取光束传输的方向为 z 轴,介质是折射率 $n_0=1.62$ 圆柱形无损无增益均匀介质。这种情况下,通过求解带边界条件和初始条件的麦克斯韦方程组,可以得到场分布的解析解的表达式,通过比较原计算方法和改进后的计算方法与解析解的差别,可以看出该计算方法的优越性。入射脉冲为高斯型光束,在介质左端面 $z=0$ 处正好处于束腰处。束腰半径 $w_0=1.0\text{cm}$, 波长 $\lambda=1.064\mu\text{m}$, 介质的半径为 10cm 。计算结果如图 1 所示,其中图 1a 和图 1d 是直接利用柯林斯积分公式的计算结果,图 1b 和图 1e 是改进后的计算结果,图 1c 和图 1f 是由解析解画出的场强分布图。

比较图 1 可见,直接用柯林斯积分公式计算光场的近场分布时,由于旁轴近似条件的破坏,计算出的强度分布出现较大误差,并且随着计算距离 R 的缩小,这种误差越来越大,当计算距离小到一定程度后,直接利用柯林斯积分公式计算得出的结果会完全反应不出

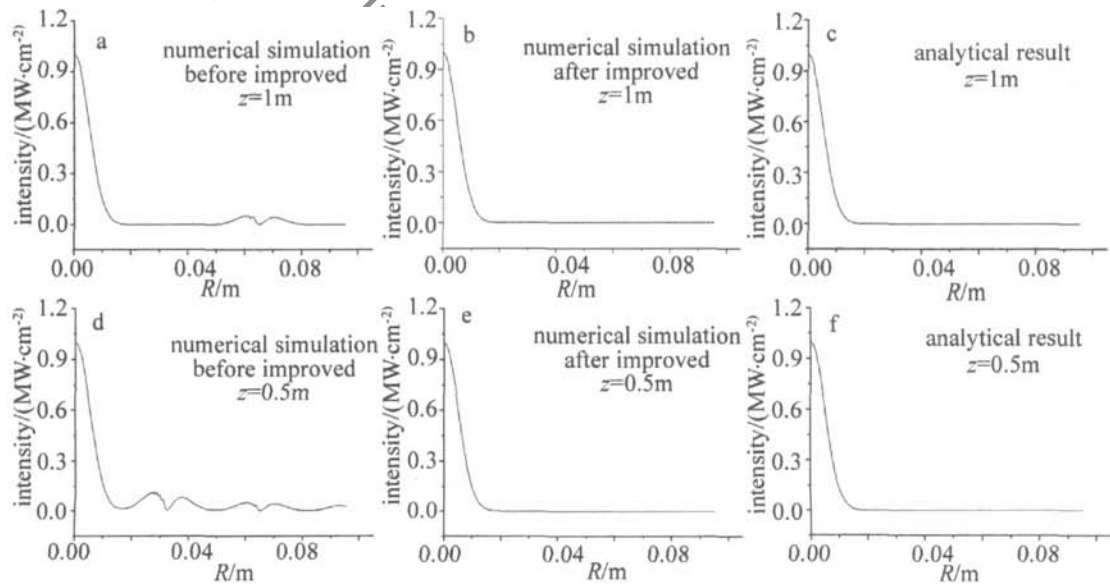


Fig. 1 The transmission of Gaussian beam through homogeneous media

实际光场的分布。而改进后的计算方法,在计算距离较远时,和直接用柯林斯积分计算得到的结果一致,这时两种计算方法都适用,但改进后的方法计算量增加一倍。随着计算距离的缩小,改进后的计算结果和改

