

# 高功率激光光束扩束器

南 瑶

(西安应用光学研究所, 西安 710065)

**摘 要:** 研制了一种基于光纤棒的高功率密度激光发射系统使用的扩束器. 分析了工程上使用的传统高功率重复频率脉冲激光器及其激光发射系统存在的常见问题---激光光束指向抖动、激光光斑分布不均匀和激光器更换装调难, 提出了采用光纤棒激光光束扩束和光斑均匀化的方法, 简述了该扩束器的光纤棒抗损伤机理和有益效果, 并对光纤棒激光光束扩束和匀化进行了理论推导. 制作了一种采用单模裸光纤棒的扩束器. 实验结果表明, 这种扩束器达到了理想的效果且具有潜力.

**关键词:** 高功率; 激光; 扩束器; 单模光纤; 光束整形; 指向稳定性

**中图分类号:** TN247

**文献标识码:** A

## 0 引言

随着激光技术的发展, 高能重复频率脉冲激光在光电系统中的应用越来越多. 工程上使用的重复频率脉冲激光器输出光束的能量分布通常为多模激光束, 不能直接满足使用要求, 需要激光发射天线对其进行光束整形、光束指向稳定、扩束和准直后, 才能使发射激光满足在远距离处作用面的激光覆盖面积上的激光能量分布要求; 这种激光发射天线的光学器件局部要承受高功率密度的激光辐射, 因而易于导致激光传输光路上光学器件的激光损伤和失效<sup>[1]</sup>; 在光电系统中, 激光器的故障率通常最高, 需要更换, 更换后的激光光轴校准需要的时间较长, 而且需要专用的设备和空间, 这种现状与激光系统的快速维修性要求存在一定差距. 随着工程应用对激光能量增大需求的增加, 高功率密度激光的需求会不断增加, 激光对光学元件的损伤将是制约高功率密度激光在光电系统中广泛使用的主要因素. 随着光电系统对超视距目标探测要求的增加, 对激光发射光轴的指向稳定性以及与光电系统其它光轴的同轴度要求增加.

传统的激光发射天线是基于几何光学的原理, 采用反向望远镜光学结构, 典型的有反向透射伽利略式和反向折反卡塞格林式, 其特点是起扩束作用的光学元件承载的激光功率密度最大, 高功率密度激光在光学材料中的热透镜效应和光学器件表面的损伤, 影响激光光束的光束指向稳定性、扩束和准直效果, 在重复频率脉冲激光的初始工作和稳定工作条件下, 这种现象尤其严重; 而且这种扩束组件在与激光器装配时需要与激光器输出镜间隔一段距离, 光轴调整复杂. 这种激光扩束发射系统, 在通常情况下扩束比等于准直透镜组的焦距与扩束镜的焦距之比, 焦距太短时调

试困难, 焦距太长易于导致激光发射天线的总的几何尺寸太长, 对于远距离作用的激光发射系统易于形成“纵目”现象, 不利于系统的整体体积重量的降低, 对于小型化的激光发射系统不利. 这种光学系统中采用的都是整块的光学器件, 光学器件对光束的变换是线性变换, 其输入输出图像(激光能量分布)满足物像公式, 不能对多模激光实现光束的整形和光束指向稳定, 工程上激光小目标作用系统要求激光光斑为能量均匀分布, 而现有的传统扩束镜是基于成像光学原理制作, 不能改善激光的光斑分布, 需要另外设计光束整形器和指向稳定单元对激光束进行整形和指向稳定; 这种光学系统的光路是可逆的, 对于瞄准它的光会产生“猫眼效应”, 不利于武器系统的隐身, 降低了战场生存能力. 折反式的激光扩束发射系统输出的激光光斑, 在有限距离内传输时, 激光光斑中心有能量空洞.

国内外在激光光束的指向稳定性方面有大量的专利和文献报道. 主要方法有反馈式, 通过分束法检测发射激光, 再用检测信号反馈自动控制光学系统的透镜进行激光指向调整, 保证发射系统发射激光光轴的指向稳定性. 美国专利 US006865034B1(Method and apparatus for eliminating alignment error in an optical system)公开了一种用于在光路中消除激光发射光轴热漂移的方法和仪器, 该方法采用调校透镜进行微位移, 消除由于热膨胀导致的侧向光轴漂移. 在透镜的径向周围装有三个能反向变形的柔性电控器件, 该器件的变形量由计算机中央处理设备提供控制信号. 这种方法涉及机械结构、电学传感器、电信号的实时解算和反馈驱动电路, 其设计环节复杂, 不利于整个激光发射系统的小型化.

