

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0162-05

空心光束变换器在三路激光合成中的应用

杨文是¹ 秘国江¹ 毛小洁¹ 闫秀生² 王 旭¹ 邓明发¹ 钟国顺¹ 陈亚楠²

(¹ 固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015)
(² 东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

摘要 激光合成技术旨在将几个分立的激光光束合成为一个同轴光束, 实现数倍于单个激光器功率的激光输出。设计了一种新型的空心光束变换器, 可将 N 路 ($N \geq 3$) 激光合成为一个同轴光束, 并进行了数值计算和实验研究。将此技术应用于三光束合成, 获得了激光合成效率 89%, 时间同步精度误差不大于 2 ns, 激光合成脉宽约 10 ns, 激光光束发散角不大于 2 mrad 的实验结果。

关键词 光学器件; 光束合成; 空心光束变换器; 合成效率

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0162

Application of Hollow Beam Converter in Three-Way Synthesis Laser System

Yang Wenshi¹ Bi Guojiang¹ Mao Xiaojie¹ Yan Xiusheng² Wang Xu¹
Deng Mingfa¹ Zhong Guoshun¹ Chen Yanan²

(¹ National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, Beijing 100015, China)
(² Northeast Research Institute of Electronic Technology, Jinzhou, Liaoning 121000, China)

Abstract Laser synthesis aims at synthesising a number of discrete laser beams into a coaxial beam to achieve higher output power which is several times of that of a single laser to achieve the higher output power. A novel hollow beam converter is designed, which can be used in N ($N \geq 3$) way coaxial laser beam synthesis, and the numerical calculation and experimental study are done. Using this technology in the three-beam synthesis, laser synthesis efficiency is 89%, the time jitter is no more than 2 ns, laser pulse-width reaches about 10 ns (FWHM), and laser beam divergence angle is no more than 2 mrad.

Key words optical devices; beam synthesis; hollow beam converter; synthesis efficiency

1 引 言

激光合成主要是指多个波长相同或相近的激光束的合成。比较典型的激光光束合成方法主要有几何光学合成法、双光束偏振合成法和相干合成法^[1]等几种类型。另外, 还有利用受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)、四波混频(FWM)和布里渊增强四波混频(BEFWM)等非线性光学效应实现光束的相干合成, 但仅限于科学实验, 并未达到实际应用。国外进行光束合成的研究较多, 典型的是在美国陆军和空军支持的战术高能武器项目中,

2004 年承包商诺斯罗普格鲁曼空间技术公司把两路 12.5 kW 的光束采用光学相干合成为单路 25 kW 的光束。其目标是三年内把 8 路光束采用几何合成的方法, 合成为 100 kW 的单束光。此外还采用了变形镜等光学畸变矫正措施, 以求获得好的光束质量^[2]。

国内这方面的研究较少, 21 世纪初中国电子科技集团公司第十一所科研项目“高功率 YAG 激光复合技术”和“高效大能量固体激光器”采用偏振耦合方案进行过激光合成技术研究, 并研制成两台样

收稿日期: 2010-01-20; 收到修改稿日期: 2010-03-17

作者简介: 杨文是(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事激光技术方面的研究。E-mail: w_syang@126.com

机。其中一台加倍频系统后输出绿光,中国科学院上海天文台用作空间碎片探测研究的光源,取得了较好的实验结果。但偏振耦合技术仅限于两束线偏光的合成,无法用于三束光以上的合成。近年来,国内外逐渐向多光束^[3]、高功率、同轴合成和相干合成方向发展^[4,5],但迄今为止还很少有关于这些新型合成技术的报道。

本文考虑到光束合成中要满足时间同步、合成光束同轴等要求,设计了一种新型的空心光束变换器,可把实心光束变换为环状光束,并利用特殊 45° 反射镜合成的新技术。此项技术解决了三束以上激光光束的合成问题,其成果也可用于其他类别、其他波长激光光束的合成。并用新型的光束变换器进行了三路 Q 脉冲 YAG 激光束($1.06 \mu\text{m}$)合成的实验研究,实现了数倍于单个激光器功率的激光输出,并在时间上实现精确同步,获得了好的实验结果。

