

文章编号: 1672-3392(2006)02-0026-03

激光束整形光学系统的设计与研究

周洋 何平安 蒋千年 何焯 张继涛

(武汉大学电子信息学院, 武汉 430079)

摘要 提出了一种改善激光投线仪光束均匀性的新方法, 该方法运用几何光线追迹的原理, 对激光束通过带孔柱透镜的光路进行了计算, 模拟了柱透镜内孔在不同大小、形状、透镜介质折射率等参数下的光束远场能量分布, 获得了能量分布均匀的远场激光束。

关键词 高斯激光束; 光线追迹; 带孔柱透镜; 线激光

中图分类号 TB133 **文献标识码** A

1 引言

核物理工程、表面热处理、激光加工、激光通信中的传输光束控制等诸多领域都要求能量均匀分布的激光束, 尤其是激光控制核聚变对激光束能量分布的均匀性要求更为突出, 但目前大多能量均分的整形方案所需光学器件多, 加工难度大, 过程繁冗, 效果欠佳。

本文运用几何光学整形的手段, 结合基于光线追迹的计算机模拟与仿真, 对整形用的柱透镜进行中心开孔, 调整柱透镜内孔的大小、形状、孔内介质折射率等参数, 对模拟结果进行优化分析。利用中心孔对光线的发散作用将激光束中间较高能量分散到两端, 以实现光强的较均匀分布。模拟结果表明优化率达 200% 以上, 在大范围均匀性的程度上有大幅度提高。运用互补填平的思想, 优化内孔的位置、孔内介质折射率将激光束整形为近似门型的强度分布, 计算机模拟表明, 整形效果显著。

2 光路设计与模型假设

2.1 光路设计与分析

本文采取让准直后的高斯激光束通过一中心带孔的柱透镜, 来实现高斯光束的整形。

设透镜外介质的折射率为 n_1 , 柱透镜介质折射率为 n_2 , 孔内介质折射率为 n_3 。由整形的基本要求, 理论上 $n_1 < n_2, n_3 < n_2$, 其光路图如图 1 所示。

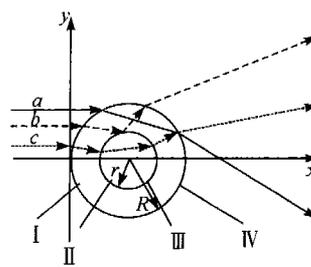


图 1 光线通过带孔透镜光路

Fig. 1 Optical path through the lens with a hole

内孔半径为 r , 柱透镜外半径为 R , I、II、III、IV 为 4 个折射球面, a 、 b 、 c 为三条典型的光线。 a 经过 I、IV; b 经过 I、IV, 在 II 或 III 上发生全反射; c 经过 I、II、III、IV, 由此可知光线会经过三种不同路径射出。此光线追迹是一个二维平面内的问题, 运用三角函数与解析几何的方法, 结合光线追迹的基本公式^[1], 容易确定出不同起始位置和入射方向的光线经 I、II、III、IV 组成的透镜系统后最终到达接收屏上的位置(不含近似)。考虑系统对激光束能量的损耗, 各界面对入射光能量的反射率和透过率直接与入射角、折射角有关, 由光通过两种介质分界面时的菲涅尔公式^[1]知 s 波和 p 波的反射率分别为 r_s 、 r_p , 应用界面对自然光反射系数公式得平均反射比为