传统的激光光束整形方法有: 对激光器输出激光的空间滤波(选模)法, 激光谐振腔输出镜反射率高斯分布法, 乳白玻璃的余弦修正法; 激光光束整形的

最新产品是德国的 Molecular Technology GmbH 公司生产的光束整形器, 该光束整形器可将激光器输出的高斯光束转换为平顶形状分布的光束 ( $\pi$ shaper), 没有公开其内部光路的工作方式和器件的工作原理。

## 1 扩束器

本扩束器包括扩束镜、壳体。原理示意图见图 1。所述扩束镜由若干根单模光纤棒组成, 也可以采用小于单模光纤芯径的光学纤维或者其他小芯径的光导纤维。所述壳体带有形状规则的通透腔体且腔体端面大于激光的照射光斑尺寸; 所述的光纤棒为去掉涂敷层的裸光纤, 所述裸光纤的端面镀抗激光损伤膜, 并沿光轴方向紧密排列在壳体的腔体内, 所有光纤棒的长度相等, 且所有光纤棒的前端面与后端面分别对齐, 均处在同一个平面内。若干根单模光纤棒的输入端面构成扩束镜的接收面, 其输出端面构成扩束镜的输出面。每根单模光纤棒对光纤棒输入端入射的激光, 从另一端输出到自由空间, 每根光纤棒输出激光在自由空间的能量分布具有同一的规律, 激光束散角得到扩大, 且仅与单模光纤棒输出端的距离有关; 单模光纤棒之间的每个缝隙构成空腔, 激光穿过空腔后, 在自由空间的能量分布具有同一的规律, 激光束散角得到扩大, 且仅与单模光纤棒输出端的距离有关。扩束后在近距离内激光光斑扩大很多, 激光光斑内每一点的激光能量是扩束镜中每根光纤棒和每个空腔输出激光能量的叠加, 大量光纤棒和空腔输出激光能量的叠加起到了对多模激光束的统计作用, 类似于对随机事件的统计平均, 使扩束后激光束的能量分布趋于一个较稳定的正态分布, 起到对激光束进行扩束、整形和稳定光束方向的作用。

本扩束器的有益效果体现在以下几个方面:

1) 由于单模光纤棒的直径小, 因而其单模光纤端面所能接收到的激光能量也小, 而且单模光纤棒的纤芯直径远小于包层直径, 纤芯折射率大于包层折射率。这样, 照射到单模光纤棒的纤芯上的激光只能在纤芯中传输, 照射到单模光纤棒的包层上的激光大部分只能在包层中传输, 激光不能聚焦到一点, 有效的降低了局部激光能量密度, 由此提高了扩束镜的激光损伤阈值;

2) 采用了该扩束镜的激光发射系统, 其光路是不可逆的, 大大降低了敌方激光搜索照射在该扩束系统上激光的回波反射能量, 提高了隐身能力;

3) 可使经过扩束器的光纤棒和空腔输出的激光能量分布仅与单模光纤棒输出端的距离有关。在扩束器后大于三倍以上激光光斑直径的距离处, 扩束后光斑的能量分布为正态分布, 该分布与扩束前激光能

量分布无关, 因而可降低光电系统对激光器的模式要求, 可减少激光器选模导致的能量损失, 从而提高了整个激光系统的能量转换效率;

4) 本扩束器可使经过扩束器后激光光轴方向仅与单模光纤的安置方向有关。激光器输出激光光轴与光纤棒光轴基本同轴时, 经过扩束器后, 激光光束方向相对光纤棒光轴基本不变, 从而降低了更换激光器时的光轴调校难度, 提高了激光器的互换性, 有利于整个光电系统的光轴调校, 从而可缩短更换激光器时激光发射系统光轴的调校时间, 同时还可提高不同使用环境条件下, 激光发射系统首发输出激光光束的指向稳定性;

5) 可使扩束后激光束的能量分布趋于一个较稳定的正态分布, 其光斑中心位置的能量密度大, 周围能量密度小, 无能量空洞, 且能量密度分布沿径向变化缓慢, 因此, 扩束镜起到了对激光束的整形作用。

6) 能够在近距离内, 光斑数倍扩大, 相当于缩短了传统扩束镜的焦距, 进而可减小扩束准直激光发射系统的几何长度, 减小了体积重量, 有利于系统的小型化, 可改变现在使用的激光发射天线的“纵目”现象。

## 2 理论分析

传统的激光发射系统是线性系统, 线性传递函数  $F$ , 激光能量分布变换为

$$E(x, y) = FE(x', y') \quad (1)$$

$E(x', y')$  是激光器输出的激光能量分布,  $E(x, y)$  是经过激光发射系统以后的激光能量分布, 可知传统的光学系统不能改变激光的能量分布, 仅可对激光的能量分布起到等比例的放大作用。

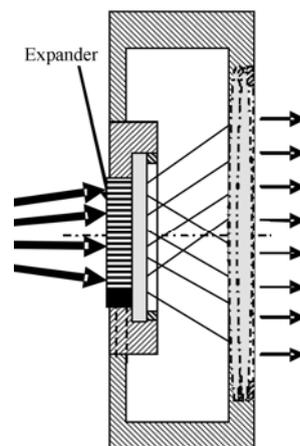


图 1 激光扩束镜的原理

Fig.1 Principle diagram of laser expander

扩束器的工作原理见图 1。图中, 激光器输出激光  $E(x', y')$  在扩束器的输入面直接入射到光纤棒端面和空腔中, 激光经过单根光纤棒 ( $i, j$ ) 和空腔传输后, 在自由空间的传递函数  $\Psi_{ij}(\Phi, \theta, z)$ , 相当于激光能量

