

基于混合合束的复合激光系统

龙井宇 卜英华 穆让修 李刚 张佳 寿少峻

Compound laser system based on hybrid beam combination technology

LONG Jingyu, BU Yinghua, MU Rangxiu, LI Gang, ZHANG Jia, SHOU Shaojun

引用本文:

龙井宇, 卜英华, 穆让修, 等. 基于混合合束的复合激光系统[J]. 应用光学, 2024, 45(1): 26–32. DOI: 10.5768/JAO202445.0101004

LONG Jingyu, BU Yinghua, MU Rangxiu, et al. Compound laser system based on hybrid beam combination technology[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(1): 26–32. DOI: 10.5768/JAO202445.0101004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0101004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光谱合束技术的透射光栅模拟设计

Simulation design of transmission grating based on spectral beam combining technique

应用光学. 2017, 38(3): 514–520 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0308002>

偏振相移与相位共轭结合的散射光聚焦技术研究

Focusing of scattering light by combining polarization phase shifting and digital optical phase conjugation

应用光学. 2019, 40(1): 63–67 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101011>

地平式离轴扩束光学系统装调技术

Assembly technology of alt-az off-axis beam expanding optical system

应用光学. 2018, 39(4): 563–568 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0405002>

基于传像束的小视场双目结构光三维形貌恢复

3D shape restoration of binocular structure light in small field of view based on image bundles

应用光学. 2021, 42(1): 113–118 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0103003>

渐进多焦点镜片波前像差的扩束测量方法

Method for measuring wavefront aberration of progressive multi-focus lens based on beam expanding system

应用光学. 2018, 39(1): 88–92 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0103002>

45° 光纤微反射镜聚焦离子束加工及多轴位移检测研究

Research on focused ion beam processing of 45 optical communication fiber mirror and multi-axis displacement detection

应用光学. 2021, 42(3): 557–564 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0308001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 01-0026-07

基于混合合束的复合激光系统

龙井宇, 卜英华, 穆让修, 李 刚, 张 佳, 寿少峻

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 采用偏振合束与光谱合束相结合的方式, 实现了 4 种近红外激光束的空间合成, 包括固体纳秒脉冲激光、高功率连续光纤激光、高重复频率纳秒脉冲光纤激光和亚毫秒 (长脉冲) 光纤激光。开发了仿真软件对偏振合束器、光谱合束器及各激光器的光谱特征和偏振特性等主要相关参数进行设计优化, 基于仿真结果研制了由上述 4 种激光系统和一套偏振/光谱合束链路构成的复合激光系统。系统的合束效率可达 93.9%, 实现了近红外波段多种脉冲和连续激光束的共轴发射, 该系统可用于研究激光与物质相互作用的合作效应。

关键词: 偏振合束; 光谱合束; 混合合束

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0101004

Compound laser system based on hybrid beam combination technology

LONG Jingyu, BU Yinghua, MU Rangxiu, LI Gang, ZHANG Jia, SHOU Shaojun

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

Abstract: The spatial combination of four near-infrared laser beams was demonstrated by combining polarized beam and spectral beam, which included solid nanosecond pulse laser, high-power continuous wave (CW) fiber laser, high repetition rate nanosecond pulse fiber laser and sub-millisecond (long pulse) fiber laser. The simulation software was developed to design and optimize the main relevant parameters such as spectral characteristics and polarization characteristics of polarization beam combiner, spectral beam combiner and each laser. Based on the simulation results, a compound laser system composed of the above four laser systems and a set of polarization/spectral beam combination links was developed. The beam combination efficiency of the system is up to 93.9%, which realized the coaxial emission of multiple pulses and CW laser beams in the near-infrared band. The system can be used to study the cooperative effect of the laser-material interaction.

