

基于锥棱镜和波片组合实现的高效偏振转换系统

王 鹏 尚亚萍 李 霄* 许晓军

国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 为了解决高功率线偏振激光器实现难度较大的问题, 基于锥棱镜和波片组合设计了一套高效末端偏振转换系统, 能够实时将自然偏振激光转变成为线偏振激光。能量转换效率达到 97.3%, 消光比由 18.3% 提升到了 99%, 同时保持了较好的远场发散角。实验证明此种偏振转换方案不会影响激光器本身结构, 控制方法简单, 无需外加反馈及控制系统, 性能稳定可靠, 完全可以应用于高功率水平激光器的偏振转换工作。

关键词 激光光学; 偏振转换; 偏振合成; 锥棱镜

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.s116002

High Efficient Polarization-Converting System Based on Combination of Axicon and Wave Plate

Wang Peng Shang Yaping Li Xiao Xu Xiaojun

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract A high efficient terminal polarization-converting system is designed based on combination of axicons and wave plates to transform naturally polarized laser to linearly polarized laser at real time to resolve difficulty of generating high power linearly polarized laser. Energy conversion efficiency is 97.3% with an enhancement of extinction ratio from 18.3% to 99%. The system also keeps excellent far field divergence. The experiment proves that this polarization-converting method will not affect laser structure. The controlling method is, feedback and controlling system is not needed. The property is stable and reliable. It can absolutely be applied to the polarization-conversion of high power laser.

Key words laser optics; polarization conversion; polarization combination; axicon

OCIS codes 220.2740; 220.3620; 230.5440

1 引言

自半导体激光抽运技术诞生以来, 光纤激光器的高效率和高功率输出正在引起激光技术领域的研究热潮。相对于传统固体激光器而言, 光纤激光器无论在光束质量、体积重量、转换效率方面, 还是在热管理、使用寿命、工作性能和系统维护方面, 都具有十分明显的优势, 在远程焊接、三维切割等工业领域和国防领域具有广阔的应用前景^[1,2]。其中高功率线偏振激光更是广泛应用于光纤通信, 国防科技, 科学研究等相关领域中。然而由于在光纤激光器中有着增益介质的热效应, 非线性效应以及应力双折射效应等各种不利因素的影响, 单个激光器很难实现高功率线偏振激光的输出。尤其是在光纤激光器领域, 因为光纤介质极细且长度较长, 其更容易受到外界干扰或产生弯曲, 温度及应力分布导致传输激光发生偏振退化, 造成线偏振激光的功率和光束质量的下降并且会严重影响其稳定性。就目前而言产生线偏振激光的方法主要有以下三种, 一是采用全保偏器件, 利用掺杂保偏光纤设计的光纤激光器结构简单但是掺杂保偏光纤价格昂贵、熔接工艺精度要求高、离子掺杂密度低, 尤其是单模单偏振光纤的带宽受限, 传输损耗大等因素, 使其应用受到了极大的

收稿日期: 2015-01-24; **收到修改稿日期:** 2015-03-09

作者简介: 王 鹏(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: 1169723259@qq.com

导师简介: 许晓军(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大气光学方面的研究。E-mail: 13357319845@189.com

***通信联系人。** E-mail: 94302934@qq.com

限制;二是采用偏振预补偿技术,即在光纤激光放大器前端加入偏振控制器补偿偏振变化,从而保证输出激光长期保持偏振态不变,但是该方案涉及偏振反馈系统,大大增加了激光器结构的复杂性;三是在激光输出后通过波片组合提高其消光比,该方案同样需引入反馈系统,且对自然偏振激光并不适用。

基于以上讨论本文介绍了设计出的一种末端偏振转换方案,在不影响激光器原有结构和功率水平的基础上,在其输出端加入光束整形和高占空比的同轴空间合束系统,使其转变为线偏振激光。此种实验方案在转换过程中功率损耗很小,不影响激光器本身结构,有效地降低了线偏振激光器的成本和复杂性,同时也具有控制方法简单,无需外加反馈及控制系统,性能稳定可靠等优点,完全可以应用于高功率水平激光器的偏振转换工作。