$$r_n = (r_s + r_p) / 2 \quad (1)$$

由能量守恒原理得透射比为

$$t_n = 1 - r_n \quad (2)$$

收稿日期 2005-11-18; 收到修改稿日期 2006-02-11

作者简介 周洋(1984—), 男, 主要从事光束整形方面的研究。E-mail: zhyishappy1@eyou.com

2.2 模型建立

以柱透镜截面左端点为原点,以光线传播方向为轴向,在柱透镜横截面内建立笛卡儿坐标系,简化模型如图 2 所示。

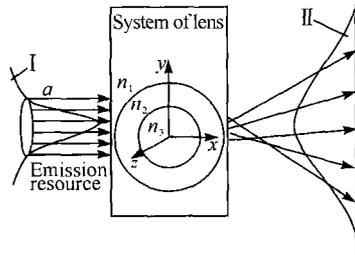


图 2 光学系统模型

Fig. 2 Model of the optical system

曲线 I、II 分别表示初始光束和屏上光线的能量分布(尺寸比例与实际中不一致)。a 为示例光线,起始坐标为(0,y),终点位置为(L,Y),L 为接收屏原点的横坐标,L、Y 均取对 R 的相对比值,本系统远场处 L=4 000。由于激光的单色性强,准直后的激光束发散角极小(10⁻⁶ rad 量级),可将激光束的能量进行离散,将其看成是由很多条平行光线组成,每条光线因距光束中心的距离不同而具有特定的能量,对各光线的能量分布建立归一化高斯模型

$$E(y) = e^{-y^2/\omega_0^2} \quad (3)$$

其中,y 表示平行光线的初始位置纵坐标,|y| 表示光线到光束中心的距离。以坐标为(0,y)的光线为例,经光学系统后入射到屏上,通过光线追迹法求出到达屏上的位置(l,Y),l 为屏的横坐标,到达屏时该光线的能量为 E'。设广义的系统位置变换函数为 F,能量变换函数为 T,则有:

$$Y' = F \cdot y \quad E' = T \cdot E(y) \quad (4)$$

通过以上模型,可求出每条光线到达光屏的位置,以及到达屏时所携带的能量。由于不同起始坐标(0,y)的光线经系统投射到屏上可能出现交错或重叠,需要将各点(l,Y)所对应的能量 E' 在线状屏上进行加权后的线性叠加,并以屏中心位置元上能量 E₀ 为单位 1 将各位置元上的能量归一化,最后将各能量数值进行拟和并用 VC++ 进行绘图,即得到屏上总体能量 E 的分布曲线。

3 计算机模拟与结果分析

采用计算机模拟的方法,运用光线追迹的基本原理^[2],并采用以上模型,用 C++ 语言编程,编写的程序在 VC++6.0 中运行,借助 VC++ 进行绘

图并对曲线进行拟合^[3]。令 E₁、E₂、E₃ 分别表示由图 1 中的 a、b、c 三种不同情况的光线到达屏上时的能量分布曲线。E 为对三种情况的 E₁、E₂、E₃ 进行加权的线性叠加并拟合而得到的归一化曲线(仅显示出对称曲线的左半部分,下同),体现了总体的能量分布。

3.1 激光投线的大范围均匀性

若透镜处于空气中,内孔为空心则有 n₁=n₃=1。内孔位居柱透镜的中心,发射激光束的束腰为 ω₀,从能量利用的角度考虑,一般有 ω₀<0.6R。接收屏与柱透镜轴心之间的距离为 Z(Z=L-R)。线状激光在接收屏上的主范围宽度内的能量占总能量的百分比为 e×100%,其大小反映了中心能量的均匀度^[1]。有效作用区间内的能量占总能量的 96%,其大小表示投线的总范围。

其中, $e = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} e^{-y^2/\omega_0^2} dy / \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y^2/\omega_0^2} dy$, ω 是接收屏上类高斯光束的束腰,通过计算可得 e≈0.8427,为与 ω 无关的定值。

由计算机模拟可知,n₂、ω₀、r 三个参数为主要影响因素,为直观地描述各参数的影响程度,图 3、图 4 分别为 r、n₂ 不同时的总体能量(E)分布曲线的对比图。(图中 E 取以中心最高能量处为 1 的归一化值,Y 取相对于 R 的比值,实际中 R 一般取 3~5 cm,以下各图同。)