Key words: polarization beam combination; spectral beam combination; hybrid beam combination

引言

激光与物质相互作用的研究是激光技术领域的一个重要方向, 单一波长或者单一脉冲宽度 (或者连续激光) 的激光与物质相互作用的宏观现象、微观机理、激光诱导损伤的阈值等方面已经取得大量的研究成果。近年来, 研究中发现, 在连续激光和脉冲激光同时辐照的作用下, 某些宏观效应阈值会发生显著变化, 这表明连续激光与脉冲激光存在耦合效应。复合激光束与物质相互作用的微观机理与单一激光束辐照时的微观机理存在差异^[1-4]。用于研究激光耦合效应的激光源通常包括

2 个以上不同类型的激光器。实验中, 为了实现空间上的能量叠加, 将激光束从不同方向入射到效应物, 这样的装置体积庞大, 且不利于各激光束参数的同步调整与测量。

激光光束合成可以获得具有单光束传输特性并具有更高总输出功率和亮度的新光束。近年来, 激光合束技术在众多高功率、高光束质量激光系统的应用诉求的推动下, 在相关光学器件, 如光栅的发展推动下, 获得了迅速发展。提出并实现了多种光束合成的方法^[5-10], 这些方法包括相干合束 (coherent beam combining, CBC)、波长 (光谱) 合

收稿日期: 2022-06-28; 修回日期: 2023-10-09

作者简介: 龙井宇 (1979—), 男, 高级工程师, 主要从事激光技术研究。E-mail: jylong2000@sina.com

束(wavelength beam combining, WBC)、非相干合束(incoherent beam combining)及混合合束(hybrid beam combining, HBC)。

本研究基于光束合成技术和光纤激光器技术,将不同时域特征的线偏振激光束配置于不同偏振方向,同时将不同时域特征的激光束配置于不同的中心波长,进而采用偏振/光谱混合合束方式,将这些不同体制及光谱波段的激光合成一束。该合束系统具有传输效率高、光束质量良好和空间共轴特性,可用于激光与物质相互作用研究以及军事领域的复合激光对抗等,有着广泛的应用前景。

1 混合合束激光系统组成

混合合束激光系统由合束系统和4个激光器单元构成。合束系统包含2个偏振合束单元和一个光谱合束单元。系统的结构和光路布局如图1所示。2个偏振合束单元选用45°偏振合光平片,中心波长分别为1064 nm和1090 nm。在偏振合光平片2个输入面前方设置零级半波片,其作用是调整入射偏振光的偏振方向与合光平片的p光或者s光方向重合,以获得最大的合束效率。光谱合束单元由一个长波通截止滤光片和一个10°反射镜构成,前者对1064 nm±5 nm波段具有高反射率,同时对1090 nm±5 nm波段具有高透射率。在每个光束准直器和波片之间安装双光楔,用于微调光束指向。双光楔结合光斑中心位置检测系统实施精密装调,确保激光束之间的平行性精度。

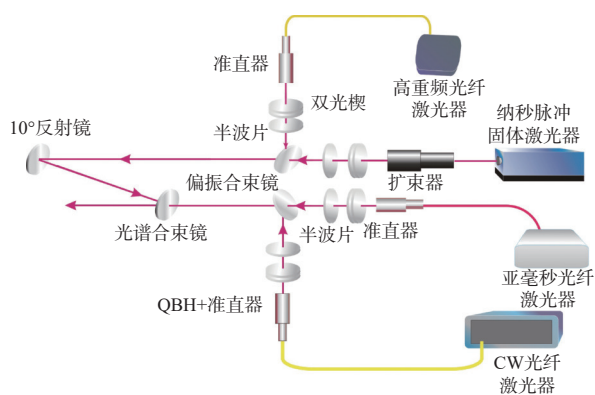


图1 复合激光系统光学布局图

Fig. 1 Optical layout diagram of compound laser system

4个激光器单元包含连续激光器,亚毫秒激光器,高频脉冲激光器和纳秒脉冲激光器。连续激光束和亚毫秒激光束通过一个偏振合束单元合为一束,高频脉冲激光束和纳秒脉冲激光束通过另

