

大芯径集束光纤强激光耦合装置设计

魏少强 李云飞 张钧尧 魏永杰

Design of strong laser coupling device for large core diameter bunched fiber

WEI Shaoqiang, LI Yunfei, ZHANG Junyao, WEI Yongjie

引用本文:

魏少强, 李云飞, 张钧尧, 等. 大芯径集束光纤强激光耦合装置设计[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1212–1218. DOI: 10.5768/JAO202344.0610007

WEI Shaoqiang, LI Yunfei, ZHANG Junyao, et al. Design of strong laser coupling device for large core diameter bunched fiber[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1212–1218. DOI: 10.5768/JAO202344.0610007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于像差特征分析的变焦光学系统装调

Alignment of zoom optical system based on aberration feature analysis

应用光学. 2020, 41(2): 389–393 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0205002>

基于自由曲面的光纤照明用耦合透镜设计

Coupling lens design of fiber lighting based on free-form surface

应用光学. 2017, 38(4): 674–678 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0408001>

宽带空芯THz单模单偏振光纤

Broadband THz single-mode single-polarization hollow core fiber

应用光学. 2017, 38(5): 844–847 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0508001>

标准球面透镜的几何特性与误差分析

Geometric characteristics and error analysis of standard spherical lens

应用光学. 2020, 41(4): 858–868 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0405002>

大孔径变焦投影镜头设计

Design of large aperture zoom projection lens

应用光学. 2018, 39(3): 405–411 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0305001>

强电磁干扰环境下光纤束传像系统的设计研究

Design and research of image transmission systems with fiber bundles in environment of strong electromagnetic interference

应用光学. 2020, 41(6): 1289–1297 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0608001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1212-07

大芯径集束光纤强激光耦合装置设计

魏少强^{1,2}, 李云飞^{1,2}, 张钧尧^{1,2}, 魏永杰³

(1. 核工业理化工程研究院 激光技术研究所, 天津 300180; 2. 粒子输运与富集技术重点实验室, 天津 300180;
3. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

摘要: 光纤传输是常用的激光传输方式, 随着光纤制备工艺的提升, 大芯径、大数值孔径的传能光纤被广泛应用于多模激光传输。高效的激光耦合是光纤稳定传输的前提, 为实现宽波段、高功率密度的激光耦合, 根据混合模类高斯光束传输变换特性和耦合装置初始参数, 结合像差分析, 设计了一套大芯径四合一集束光纤与单芯光纤之间的非球面镜耦合装置, 并通过机械装置装调实验得到了最高 60.6% 的光纤耦合效率。搭配自研激光共振电离飞行时间质谱仪, 实现了钕同位素三色三步光电离路径对应激光饱和功率密度的测量, 验证了装置满足复色激光共振激发电离特定同位素的光谱实验需求。

关键词: 大芯径光纤耦合; 类高斯光束; 非球面透镜; 像差分析

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0610007

Design of strong laser coupling device for large core diameter bunched fiber

WEI Shaoqiang^{1,2}, LI Yunfei^{1,2}, ZHANG Junyao^{1,2}, WEI Yongjie³

(1. Research Institute of Laser Technology, Research Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China; 2. Science and Technology on Particle Transport and Separation Laboratory, Tianjin 300180, China; 3. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Fiber transmission is a common mode of laser transmission, with the improvement of optical fiber preparation technology, energy transfer fiber with large core diameter and large numerical aperture is widely used in multi-mode laser transmission. Efficient laser coupling is the premise of stable transmission of optical fiber, in order to achieve laser coupling with wide band and high power density, according to the transmission transformation characteristics of mixed-mode Gaussian-like beam and the initial parameters, combined with aberration analysis, an aspherical lens coupling device between large-core four-in-one bunched fiber and single-core fiber was designed, and the maximum fiber coupling efficiency of 60.6% was obtained through mechanical installation experiments. Coupled with a self-developed laser resonance ionization time of flight mass spectrometer, the laser saturation power density corresponding to the three-color, three-step photoionization path of neodymium isotope was measured, and it was verified that the device could meet the spectral experiment requirements of specific isotope resonance excitation ionization induced by complex lasers.