2 实验方案

图 1 所示为基于锥棱镜和波片组合的偏振转换系统示意图。非保偏光纤激光器出射的 1064 nm 自然偏振激光入射到偏振分束镜(PBS)中后分为两束偏振方向相互垂直的线偏振激光,图中黑色小圆代表激光的偏振方向与纸面相垂直,竖直箭头代表激光的偏振方向与纸面相平行。其中一路线偏激光经双锥棱镜变为环形光束,光束偏振方向保持不变,环形光束再经过一个半波片,调节半波片角度,使其经过 PBS 的透射光基本消失或者达到最小,即使得环形光束的偏振方向改变 90° ,与另一束高斯光束的偏振方向相同,同时使其传播方向也改变 90° 。另一束高斯光束直接经由一个全反镜 M_1 与环形光束在合束镜 M_2 处汇合,两者偏振方向相同。环形光束被合束镜全反射而实心高斯光束则无阻碍的透过合束镜,从而两者发生合束,合并为一束激光出射且出射激光为线偏振激光。在合束镜后可加光斑分析仪或光束质量分析仪来分析合束效果。

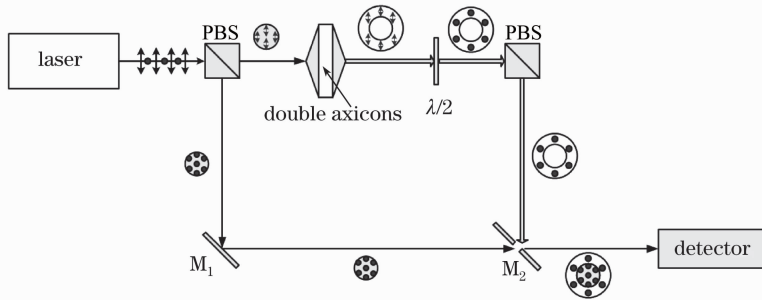


图 1 锥棱镜偏振转换系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polarization-converting system using axicon

3 理论分析及数值模拟

在几何光学中实现高斯光束至环形光束的转变方式有很多种,Chavez-Cerda 等^[3]曾利用环缝-透镜法产生的两束贝塞尔光的干涉得到环形光束,但是此种方法产生的贝塞尔光效率很低(仅为 15%)。为了提高转换效率,Ahluwalia 等^[4]利用不同的梯度锥棱镜产生周期再现的环形光束,但这种梯度锥棱镜不易加工。锥棱镜产生环形光束的方法具有装置简单,转换效率高^[6],且抗损伤阈值高^[7]等显著优点,此外锥棱镜的相关特性已经得到深入研究^[8-10]。故利用锥棱镜对其中一束线偏振激光进行光束整形。当一束平行光垂直入射到无限大孔径的锥棱镜上,输出为锥面波,可以无扩散的传播到很远的距离,这里的“无扩散”是指中心光斑尺寸不随传播距离的增加而扩大,但是在实际情况中,锥棱镜的孔径总是有限的,所以只能使得锥面波在有限的距离内无扩散的传播。因此高斯光束经过锥棱镜变换后,形成两个分布区,一个是近似零阶贝塞尔光束区,另一个是空心光束区,即高斯光束经过锥棱镜变换后可得到近似零阶贝塞尔光束和空心光束。利用两个锥棱镜可以使高斯光束转变成为平行出射的类双高斯空心光束。这一几何光学方法的原理较为简单:当一高斯光束通过棱镜的第一个顶点折射后,被分束为一发散的空心光束;再经过棱镜的第二次折射后,从另一端产生一束近似平行的面包圈环形光束。图 2 为高斯光束通过单锥棱镜和双锥棱镜的光路示意图。