2 工作原理与数值模拟

2.1 工作原理

将实心激光高斯光束变换成空心高斯光束的光束变换器是系统中最为关键的光学器件,其研制周期长,加工精度高。众所周知,对于光学器件,平面、球面和柱面等易加工,而锥面加工,角度、面型和光洁度等误差大,极易造成光束畸变,发散角增大。开始采用了一个 45° 圆台中间挖去一个 45° 圆锥的一体式空心光束变换器,通过内、外两个同轴 45° 锥面的两次内全反射实现圆光斑到环状光斑的转换,如图 1 所示。入射光经两次反射变换成环带光束,但是两次反射成倍放大了两个锥面的加工偏差,严重影响变换后的光束质量,实验发现发散角不小于 8 mrad 。

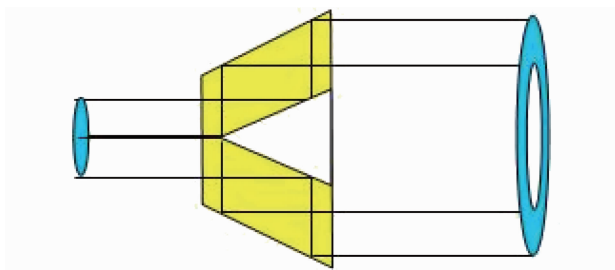


图 1 一体式空心光束变换器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the integrated hollow beam convertor

采用光线折射结构,克服了一体式空心光束变换器的缺陷,设计了新型的一对分离式光学锥镜的空心光束变换器,工作原理如图 2 所示。此新型光束变换器,靠光线折射产生环状光带,加工误差几乎没被放大。同时,内外锥的角度由直角变为钝角,加工难度减小。

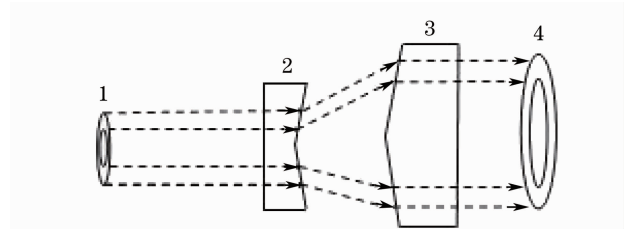


图 2 空心光束变换器结构及原理示意图

Fig. 2 Structure diagram of the hollow beam convertor

变换器为角锥折射镜。图 2 中,1 为圆状光束;2 为“负透镜”棱锥,输入面为平面,输出面为内(凹)锥面;3 是输入面为外(凸)锥面、输出面为平面的“正透镜”棱锥;4 为扩束后的空心高斯光束。为达到最佳变换效果,要求变换器两锥体的内、外两折射面要严格平行。另外,由于变换器内反射面锥体顶点处对入射光具有不确定方向的反射或透射效果,光束变换后会造成较大的能量损失。加工过程中,锥体顶点加工缺陷要尽可能地小,尽量减小光束变换引起的激光能量的损失,从而提高光束合成的转换效率。

2.2 数值模拟

改变光束变换器的“负透镜”和“正透镜”两个锥体之间的间距,决定了变换后光束的内径尺寸。实际设计时,则通过调整这两个参数来获得最佳的转换效果。

当变换器材料是 K9 玻璃时, $n=1.51637$,图 2 中 2,3 顶角凹、凸均为 136° 时,用 Tracepro 软件进行光线追迹,模型如图 3(a)所示。

入射光斑均匀,直径为 6 mm ,如图 3(b)所示。当变换镜距离为 24.39 mm 时,出射光斑(环状)直径为 19 mm ,强度分布如图 4 所示,整个变换过程中的各个位置的光强分布如图 5 所示。