$E(x', y')$ 被分配到每根光纤棒和空腔中, 每根光纤棒和空腔中的能量为  $E_{ij}(x', y')$ , 经过扩束器后激光能量分布  $E(x, y, z)$  是对每根光纤棒和空腔的传输能量求和, 为

$$E(x, y, z) = \sum [E_{ij}(x', y') \Psi_{ij}(\Phi, \theta, z)] \quad (2)$$

在扩束器后激光光斑很大时, 每根光纤棒和空腔的位置量可以忽略不计,  $\Psi_{ij}(\Phi, \theta, z)$  与光纤棒和空腔的具体位置无关, 为  $\Psi_{ij}(\Phi, \theta, z)$ . 激光器输出激光的抖动性在扩束器接收面上表现为随着光纤棒和空腔位置  $(i, j)$  的变化, 经过扩束器后, 该抖动性引入的光斑位置变化可忽略不计. 式(2)可写为

$$E(x, y, z) = \Psi(\Phi, \theta, z) \sum E_{ij}(x', y') \quad (3)$$

式中,  $\sum E_{ij}(x', y')$  就是激光器输出的总能量, 常用重复频率激光器的输出总能量的稳定性远远高于激光能量分布的稳定性, 因此可用一个常数  $E_0$  来表示激光器输出能量, 式(3)改为

$$E(x, y) = E_0 \Psi(\Phi, \theta, z) \quad (4)$$

从式(4)可看出: 经过扩束器后的激光能量分布仅取决于经过光纤棒和空腔传输后在自由空间的传递函数  $\Psi(\Phi, \theta, z)$ , 在传输距离  $z$  远远大于光纤棒的直径时, 传递函数  $\Psi(\Phi, \theta, z)$  为正态分布, 在垂直于传输方向  $z$  的平面上为对称分布, 且中心部分的能量大, 周围能量小. 因此, 经过扩束器后的激光能量分布得到了均匀化, 并且传输方向稳定. 起到对激光束进行扩束、整形和稳定光束方向的作用.

### 3 实验结果

用长度 6 mm 的 G625 单模裸光纤, 制作了一个有效口径  $\Phi$  为 8 mm 的扩束器. 用照相机镜头对经过扩束镜扩束的激光光束进行准直. 采用 He-Ne 激光光源对该扩束器指向稳定性进行了实验验证, 结果表明: 在入射角变化 43 mrad 时, 出射激光束方向在像斑内变化为 4.3 mrad. 用 Nd:YAG 激光器, 单脉冲激光能量为 40 mJ, 重复频率为 20 Hz, 聚焦后光斑小于 0.5 mm, 照射扩束器未见明显损伤.

#### 参考文献

- [1] GAO Yan-xia, ZHAO Gai-qing. Stability studies for high energy high intensity laser system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1389-1392.  
高艳霞, 赵改清. 高能量高峰值功率激光系统的稳定性问题研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(8): 1389-1392.
- [2] NAN Yao, JIA Xuan-jun, XIANG Shi-ming, et al. Research on temporal-spatial detector of laser parameters measurement for single pulse[J]. *Opt Tech*, 2006, **32**(3): 472-473.  
南瑶, 贾选军, 向世明, 等. 激光单脉冲时-空采样器研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(3): 472-473.
- [3] NAN Yao, JIA Xuan-jun, XIANG Shi-ming, et al. Equipment of laser parameters for multi pulse[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(2): 145-149, 145-149.  
南瑶, 贾选军, 向世明, 等. 重频激光参数综合测试仪[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(2): 145-149.
- [4] MAO Hong-min, XU Jing, YAN Sheng-lai, et al. Optical path design for Cassegrain laser transmitting system[J]. *J of Appl Opt*, 2008, **29**(2): 216-219.  
毛红敏, 徐静, 演胜来, 等. Cassegrain 激光发射系统的光路设计[J]. *应用光学*, 2008, **29**(2): 216-219.

## Laser Beam Expander for High Power

NAN Yao

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Received date: 2008-11-19

**Abstract:** Laser beam expander based on fiber stick for laser emit antennae loaded high power density was investigated. Laser beam direct stability, shaping, fixed difficult exchanged laser, several problems in the tradition system were discussed. A method of expanding and uniformity laser beam used nakedness fiber stick was proposed. Theoretical rationale of expander and anti-damage that fiber expand laser beam was analyzed. Its advantage was shown. The single-fiber stick expander used in optical transmitter ray for high power laser pulses was designed.

**Key words:** High power; Laser; Expander; Single-fiber; Beam shaping; Direct stability



**NAN Yao** was born in 1964. She received her Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2005. She works at Xi'an Institute of Applied Optics as senior engineer, and her research interests focus on laser parameter metrology.