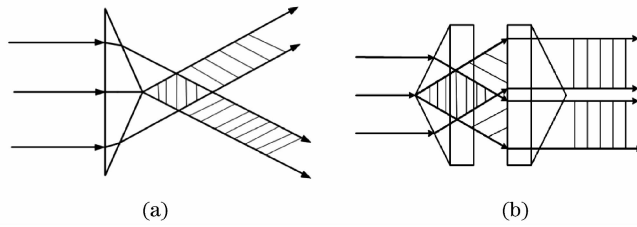


图 2 高斯光束通过锥棱镜光路示意图。(a) 单锥棱镜；(b) 双锥棱镜

Fig. 2 Schematic diagram of Gaussian beam passing through axicon. (a) Single axicon; (b) double axicons

采用 Zemax 对高斯光束通过双锥棱镜产生环形光束以及高斯光束和环形光束合束进行了模拟,模拟情况如图 3 所示,可以看出此种偏振转换方案在理论上可行的。同时此种偏振转换方案实现的线偏振激光具有轴对称特性,远场传播之后能保持较好的光强分布,与直接将两束线偏激光进行合束相比,具有更好的应用价值。

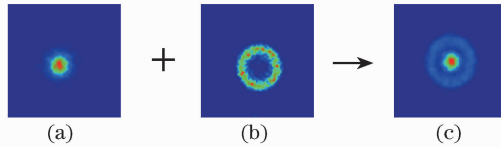


图 3 光强分布的 Zemax 模拟结果。(a) 高斯光束光强分布；(b) 环形光束光强分布；(c) 合束光光强分布

Fig. 3 Simulation of intensity distribution using Zemax. (a) Intensity distribution of Gaussian beam; (b) intensity distribution of hollow beam; (c) intensity distribution of combined beam

4 实验结果

4.1 偏振转换系统功率保持性

实验中所使用的锥棱镜底面直径为 25.4 mm,锥角为 140°。实验中固定一个锥棱镜,另一个则放置于具有三维调节功能的组合升降台上。调节两个锥棱镜共轴等高以及两者之间的距离可以产生大小可变的空心光束。所使用的合束镜是一片 1064 nm 全反镜,直径为 25.4 mm,镜子中心有一个沿 45°方向的圆形小孔,小孔直径为 2 mm。这样可保证入射到前表面的 1064 nm 激光被完全反射而从后方入射的 1064 nm 激光能无阻碍的通过合束镜使得两个光束发生合束。所采用的激光器是 20 W 非保偏 1064 nm 脉冲光纤激光器。为了检验此偏振转换系统的功率保持情况,分别对系统各部分的功率大小做了测量,测量结果如图 4 所示。从图 4 可以看出此偏振转换系统的能量转换效率 η 达到 $\eta = 18.68/19.20 = 97.3\%$,能量转换效率很高,近于无损转换。同时还测量了激光转换前后消光比,转换前后消光比为

$$P_1 = \frac{11.3 - 7.8}{11.3 + 7.8} \times 100\% = 18.3\%, P_2 = 99\%. \quad (1)$$

综上所述通过此偏振转换系统自然偏振激光近乎于无损地转换成了线偏振激光。

4.2 光强分布及光束质量保持性

利用 M^2 测量仪测量了高斯光束,环形光束以及合束线偏激光的光强分布及光束质量情况。图 5~图 7 分别是三者在近场和远场的光强分布。

从图 6 可以看出高斯光束经由双锥棱镜产生了环形光束,其随着传输距离的增大,光斑逐渐发散且中心暗斑面积减小,当传输到远场时其中心暗斑区域完全消失,轴上光强变为最大且在中心边缘出现衍射环,与文献[11]结论一致,说明其产生了类双高斯空心光束。从图 7 可以看出高斯光束与环形光束产生了合束效果,产生了线偏振激光,其近场光强分布与 Zemax 仿真结果相似。