经过近一年的精细研磨,反复修正,终于选出两套达到技术指标的分离式空心光束变换器。空心光束变换器装配好后的实物如图 6 所示。

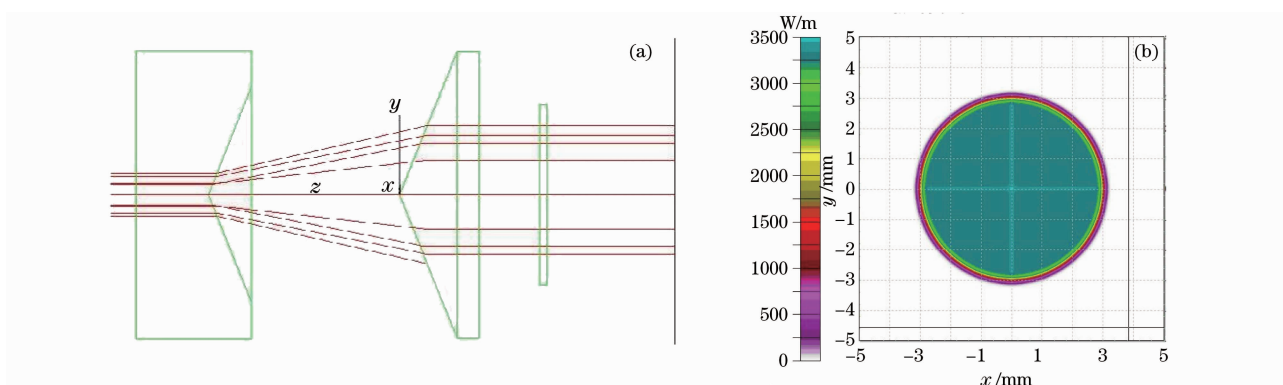


图 3 光线追迹模型(a)及入射光斑(b)

Fig. 3 Model of ray tracing (a) and incident laser spot (b)

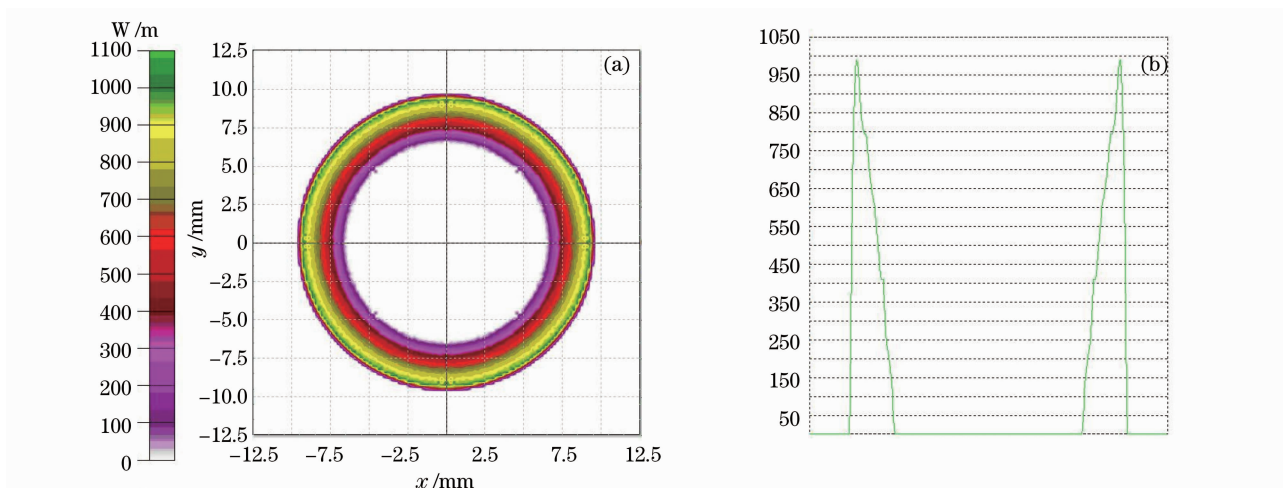


图 4 出射环状光斑(a)及光强分布(b)