一个偏振合束单元合为一束,两组合成光束再通过光谱合束单元合为一束。

2 合束系统的设计及激光器参数优化

2.1 合束器件选型

偏振合束采用多层介质膜偏振合束镜。该器件的优点是工作波长设计灵活,孔径大,损耗低。可供选择的薄膜偏振合束器件包括棱镜型和平板型两类。合光棱镜的两块直角棱镜一般通过光胶进行黏合,黏合的坚固程度受限于棱镜的尺寸,不利于大通光孔径的实现,也增加了强激光辐照时发生损伤的风险。平板型偏振合束镜(polarization beam plate)是基于薄膜材料的p偏振光和s偏振光的有效折射率不相等这一条件设计的,p偏振光的高透射率和s光的高反射率均是通过干涉效应实现的。平板型合束镜的p光入射面不镀膜,由于是单片设计,仅有一个面镀膜,并可以采用高损伤阈值的硬质薄膜,因而平板型偏振合束镜具有更高的光传输效率和激光损伤阈值。

光谱合束器一般可采用截止滤光片、光栅和棱镜等。截止滤光片(interference filter)是指具有某一波段范围的光束高透射,而偏离这一波段的光束骤然变化为高反射特性的滤光片,涉及2个主要波段的截止滤光片也叫双色镜。本研究采用平板型偏振合束镜和双色镜构建混合合束系统。

2.2 合束效率仿真和激光器参数优化

合束器件物理上相当于滤波器,光谱合束器是单纯的光谱滤波器,偏振合束器是光谱滤波器叠加一个检偏器。本系统采用的合束器件本质上都是基于光学薄膜技术,采用膜系设计软件可生成一系列这样的滤波器,对合束所需的膜系进行设计和优化,约束条件包括激光束的中心波长、谱线宽带和偏振消光比。同时,激光器的光谱线型函数也可以利用计算机生成,对于光纤激光器采用高斯型光谱线型,对于固态激光器采用洛伦兹线型。数据由Python的Numpy模块生成,并作为滤波器模块的输入信号。

使用TFCalc软件对薄膜干涉滤光片的膜系进行设计仿真,设计的合束器件透射率和反射率随波长及偏振态变化的函数数据,将作为输入传递给等效滤波器,优化程序计算合束效率,这一步可以迭代优化激光束参数。理论上,足够窄的光谱宽度和足够高的偏振消光比可以获得所需的合束效率。

典型的偏振分光膜具有大于 99% 的 s 光反射率和大于 95% 的 p 光透过率,并具有超过 10 nm 的带宽。可以这样认为,在系统涉及的激光光谱范围内,反射(或透射)曲线是平坦和一致的,在效率仿真中,可以仅考虑激光偏振消光比的影响。

偏振合束器件对 p 偏振光的透过率为 T_p , 对 s 偏振光的透过率为 T_s , 对 p 偏振光的反射率为 R_p , 对 s 偏振光的反射率为 R_s 。对于任意线性偏振激光束,使 $P_{\perp}$ 的电矢量方向与合束器件的 p 偏振方向严格垂直, $P_{\parallel}$ 的电矢量方向与合束器件的 s 偏振方向严格垂直,则线性偏振激光束通过合束器件透射通道的传输效率为

$$T = \frac{P_{\perp} T_s + (P - P_{\perp}) T_p}{P} \quad (1)$$

式中总激光功率 $P = P_{\parallel} + P_{\perp}$ 。另外,可以使 $P_{\perp}$ 的电矢量方向与合束器件的 s 偏振方向严格垂直,则 $P_{\parallel}$ 的电矢量方向与合束器件的 p 偏振方向严格垂直,则线性偏振激光束通过合束器件反射通道的传输效率为

$$R = \frac{P_{\perp} R_p + (P - P_{\perp}) R_s}{P} \quad (2)$$

入射激光的偏振消光比为

$$\mathfrak{R} = 10 \lg(P_{\perp}/P_{\parallel}) \quad (3)$$

图 2 所示为典型偏振合束器的透射(p 光)通道和反射(s 光)通道对入射线偏振光的传输效率随入射光偏振消光比的变化曲线。当偏振消光比大于 13 dB 时,通过偏振合束器的反射通道可以获得大于 95% 的传输效率,通过透射通道的传输效率大于 90%。为获得双通道大于 95% 的平均效率,则需要激光器的偏振消光比大于 16.1 dB。