合束线偏激光的光束质量采用 M^2 因子评价。分别用 M^2 测量仪测量了入射高斯光束,环形光束,合束线偏激光的光束质量,其测量大小如表 1 所示。

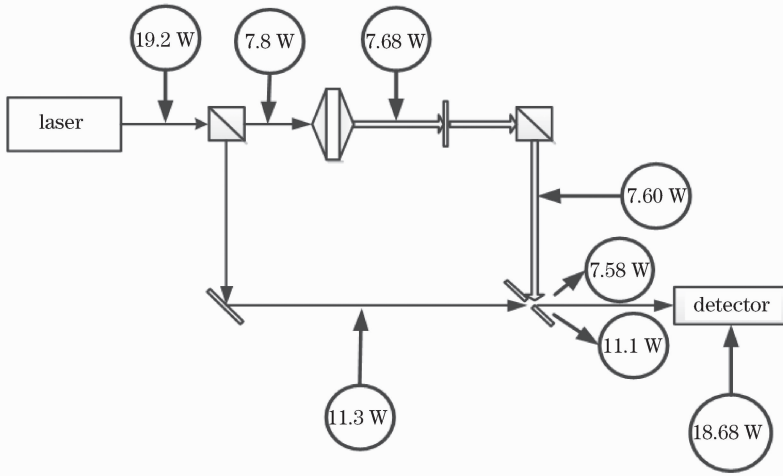


图 4 偏振转换系统功率保持情况

Fig. 4 Power-keeping condition of polarization-converting system

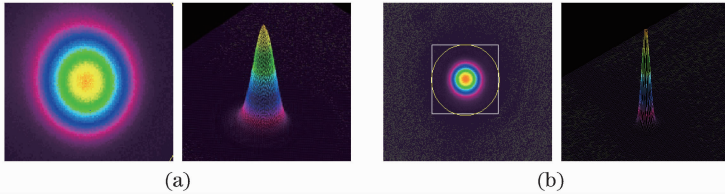


图 5 高斯光束光强分布。(a) 近场;(b)远场

Fig. 5 Intensity distribution of Gaussian beam. (a) Near field; (b) far field

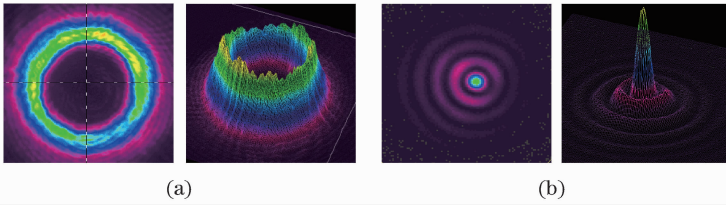


图 6 环形光束光强分布。(a) 近场;(b)远场

Fig. 6 Intensity distribution of hollow beam. (a) Near field; (b) far field

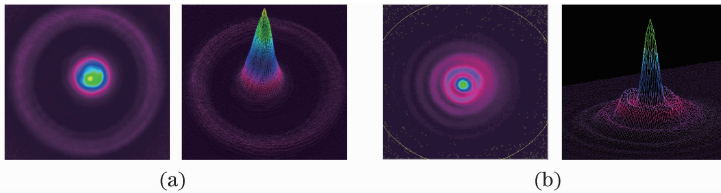


图 7 合束线偏激光光强分布。(a) 近场;(b)远场

Fig. 7 Intensity distribution of combined linearly polarized laser. (a) Near field; (b) far field

表 1 M^2 测量结果

Table 1 Measuring result of M^2

	Gaussian beam	Hollow beam	Combined beam
M_x^2	1.228	9.713	5.916
M_y^2	1.275	10.129	5.725

从表 1 可以看出若以 M^2 因子来衡量光束质量那么合束线偏激光相对于入射高斯光束来说光束质量下降很多,从一倍衍射极限下降到了接近六倍衍射极限。 M^2 定义如下:

$$M^2 = \frac{\omega m_0 \theta_m}{\omega_0 \theta_0}, \quad (2)$$

M^2 采用理想高斯光束作为参照比较标准而由于合成光束并不呈高斯型分布而且 M^2 因子要求光束截面的光强分布不能有陡直边缘,因此对于此种合束情况不宜用 M^2 进行评价。而光束远场发散角 θ 能够反映合成系统远场光斑的能量集中度,因此计算了三个光束的远场发散角 θ ,其大小如表 2 所示。