Key words: large-core fiber coupling; Gaussian-like beam; aspherical lens; aberration analysis

引言

随着光纤制备工艺的不断提高, 利用光纤传输激光在工业加工、医疗、国防军事等领域得到广泛

应用。与自由空间传输相比, 光纤传输具备方便集成、无焦点漂移、可柔性长距离传输、系统稳定、安全性能好等优点^[1]。光纤的诸多应用需要实

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-09-27

基金项目: 天津市自然科学基金 (18JCTPJC56600)

作者简介: 魏少强 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事可调谐激光技术研究。Email: 619549110@qq.com

现空间光与光纤之间的高效耦合。但受到光源和光纤参数的限制,通常会带来耦合困难。在光纤通信中,需要将自由空间光耦合进光纤,得益于光源良好的光束质量,田晓等^[2]采用单透镜结构实现了光纤的高效耦合。在半导体激光光纤耦合系统设计中,郭照师等^[3]利用引入修正角的楔形整形镜补偿发光点的指向偏差,改善激光束的整形效果,实现了光纤的高效耦合。丁兵等^[4]使用无像差平行平板缩束装置,消除光束暗区,改善组合光束的光束质量,提升光纤耦合的角度填充系数,实现了非球面镜高效仿真耦合。上述成果均基于单色连续激光,少见复色脉冲激光合成耦合的相关报道。

在多路激光合成传输的场景中,采用光纤集成耦合的方式,将多路激光通过多合一集束光纤耦合进单芯光纤中,达到光路合成的效果,简化复杂的合成光路设计,提高应用便捷性。利用光纤传输的宽波段特性,实现宽波段多色激光自由合成,这为激光光谱学研究提供了简便的激光传输方案,适用于复色激光选择性共振激发电离特定同位素的光谱实验研究中^[5-8]。

在利用激光光谱学研究跃迁截面、振子强度等原子物理参数时,需通过高功率多色脉冲激光自由合成,匹配激光-原子相互作用过程,这为光纤集成耦合方式带来了挑战。在高重频、高功率密度的脉冲激光传输过程中,为降低光纤损伤风险,需增大光纤截面积,降低激光峰值功率密度^[9]。然而激光经大芯径光纤传输后,其光束质量会大幅下降^[10],且芯径越大,数值孔径越大,这种趋势越明显^[11],光束质量下降会引入大像差,进而增加后端光纤的耦合难度。本文基于数值孔径不变、芯径变小的光纤复色激光耦合,通过非球面透镜组减小像差,开发了一套大芯径四合一集束光纤与单芯光纤之间的耦合装置,并开展了相关实验,验证了装置满足复色激光共振激发电离特定同位素的光谱实验需求。

1 光纤耦合原理

图1为光纤耦合装置示意图。 l 为出纤端与 L_1 的间距, d 为 L_1 与 L_2 的间距, l' 为 L_2 与入纤端的间距。其中左侧为四合一光纤,其出射端是四根光纤的公共端,位于透镜 L_1 焦点位置;右侧是单芯光纤,其入射端位于透镜 L_2 焦点位置。 L_1 、 L_2 组成耦合镜组, $\omega_{M1}(0)$ 、 l_{M1} 分别为类高斯光束

经过 L_1 之后的腰斑尺寸及腰斑位置。根据几何光学成像理论的拉赫不变量原理,若不考虑像差,则激光束经过由透镜组成的光学系统之后,其光束质量保持不变^[12]。在相同条件下,基模高斯光束和高阶模类高斯光束通过双透镜聚焦系统后的腰斑尺寸仅有几微米的差别^[13]。

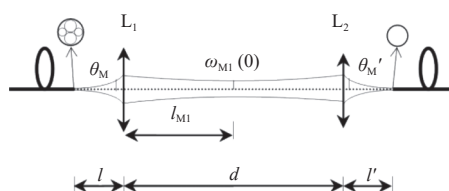


图1 光纤耦合装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber coupling device

本文采用的光纤芯径为 $365\mu\text{m}$ 、 $550\mu\text{m}$ 、 $910\mu\text{m}$ 三种规格,为大芯径光纤。与之相比,上述差别可以忽略,因此可以参考基模高斯光束的传输变换规律,计算高阶模类高斯光束的传输变换特性。在不考虑像差的前提下,采用高阶模类高斯光束的传输变换规律,可得混合模类高斯光束通过耦合装置后的腰斑位置和大小分别为