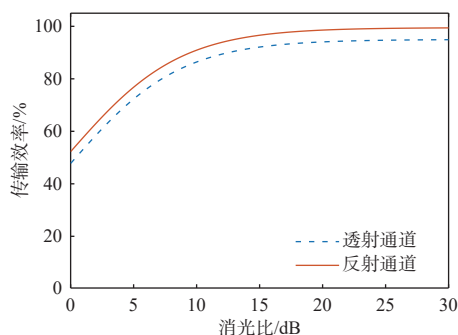


图 2 偏振合束器的传输效率对消光比变化曲线

Fig. 2 Variation curves of transmission efficiency of polarization beam combiner with extinction ratio

工作波长处于近红外光谱区域的有固体激光器 Nd:YAG、Yb:YAG 等以及掺 Yb 石英光纤激光

器。通过综合考虑各激光源的时间特性、输出功率、光束质量及合束要求等因素,确定各单元所采用的激光器类型。前 3 种激光器均选用光束质量和效率更高的掺 Yb 石英光纤激光器,利用其超过 50 nm 的可调谐光谱范围,结合光纤光栅技术可以精确地控制输出激光的中心波长和光谱宽度,以满足光谱合束的要求。采用偏振保持光纤构建光纤链路(包括增益光纤和被动的传能光纤),可以获得线偏振光输出,其偏振消光比一般在 13 dB ~ 15 dB,可以满足高效偏振合束的要求。纳秒脉冲激光器要求输出高峰值功率(大于 MW 级)短脉冲,受限于石英光纤的光学非线性效应,在单模和大模场光纤不可能获得高于 50 kW 的峰值功率^[11]。该激光器选用电光调 Q 的 Nd:YAG 激光器,基于普克儿效应的光开关是偏振相关的,激光器可以直接输出消光比大于 20 dB 的线偏振光,适用于高效率的偏振合束。

固体脉冲激光器的中心波长为 1064 nm,其他 3 个光纤激光器的波长理论上可以在大约 1050 nm ~ 1100 nm 的范围内选取。首先为了获得最大的偏振合束效率,一个光纤激光器的中心波长可选为 1064 nm(这里称为短波),其余 2 个光纤激光器采用相同波长(称为长波),并且为合束功率优化,即同时考虑光纤激光器效率和光谱合束效率。一般商用光纤激光器的中心波长为 1070 nm,但是这个波长距离 1064 nm 仅 6 nm,这意味着双色镜需要一个极为陡峭的过渡带,因而增加了镀膜的难度,并且激光中心波长靠近过渡带,容易导致合束输出功率对激光波长和谱宽漂移的敏感性。为了确定长波光纤激光器的理想中心波长,利用 TFCalc 获取一个双色镜的设计实例,并且生成相应的反射率曲线。针对近红外光谱合束镜,基片选用熔石英(fused SiO₂),高折射率材料选用五氧化二钽(Ta₂O₅),低折射率材料选用二氧化硅(SiO₂)。综合考虑系统光路设计需求和偏振效应的最小化,入射角选定为 10°。过渡带宽度设定为 10 nm,相应波段的透射率或者反射率要求拟定设计目标,获得了一种长波通截止滤光片的反射光谱曲线,可利用该曲线结合激光器的输出光谱曲线计算合束效率。光纤激光器和固体激光器的光谱线型分别以高斯函数描述和洛伦兹函数描述,归一化光谱函数分别为

$$F_f(\lambda) = \exp \left[-\frac{4 \ln 2 (\lambda - \lambda_0)^2}{\Delta \lambda^2} \right] \quad (4)$$

$$F_s(\lambda) = \frac{\Delta \nu^2 / 4}{(c/\lambda - c/\lambda_0)^2 + \Delta \nu^2 / 4} \quad (5)$$