进前的计算结果出现越来越大的偏差,而与正确结果保持一致。由此可见,通过利用相位共轭波的时间反演特性改进计算方法后,确实可以实现任意距离下的光场传输的问题。

3 利用该方法实现任意折射率分布介质中的光传输的模拟

在很多情况下,由于各种畸变效应的存在,包括激光介质本身的缺陷、抽运不均匀造成介质的热畸变以及介质的各种非线性效应等,使得衍射效应在激光传输中的作用不可忽视。这时的传输方程为非线性薛定谔方程,而这种方程得求解大多采用计算量大、稳定性不高的有限差分算法或分步傅里叶算法^[12]。而对于这些光学系统又不能用简单的 ABCD 矩阵加以描述,使得柯林斯积分在此也难以发挥作用。而且有些时候必须考虑光传输时的近场分布,这时就必须解决光传输的近场计算的问题了。下面以具有正透镜折射率分布的圆柱形介质中的光传输的模拟为例,来说明该方法在这一类问题中的应用。

假设前面的圆柱形介质中折射率分布不是均匀的,而是呈平方律分布(中间大,外层小),这种介质对光束有会聚作用,其效果相当于一个正透镜。为了计算光束通过不均匀介质后的场分布,将介质沿 z 轴细分为 n 个薄片,当 n 足够大时,薄片被分的足够小,可

以认为在单个薄片内场分布是不变的,而通过单个薄片的效果有两个:一是光场在一个薄片长度上的衍射;二是薄片对光场产生一个附加相位。其它的非均匀折射率的分布可以做同样的处理(处理自聚焦问题时,需要考虑场强对介质折射率的改变;处理存在增益和损耗的介质时,需要引入复折射率以表征介质对光场的放大或损耗),这样将介质薄片化以后,可以通过多个薄片的方法计算任意距离处的场强分布。基于这种思想,利用(3)式和(4)式首先得到任意折射率分布介质中通过单个薄片前后场强分布的迭代公式如下:

$$E_{k+1}(x, y) = \left[-\frac{\dot{n}_0}{\lambda B z_1} \right] \exp(i k z_1) \times \iint_S \left[-\dot{n}_0 / \lambda B(z_1 + dz) \right] \exp[i k(z_1 + dz)] \iint_S E_k(x, y) \times \exp\{[i \dot{n}_0 k / 2(z_1 + dz)] [A(x^2 + y^2) + D(x_2^2 + y_2^2) - 2(xx_2 + yy_2)]\} dz dz' \exp\{[i \dot{n}_0 k / 2z_1] [A(x^2 + y^2) + D(x_2^2 + y_2^2) - 2(xx_2 + yy_2)]\} dx dy \times \exp(i \Delta n dz) \quad (5)$$