表 2 远场发散角 θ 测量结果
Table 2 Measuring result of far field divergence θ

	Gaussian beam	Hollow beam	Combined beam
θ_x/mrad	0.271	0.343	0.316
θ_y/mrad	0.273	0.340	0.297

从表 2 可以看出若用 θ 来评价光束质量那么相对于入射高斯光束而言合束线偏激光光束质量保持较好,因此在着重于远场发散角而不是 M^2 的情况下此合束方式是能够保持较好的光束质量传递的。

5 结 论

基于锥棱镜和波片组合提出设计了一种新型偏振转换及合成系统,将光纤激光器出射的自然偏振激光转变成成为线偏振激光,能量转换效率达到 97.3%,消光比由 18.3% 提升到了 99%,同时具有较好的远场发散角保持特性,此种偏振合成方案不会影响激光器本身结构,能够有效地降低线偏振激光器的成本和复杂性,同时控制方法简单,无需外加反馈及控制系统,性能稳定可靠,完全可以适用于高功率水平激光器的偏振转换工作。

参 考 文 献

- Zhou Pu, Wang Xiaolin, Ma Yanxing, *et al.*. Stable coherent beam combination by active-phasing a mutual injection-locked fiber laser array [J]. *Opt Lett*, 2010, 10(7): 950-952.
- Li Yongzhong, Fan Dianyuan. Beam combining of fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 42(9): 26-29.
李永忠, 范滇元. 光纤激光器光束的叠加技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(9): 26-29.
- Chavez-Cerda S, Tepichin E, Meneses-Nava M A, *et al.*. Experimental observation of interfering Bessel beams[J]. *Opt Express*, 1998, 3: 524-529.
- B P S Ahluwalia, W C Cheong, X C Yuan. Design and fabrication of a double-axicon for generation of tailorable self-imaged three-dimensional intensity voids[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(7): 987-989.
- Wu Fengtie, Jiang Xinguang, Liu Bin, *et al.*. Single Bottle beam generated by a double axicon [J]. *Acta Phys Sin*, 2009, 48(4): 2410-2415.
吴逢铁, 江新光, 刘 彬, 等. 衍射双轴棱锥产生单个 Bottle beam[J]. *物理学报*, 2009, 48(4): 2410-2415.
- Zeng Xiahui, Wu Fengtie, Liu Lan. The description of bottle beam based on the interferential theory[J]. *Acta Phys Sin*, 2007, 56(2): 791-797.
曾夏辉, 吴逢铁, 刘 岚. 干涉理论对 bottle beam 的描述[J]. *物理学报*, 2007, 56(2): 791-797.
- Wu Fengtie, Chen Yinbin, Guo Dongdong. Nanosecond pulsed Bessel-Gauss beam generated directly from a Nd:YAG axicon based resonator[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(22): 4943-4947.
- Brzobohaty O, Cizmar T, Zemanek P. High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon[J]. *Opt Express*, 2008, 16: 12688-12700.
- Jiang Xinguang, Wu Fengtie. Influence of a stigmatism on the diffraction property of the axicon and its correction[J]. *Acta Phys Sin*, 2008, 57(7): 4202-4207.
江新光, 吴逢铁. 像散对轴棱锥衍射特性的影响与修正[J]. *物理学报*, 2008, 57(7): 4202-4207.
- Chen Baosuan, Pu Jixiong. Propagation of Gaussian-Bessel beams in turbulent atmosphere[J]. *Chin Phys B*, 2009, 18(3): 1033-1039.
- Zhao Huajun, Cheng Zhengfu, Wu Qiang. Propagation properties of annular laser beam[J]. *Journal of Chongqing University of Arts and Sciences (Nature Sciences Edition)*, 2006, 5(4): 8-10.
赵华君, 程正富, 吴 强. 双高斯空心光束的传输特性分析[J]. *重庆文理学院学报(自然科学版)*, 2006, 5(4): 8-10.

栏目编辑: 韩 峰