式中: λ_0 为中心波长; $\Delta \lambda$ 为激光器的 FWHM 谱线宽度; $\Delta \nu$ 为以频率表征的激光谱线宽度; c 为真空中的光速。激光束透过合束镜的传输效率为

$$E_{sbc} = \int_{-\infty}^{\infty} (1 - R(\lambda)) F(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

经合束反射的传输效率为

$$E_{sbc} = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda) F(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

利用上述激光光谱线型函数计算光谱合束效率, 图 3 为长波激光光谱特性与光谱合束效率的变化关系。当中心波长大于 1 080 nm 时, 激光的光谱宽度越窄, 可接受的中心波长越小。当光谱宽度为 2 nm 时, 支持高传输率(>0.99)的最小中心波长可低至 1 082 nm。为保证合束高效且稳定, 需要足够的中心波长间隔, 并且处于反射曲线的平坦区, 结合偏振合束镜的带宽进行综合考虑, 系统以 1 090 nm 作为长波激光器中心波长的设计目标值。

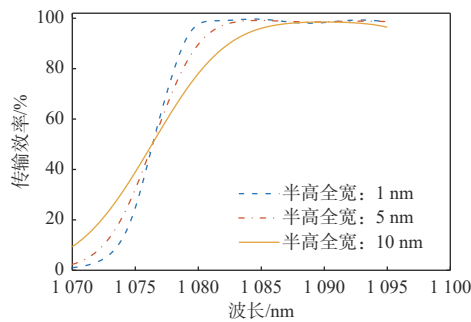


图 3 不同光谱宽度的近红外长波段合束效率随中心波长的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of beam combination efficiency in near-infrared long wave band for different spectral widths with center wavelength

3 合成光束的光束质量控制

激光光束质量的评价标准与实际应用类型有关, 对于合成光束, 光束质量不但取决于各单元激光束的光束质量, 还依赖于各光束的空间位置关系和相对功率(能量)占比。无论采用何种光束质量指标, 从几何光学的意义上, 提升各光束的共轴性和平行性对优化合成光束的光束质量总是有益的。采用我们在文献 [12] 中报道的激光光束指向

检测技术, 结合双光楔对光束指向的调节作用, 可以获得高平行精度的合成光束。图 4 所示为光斑中心检测系统主要硬件布局及光斑图像处理软件的界面。主要硬件包括一个离轴抛物面反射镜、2 个直角棱镜、光斑相机、中心密度衰减片组和用于图像处理和显示的计算机。被检测准直激光束经过 2 个直角棱镜的菲涅尔反射衰减后, 入射至离轴抛物面反射镜。光斑相机的光敏面定位于离轴反射镜的焦平面, 中性密度衰减片进一步降低入射激光功率密度至相机的动态范围以内并抑制背景杂光的干扰。基于这样的硬件设置, 入射光束轴的指向将与光斑中心在像素坐标系中的位置一一对应, 所有平行光束将在焦平面处聚焦于同一位置, 也就是所有平行光束经过离轴反射镜反射后在焦平面处的光斑中心是重合的。装调过程中, 通过转动双光楔并实时检测合成光束的光斑中心位置, 使所有光束对应的光斑中心位置重合, 即可获得平行光束。该过程可以获得的平行性角精度取决于反射镜的焦距值和数字相机的像素单元尺寸。