Fig. 4 Ringlike distribution of the emergent laser spot (a) and intensity distribution (b)

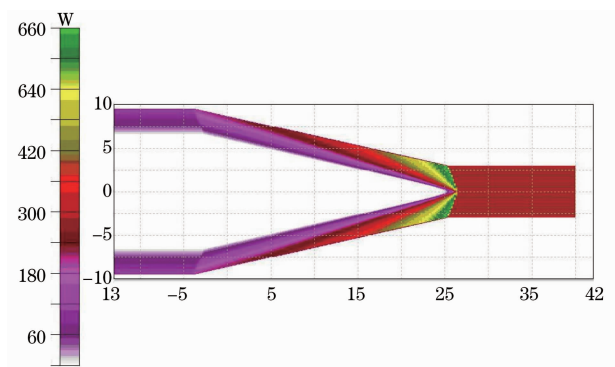


图 5 变换过程中各位置的光强分布

Fig. 5 Laser intensity distribution during the converting



图 6 空心光束变换器

Fig. 6 Hollow beam convertor

3 实验装置及实验结果

3.1 实验装置

三路激光合成的最终光路如图 7 所示,图中的 12,13 为中间椭圆区域大小不同的 45° 增透,边上为

45° 反射的两个“空心反射镜”,和光束变换器配合实现三路激光的合成。此外,此系统还采用了三路同步辐射技术,实现三路 Nd:YAG 固体激光器同步输出。

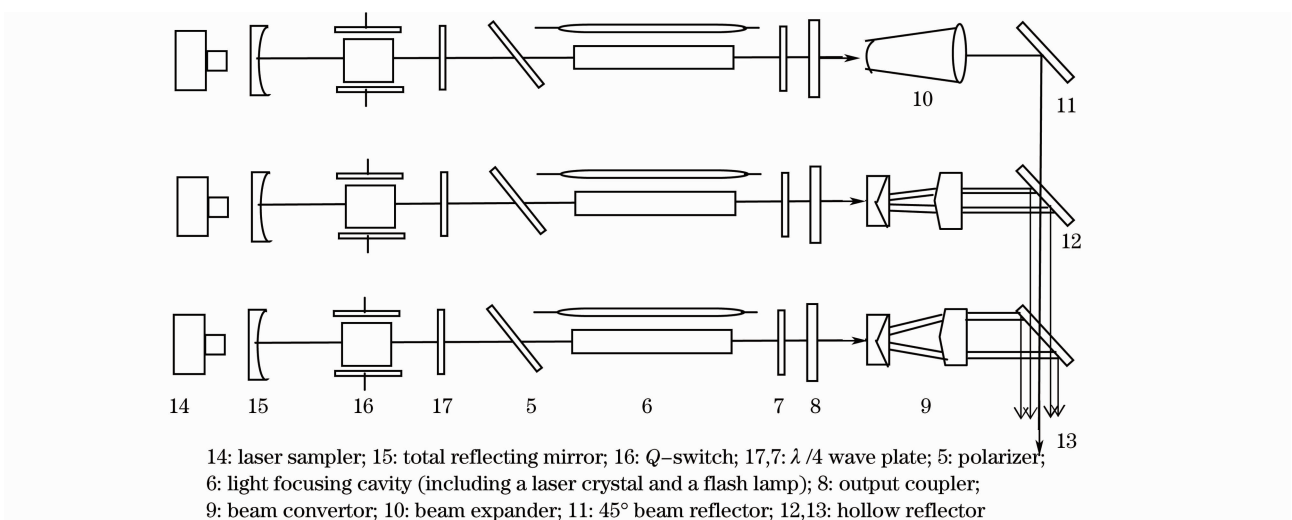


图 7 三路 YAG 激光合成光路示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the three-way YAG laser synthesis technique