式中, dz 是单个薄片的长度,反复利用(5)式得到计算结果如图 2 所示。这里介质的折射率分布取为: $\Delta n =$

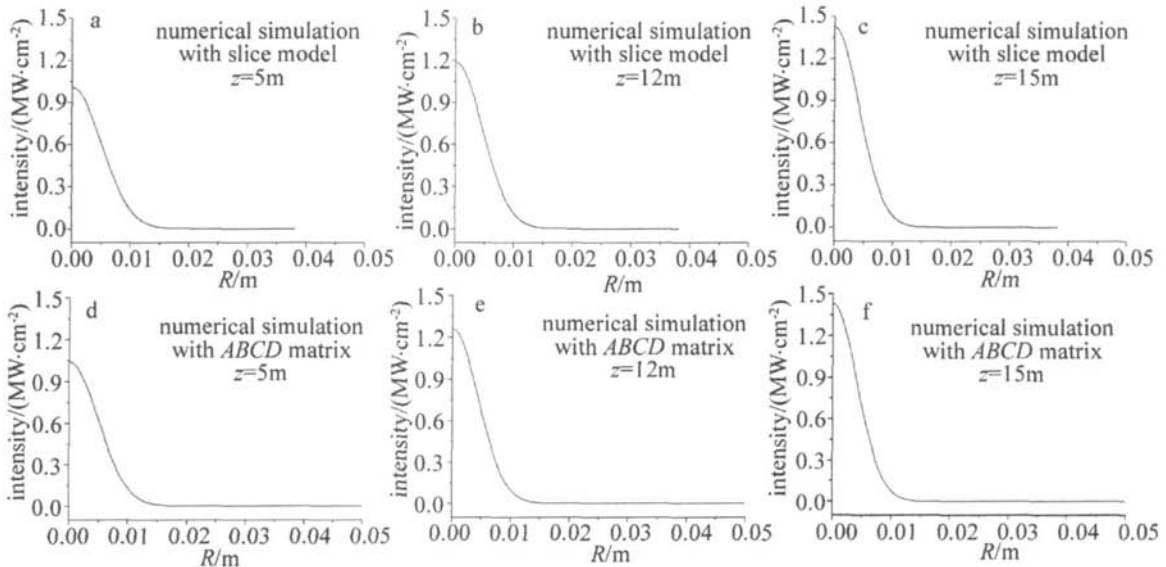


Fig 2 The transmission of Gaussian beam through inhomogeneous media

$n_0(-0.01r^2)$, 介质长度为 15m。

可以看出,两种算法得到的结果基本是一致的。从计算不同距离下的场强分布还可以看出,这种类正透镜的非均匀介质对光场的会聚作用和理想的透镜的作用是有一定差别的。这种“透镜”对场的会聚的效果不是“线性的”,在脉冲刚入射到介质中时,介质对光束似乎没有会聚作用,此时介质对光束的畸变主要是对相位的畸变。传输到一定距离后,前期的相位畸变通过衍射积累使光强的空间分布发生很大改变,这里表现为会聚作用。但是这种会聚和理想透镜不同,

因为高斯光束通过理想透镜会聚后依旧保持高斯型,而这里的会聚作用使高斯光束失去了高斯型。

4 结 论

基于柯林斯的衍射积分理论,发展了一种计算非均匀介质中近场分布的新算法。通过实例分析证明了该算法的正确性,同时实现任意折射率分布、任意传输距离的衍射积分的计算。此算法适合研究不均匀介质中的激光传输的问题,包括高功率激光系统中的热畸变、小尺度自聚焦等问题。在大型激光系统中,各种畸