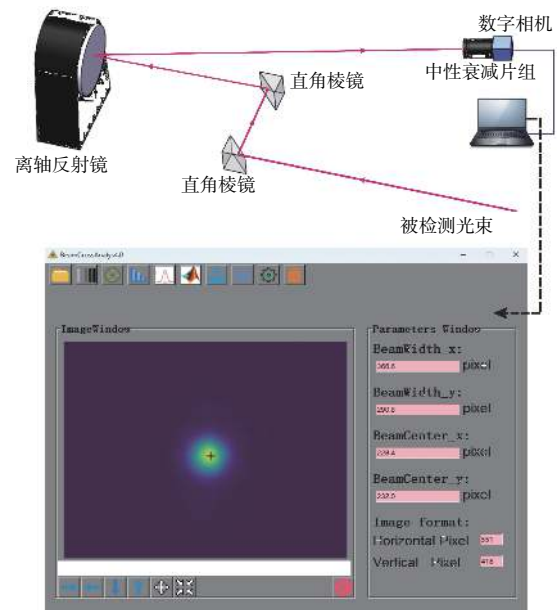


图 4 光束指向检测系统主要硬件布局及软件界面

Fig. 4 Main hardware layout and software interface of beam-pointing detection system

4 实验结果及讨论

合束系统实际采用的偏振分光平片有效通光孔径为 45 mm, 在 1 064 nm 波段, 对 s 偏振光的反射率不低于 99.6%, 对 p 偏振光的透射率不低于 97.8%

(见图 5(a)); 在 1 090 nm 波段, 对 s 偏振光的反射率不低于 99.7%, 对 p 偏振光的透射率不低于 97.9% (见图 5(b)), 并且高反射/透射带宽不低于 10 nm。

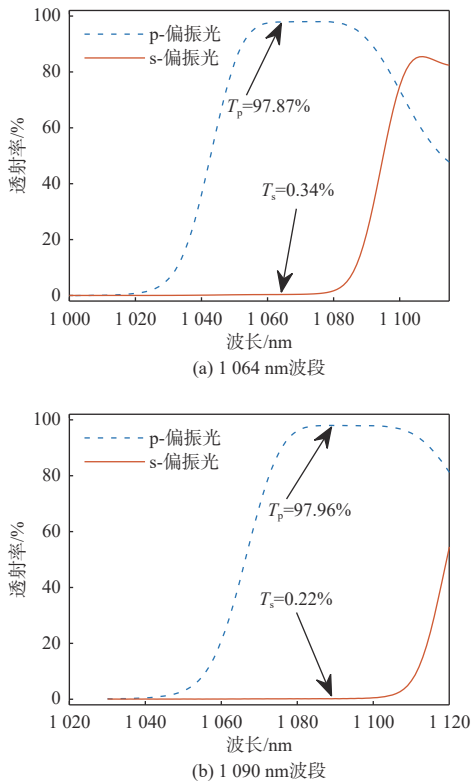


图 5 偏振分光平片透射率测量曲线

Fig. 5 Measured value curves of transmission of polarized spectral flat film

实际各单元激光器的主要光学参数指标如表 1 所示。

表 1 系统各单元激光器参数
Table 1 Laser parameters of each unit

	连续 激光器	亚毫秒 激光器	高重频 激光器	纳秒脉冲 激光器
增益介质	掺Yb光纤	掺Yb光纤	掺Yb光纤	Nd:YAG
中心波长/nm	1089.8	1089.6	1064.1	1064.3
光谱宽度/nm	0.72	0.29	0.08	2
平均功率/W	600	6.5	8	10
脉冲能量/mJ				100
重复频率/Hz		1~100	1 M~1.5 M	1~100
脉冲宽度		200 μ s~1 ms	200 ns	10 ns
光束质量/M ²	1.5	1.3	1.3	5
偏振消光比/dB	15	15	15	20