利用光束变换器和反射镜组件即可完成图 7 所示的光束合成。三台激光器输出光斑均为 7 mm，则激光器 2 光路上空心光束变换器两个锥体的距离为 22.4 mm 时，空心光斑扩束为外径 18 mm，空心内径 11 mm；激光器 3 光路上空心光束变换器两个锥体的距离为 44.7 mm 时，空心光斑扩束为外径 29 mm，空心内径 22 mm；此时三路光束通过光束变换器和反射镜组件合成直径为 29 mm 的环状光斑。

3.2 实验结果

3.2.1 激光脉冲宽度

激光器在 20 Hz 工作状态下，3 路测量结果分别为 8.5, 8.9 和 8.4 ns。合成后的激光脉冲宽度为 9.805 ns。示波器测得的 3 路波形分别如图 8(a)~

(c) 所示，合成后的波形如图 8(d) 所示，可见合成后激光脉冲宽度稍有展宽。

3.2.2 脉冲同步精度

激光器正常工作时，把三路激光的脉冲光电信号分别连接到示波器的三个通道；以第一路激光脉冲波形的上升沿为基准，用示波器分别测量第二路、第三路激光脉冲上升沿与第一路激光延时如图 9 所示，第一路激光与第二路激光、第一路激光与第三路激光脉冲前沿的抖动分别为 0.086 ns 和 0.424 ns。100 个脉冲的平均延时抖动不大于 2 ns。

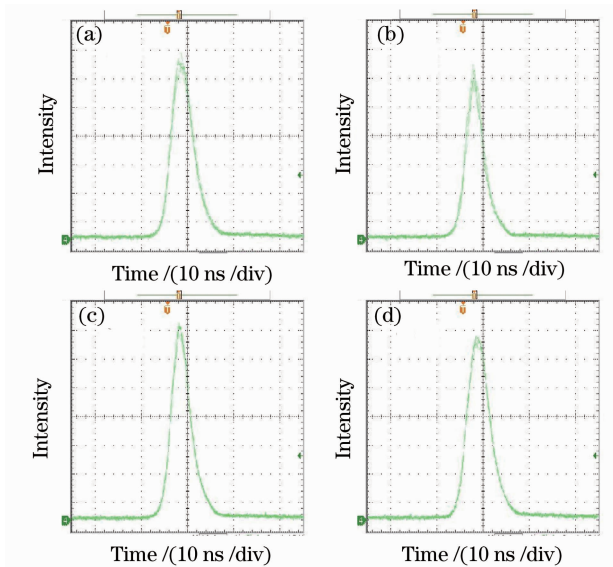


图 8 3 路激光及合成后的脉冲宽度

Fig. 8 Pulse width of each laser and the synthesized laser

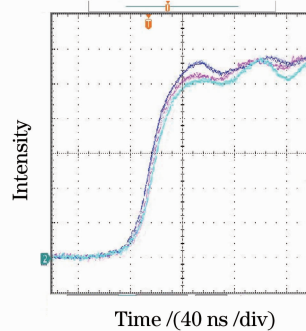


图 9 脉冲同步精度的测量

Fig. 9 Measurement of the pulse synthesizing accuracy

3.2.3 合成光束发散角

光斑第一路实心光束、第二、三路环带光束用 1 m 透镜聚焦后，用光束分析仪测得束腰处光斑分别如图 10(a)~(c) 所示，图 10(d) 为合成后的光斑，光束发散角为 1.338 mrad，其中 $\bar{x} = 1.267$ mrad， $\bar{y} = 1.408$ mrad。图中聚焦光斑成菱形，是由于变换成环状光斑后，光斑较大，透镜聚焦引起的像畸变。