变效应是限制系统性能的关键因素,因此,需要大量的数值模拟计算来实现系统参数的设计与优化,此算法可望用于这方面的研究。

参 考 文 献

- [1] ZHANG H, FAN D Y. Optimization of the design of high power Nd: glass laser amplifiers [J]. *Physics* 1999, 28(2): 79-84(in Chinese).
- [2] LÜ B D, ZHANG B. Theory of the high-power laser propagation through amplifiers [J]. *Laser Technology* 1997, 21(5): 288-292(in Chinese).
- [3] LÜ B D. Beam characterization propagation transformation resonator technology and physics [M]. Beijing High Education Press 2003 10-12(in Chinese).
- [4] LIU Sh L, DAI J H, MA X X. Effect of inhomogeneity medium on high intensity laser propagation [J]. *Acta Optica Sinica* 1995, 15(6): 721-727(in Chinese).
- [5] HUANG Zh H, CHENG H F. A Study on universal ray tracing algorithm in the medium of variable refractive index [J]. *Acta Optica Sinica* 2005, 25(5): 589-592(in Chinese).
- [6] ZHANG W J. A new method to study optical ray propagations in media with ununiform refractivity [J]. *Acta Optica Sinica* 1986, 6(11): 1026-1031(in Chinese).
- [7] GUO P. A numerical analysis of Gaussian beam propagate in gradient index nonlinear medium [J]. *Laser Technology* 1990, 14(5): 37-43(in Chinese).
- [8] AN J Z, LI Y K, DU X W. Influence of laser windows thermal lensing effect on beam quality [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2004, 16(4): 429-433(in Chinese).
- [9] YU J, TAN H M. Theoretical study on the thermal beam focusing in longitudinally-pumped solid-state laser rods [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2000, 12(1): 27-31(in Chinese).
- [10] SUTTON S, ERLANDSON A, LONDON R, *et al*. Thermal recovery of the NF amplifiers solid-state laser for application to inertial confinement fusion [J]. *SPIE*, 1998, 3492 665-671.
- [11] LI Z H, GUO Q. Numerical research on the self focusing of optical beams [J]. *Chinese Journal of Lasers* 1999, 26(8): 711-716(in Chinese).
- [12] FEIT M D, FLECK K A. Beam nonparaxiality, filament formation, and beam breakup in the self focusing of optical beams [J]. *J O S A*, 1998, 88(5): 633-636.
- [6] COLLEY A D, BAKER H J, HALL D R. Planar waveguide 1kW CW carbon dioxide laser excited by a single transverse RF discharge [J]. *A P L*, 1993, 61(2): 136.
- [7] WU G L, WANG Y Q, AN Ch W. The analysis of resonators for RF excited diffusion-cooled CO₂ planar laser [J]. *Laser Technology*, 1998, 22(2): 121-123(in Chinese).
- [8] ZHANG Y Ch. Chinese laser industry last ten years [J]. *Laser & Infrared* 2000, 30(3): 136-140(in Chinese).
- [9] YELDON E F, SEGUIN H J J, CAPACK C E, *et al*. Multichannel slab discharge for CO₂ laser excitation [J]. *A P L*, 1991, 85(7): 693-695.
- [10] YELDEN E F, SCOTT S W, STROHSCHEN J D, *et al*. Symmetry enhancement and spot-size reduction through radial beam stacking in a multichannel CO₂ laser array [J]. *IEEE J Q E*, 1994, 30(8): 1868-1875.
- [11] SEGUIN H J J. Power scaling of diffusion-cooled lasers [J]. *Opt & Laser Technol* 1998, 30(9): 331-336.
- [12] LI Y D, LIU J L, CHEN M, *et al*. Axisymmetric-fold combination laser resonator [J]. *Opt Engng* 2005, 44(6): 064204.
- [13] LU J L, LI Y D, GUO J P, *et al*. Research on near-field distributions of axisymmetric folded-combined CO₂ laser [J]. *Opt Engng* 2006, 45(7): 074201.
- [14] LÜ B D. Laser optics [M]. Chengdu: Sichuan University Press 1992: 60-65, 68-171, 335-360(in Chinese).
- [15] LU Y X. Variation of misalignment sensitivity of a three-mirror cavity [J]. *Laser Technology*, 1991, 15(3): 154-157(in Chinese).

(上接第 405页)

- [6] COLLEY A D, BAKER H J, HALL D R. Planar waveguide 1kW CW carbon dioxide laser excited by a single transverse RF discharge [J]. *A P L*, 1993, 61(2): 136.
- [7] WU G L, WANG Y Q, AN Ch W. The analysis of resonators for RF excited diffusion-cooled CO₂ planar laser [J]. *Laser Technology*, 1998, 22(2): 121-123(in Chinese).
- [8] ZHANG Y Ch. Chinese laser industry last ten years [J]. *Laser & Infrared* 2000, 30(3): 136-140(in Chinese).
- [9] YELDON E F, SEGUIN H J J, CAPACK C E, *et al*. Multichannel slab discharge for CO₂ laser excitation [J]. *A P L*, 1991, 85(7): 693-695.
- [10] YELDEN E F, SCOTT S W, STROHSCHEN J D, *et al*. Symmetry enhancement and spot-size reduction through radial beam stacking in a multichannel CO₂ laser array [J]. *IEEE J Q E*, 1994, 30(8): 1868-1875.
- [11] SEGUIN H J J. Power scaling of diffusion-cooled lasers [J]. *Opt & Laser Technol* 1998, 30(9): 331-336.
- [12] LI Y D, LIU J L, CHEN M, *et al*. Axisymmetric-fold combination laser resonator [J]. *Opt Engng* 2005, 44(6): 064204.
- [13] LU J L, LI Y D, GUO J P, *et al*. Research on near-field distributions of axisymmetric folded-combined CO₂ laser [J]. *Opt Engng* 2006, 45(7): 074201.
- [14] LÜ B D. Laser optics [M]. Chengdu: Sichuan University Press 1992: 60-65, 68-171, 335-360(in Chinese).
- [15] LU Y X. Variation of misalignment sensitivity of a three-mirror cavity [J]. *Laser Technology*, 1991, 15(3): 154-157(in Chinese).