利用上述透射反射率实测数据和表 1 中激光器的实测消光比指标, 代入式(1)和式(2), 在 1 064 nm

波段期望获得透射通道的传输效率为 96.9%(对应纳秒脉冲激光), 反射通道的传输效率为 96.9%(对应高重频激光); 在 1 090 nm 波段期望获得透射通道的传输效率为 95.0%(对应亚毫秒激光), 反射通道的传输效率为 96.8%(对应连续激光)。各通道实测的传输效率分别为 96.5%、96.5%、94.0% 和 96.0%, 主要的误差来自激光线偏振方向与合束镜相应偏振方向重合精度误差, 以及功率或能量计不稳定输出数据的舍入误差。

实际采用的双色镜以熔石英为基底, 五氧化二钽(Ta_2O_5)为高折射率材料, 二氧化硅(SiO_2)为低折射率材料, 交替镀制的 $\lambda/4$ 膜堆为 56 层(实际双色镜和仿真双色镜的反射率见图 6)。镜片在 1 064 nm 波段的反射率不低于 99.3%, 以 1 064 nm 为中心, 反射率平台区域不小于 ± 3 nm。可能是仿真设计没有考虑器件表面粗糙度的影响^[13], 实际使用双色镜的过渡带宽度显著大于仿真结果, 这导致尽管在 1 090 nm 波长处的透射率不低于 98.2%, 但在波长小于 1 090 nm 的短波区域, 透射率显著下降。实际测量结果双色镜对处于 1 090 nm 波段的连续激光和亚毫秒激光的透过率分别为 97.5% 和 97.0%, 对处于 1 064 nm 波段的高重频激光和纳秒脉冲激光的反射率均为 99.0%。由于系统中光纤激光器均采用了光纤光栅作为反馈器件, 获得了足够窄的光谱宽度 (<1 nm) 和稳定的中心波长, 连续激光和亚毫秒激光实测的中心波长略小于 1 090 nm(图 6 中子图为连续光纤激光器的输出光谱), 但仍可获得较高的传输效率。这里的误差同样包含功率或能量计不稳定输出数据的舍入误差。考虑测量误差的前提下, 合束器件的传输效率仿真结果与实测值具有较好的一致性。

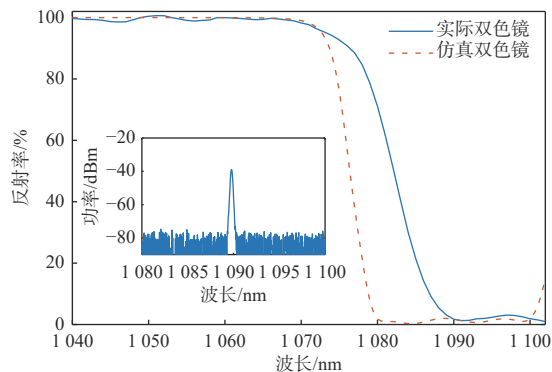


图 6 实际的双色镜和仿真双色镜的反射率曲线

Fig. 6 Reflectance curves of real dichroic mirror and simulated dichroic mirror

进一步测量混合合束各通道的传输效率, 连续运转的光纤激光器通过偏振合束器的反射通道和光谱合束器的透射通道的总合束效率为 93.6%, 亚毫秒光纤激光器通过偏振合束器的反射通道和光谱合束器的透射通道的总合束效率为 91.5%; 高重频光纤激光器通过偏振合束器的反射通道和光谱合束器的反射通道的总合束效率为 95.0% (含 10° 反射镜的反射损耗); 固体纳秒脉冲激光器通过偏振合束器的透射通道和光谱合束器的反射通道的总合束效率为 95.5% (含 10° 反射镜的反射损耗), 4 路激光的平均合束效率为 93.9%。

各单元激光器输出均扩束为束宽 20 mm 准直光束, 作用在合束器件上的最大平均功率密度小于 400 W/cm^2 , 最大峰值功率密度小于 10 MW/cm^2 , 系统运转过程中, 没有发生器件激光诱导损伤。