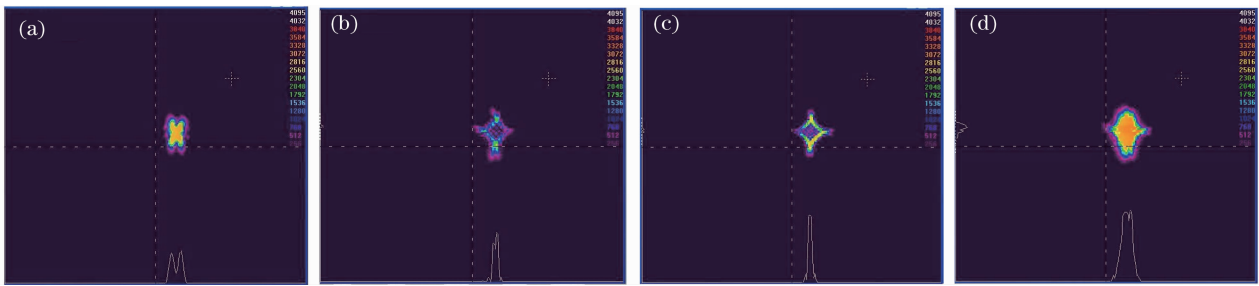


图 10 三路激光及合成后的远场光斑

Fig. 10 Laser spot of each laser and the synthesized laser in far field

三路激光合成的出口激光光斑如图 11 所示,直径为 29 mm,与数值计算结果一致。

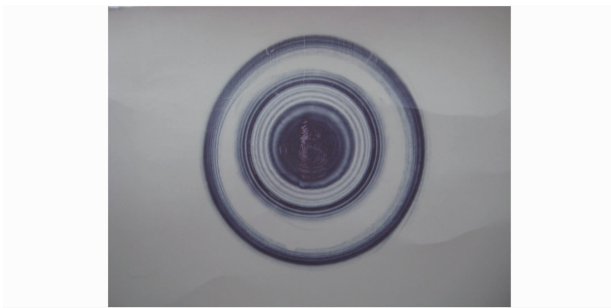


图 11 合成光束近场光斑

Fig. 11 Laser spot of the synthesized laser in near field

3.2.4 单路激光脉冲能量与合成效率

激光器工作在重复频率 20 Hz 时,用激光能量计(EPM1000)分别测量每路激光光学变换前的脉冲能量,分别为 161.8,199.7 和 194.4 mJ。测量合成后激光的单脉冲能量为 494.9 mJ,合成效率高达 89%。

4 结 论

新型的空心光束变换器应用于 3 光束合成,获得了 89% 的激光合成效率,时间同步精度误差不大

于 2 ns,激光合成脉宽约 10 ns,激光光束发散角不大于 2 mrad 的实验结果。此成果也可用于 N 路其他类别、其他波长的强激光光束的合成,从而解决目前强激光干扰装备急需的大功率激光源问题。

参 考 文 献

- 1 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu *et al.*. Experimental research of coherent combining of three fiber amplifiers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12): 6464~6469
肖 瑞, 侯 静, 姜宗福等. 三路光纤放大器相干合成技术的实验研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(12): 6464~6469
- 2 Huang Zhonglun, Guo Jing, Fu Youyu. Various methods for evaluating laser beam quality [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(3): 1~3
黄忠论, 郭 劲, 付有余. 评价激光光束质量的各种方法[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(3): 1~3
- 3 Zhao Na, Tang Chun, Xie Gang *et al.*. Numerical simulation on coherent combination of multi-beam super-Gaussian laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1): 1779~1782
赵 娜, 唐 淳, 谢 刚等. 多束超高斯激光相干合成的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1): 1779~1782
- 4 T. Y. Fan. Laser beam combining for power and brightness scaling[C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000, **3**: 49~54
- 5 M. Wickham, J. Andergg, S. Brosnan *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *California: Stanford Photonics Annual Meeting*, 2003, 23~24