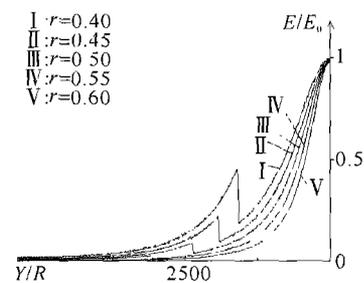


图 3 内孔的半径 r 不同时光屏上的能量分布

Fig. 3 Energy distribution with different values of r

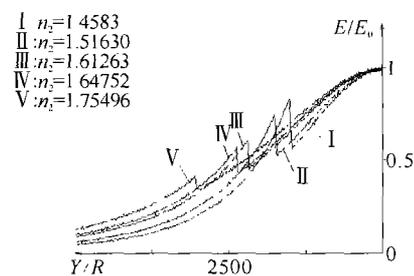


图 4 透镜材料的折射率 n₂ 不同时光屏上的能量分布

Fig. 4 Energy distribution with different values of n₂

通过分析比较图3、图4,并采用计算机搜索,得出一组整形效果明显的优化设计参数,系统改进前后的能量分布比较如图5、图6所示。

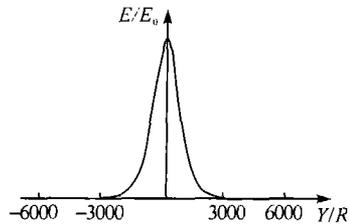


图5 改进前对应的能量分布

Fig. 5 Energy distribution with pillar lens

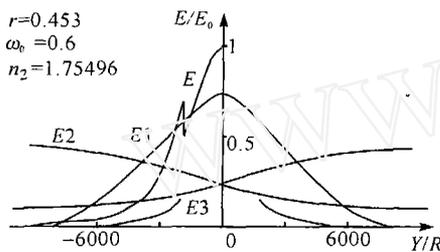


图6 改进后对应的能量分布

Fig. 6 Energy distribution with pillar lens with a hole

系统改进前能量主要分布在中心的较小区域内,改进后能量有明显的大范围均匀性的改善(曲线 E)。图中的曲线 E_1 、 E_2 、 E_3 分别表示由图1中的a、b、c三种不同情况的光线到达屏上时的能量分布曲线。

3.2 门型强度分布

在3.1的基础上,将孔内填入新的介质材料,并挪动孔的位置,改变孔的形状(考虑II、III界面为非球面),将到达屏上的线状激光的强度变为近似门型。同样用计算机模拟其强度分布曲线,在VC++6.0上得出参数优化的能量分布曲线(E)如图7所示。

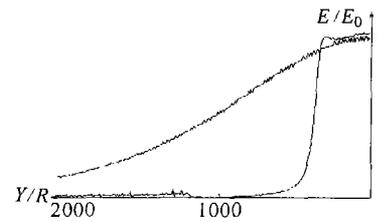


图7 门型能量分布曲线图

Fig. 7 Energy distribution like shape of a door

4 结论

本文针对激光投线中的整形要求,提出通过在柱透镜中心凿孔的方法来实现能量均分,因而避免了组合光学器件与二元光学整形的繁杂过程^[5]、高难度的工艺要求与整形器件较高的制作成本,使得线状激光在光屏上的主范围区间(反映能量集中区的均匀程度)和有效大范围区间的大小上均得到了显著改善,获得了近似平顶均匀的方波状强度分布的线状激光。本文采用的一维线状激光的整形技术,很容易推广到二维面激光的整形,并且工艺简单,产品成本较低。

参考文献

- [1] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,2004
- [2] Li Ling, An Liansheng. Theory and Application of Computer Aided Optical Design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 38~46
- [3] 熊敬斌. Visual C++6.0[M]. 北京:清华大学出版社,2002. 7
- [4] 刘艺. 散射狭缝光场大范围均匀性研究[J]. 中国激光,1998,25(9):822~824
- [5] 田克汉,严璞白,谭峭峰. YG算法设计衍射光学光束整形器件的两种改进[J]. 中国激光,2004,29(4):307~308

Research of Laser Beam Shaping System

ZHOU Yang HE Ping-an JIANG Qian-nian HE Ye ZHANG Ji-tao

(Electric Information School, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract A new method to improve the energy homogeneity of laser Gaussian beam is proposed, in which the optical path of Gaussian beam through a pillar lens with a hole is computed using geometrical optics. The far-field energy distributions of the beam in different size and shape of the hole, and refractive index of the pillar lens are simulated. Finally, some satisfying results are obtained.

Key words laser Gaussian beam; energy homogeneity; a pillar lens with a hole; cross line laser