实验中自搭建的光束指向检测系统反射镜焦距为 3 m, 光斑相机的像元尺寸为 $3.75 \mu\text{m}$, 理论上可实现的光束平行性精度约为 $1.25 \mu\text{rad}$ 。实际上, 考虑到光斑中心位置的测量误差, 光束的可实现静态平行精度应略大于理论值。事实上, 利用光束指向检测系统测得输出激光束存在固有的指向不稳定性, 其参考值大约在 $5 \mu\text{rad} \sim 10 \mu\text{rad}$, 远大于上述静态平行精度。因此, 在精密装调工作完成的前提下, 系统各光束的平行性精度主要取决于各光束指向的随机抖动。

5 结论

在近红外波段, 基于先进光学薄膜技术的偏振合束和光谱合束器件具有高传输效率和高激光损伤阈值。利用偏振合束和光谱合束的混合合束技术, 研制了包含光纤激光器和固体激光器单元的复合近红外激光系统。实验证明, 该合束系统能够保证多路激光束的高效合成和高光束质量共轴输出。现阶段, 复合激光系统可用于激光与物质相互作用研究, 探索新现象、新机理, 并且拓展激光技术的应用领域。

参考文献:

- [1] ZHOU M L, CAI Y, HE M B, et al. $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ dielectric film damage induced by combination of pulsed and continuous wave infrared laser irradiation[J]. SPIE, 2015, 9543: 954306-1-6.
- [2] 焦路光, 赵国民, 陈敏孙. 组合激光辐照 Q235 钢靶的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 848-852.
- JIAO Luguang, ZHAO Guomin, CHEN Minsun. Investigation on irradiation effects of Q235 steel targets by combined laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 848-852.
- [3] 袁红, 谭福利, 王伟平, 等. 连续和重复频率激光对旋转壳体加热效率的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(12): 1975-1978.
- YUAN Hong, TAN Fuli, WANG Weiping, et al. Numerical simulation of heating efficiency comparison of CW laser and repeated frequency laser irradiating rotational shells[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(12): 1975-1978.
- [4] 陈敏孙, 江厚满. 组合激光辐照下钢板温升的数值模拟[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(5): 61-63.
- CHEN Minsun, JIANG Houman. Numerical simulation of the temperature rise of steel plate irradiated by combined laser[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2006, 4(5): 61-63.
- [5] FAN T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567-577.
- [6] SCHMIDT O, WIRTH C, NODOP D, et al. Spectral beam combination of fiber amplified ns-pulses by means of interference filters[J]. Optics Express, 2009, 17(25): 22974-22982.
- [7] QIU J S, TANG X X, FAN Z W, et al. Two-beam combined 3.36 J, 100 Hz diode-pumped high beam quality Nd: YAG laser system[J]. Applied Optics, 2016, 55(21): 5630-5633.
- [8] MA P F, TAO R M, WANG X L, et al. Coherent polarization beam combination of four mode-locked fiber MOPAs in picosecond regime[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 4124-4137.
- [9] YANG Y, GENG C, LI F, et al. Combining module based on coherent polarization beam combining[J]. Applied Optics, 2017, 56(7): 2020-2028.
- [10] LOFTUS T H, THOMAS A M, HOFFMAN P R, et al. Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 487-497.
- [11] DAWSON J W, MESSERLY M J, BEACH R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber

-
- lasers and amplifiers to high average power[J]. [Optical Express](#), 2008, 16(17): 13240-13266.
- [12] 姚林海, 陆培国, 杨永安, 等. 光束指向稳定性高精度检测方法研究[J]. [应用光学](#), 2022, 43(2): 339-344.
- YAO Linhai, LU Peiguo, YANG Yongan, et al. High precision measurement method of laser beam pointing stability[J]. [Journal of Applied Optics](#), 2022, 43(2): 339-344.
- [13] CARNIGLIA C K. Scalar scattering theory for multilayer optical coatings[J]. *Optical Engineering*, 1979, 18(2): 104-115.