$$l_{M'} = \frac{\phi \cdot (1 - d/f_1') \cdot (l^2 + z_M^2) + l \cdot (2d\phi - 1) - d \cdot (1 - d/f_2')}{[(1 - d/f_2') - \phi \cdot l]^2 + \phi^2 \cdot z_M^2} \quad (1)$$

$$\omega_{M'}(0) = \omega_M(0) \cdot [(\phi \cdot z_M)^2 + (1 - d/f_2' - \phi \cdot l)^2]^{-1/2} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_2'} - \frac{d}{f_1' f_2'} \quad (3)$$

式中 $z_M = \pi \omega_M^2(0) / \lambda M^2$, M^2 为光束质量因子, $\omega_M(0)$ 为光纤出光端混合模类高斯光束的腰斑半径。对于大芯径传能光纤,由于芯径尺寸远大于传输波长,光纤中存在较多模式,模场分布复杂,需要采用几何光学理论进行分析^[14]。为了实现高效耦合,入射激光需要满足全反射条件,最大入射角必须在光纤数值孔径决定的范围内,且光斑尺寸要小于芯径尺寸^[15]。考虑衍射损耗,在透镜处光斑尺寸应小于透镜通光孔径的 $2/3$,且聚焦透镜位置应该在准直光束腰斑附近,即:

$$\omega_M(l) = \omega_M(0) \sqrt{1 + (z/z_M)^2} \leq d_1/3 \quad (4)$$

$$\omega_{M1}(0) = \omega_M(0) f_1' [z_M^2 + (l - f_1')^2]^{-1/2} \leq d_2/3 \quad (5)$$

$$l_{M1} = f_1' + \frac{(l - f_1') f_1'^2}{(l - f_1')^2 + z_M^2} \quad (6)$$

式中: d_1 为准直透镜通光孔径; d_2 为聚焦透镜通光

孔径。透镜焦距未知,根据几何光学成像理论,设发散光束光斑半径为 y , 发散角为 θ_1 , 聚焦光束光斑半径为 y' , 会聚角为 θ_2 , 准直透镜焦距为 f_1' , 聚焦透镜焦距为 f_2' , 如图 2 所示。

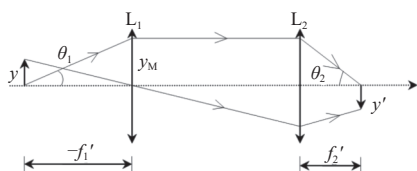


图 2 几何光束聚焦模型

Fig. 2 Focusing model of geometric beam

根据高斯公式可得, 式(7)为入射与出射光斑半径关系式:

$$\frac{-y'}{y} = \frac{f_2'}{f_1'} \quad (7)$$

2 耦合装置设计

四合一集束光纤由两根芯径 $550 \mu\text{m}$ 、包层直径 $600 \mu\text{m}$ 和两根芯径 $365 \mu\text{m}$ 、包层直径 $400 \mu\text{m}$ 的大芯径光纤对角排列组成, 数值孔径均为 0.22, 长度均为 3 m, 物点最大直径达到 $1150 \mu\text{m}$; 耦合光纤为单芯光纤, 芯径为 $910 \mu\text{m}$ 、包层直径为 $1000 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22, 长度为 10 m, 像点最大直径为 $910 \mu\text{m}$; 光纤传输波段均为 $550 \text{ nm} \sim 750 \text{ nm}$ 。

为达到优化效果, 应有 $l=f_1'$, 并且 l_{M1} 应接近两透镜间距 d , 避免造成衍射损耗; 为提高耦合效率,

需控制聚焦光斑尺寸, 因此需分析 $\omega_M'(0)$ 变化规律。由式(2)可知 f_1' 越大 f_2' 越小, 则腰斑 $\omega_M'(0)$ 越小, 为满足耦合装置的聚焦作用, 要求 $f_1' > f_2'^{[16]}$ 。

根据上述分析, 考虑到加工尺寸不可能太大或太小, 选取如下初始参数进行软件模拟: 透镜孔径均设定为 30 mm , 则根据式(4)、式(7), 准直透镜焦距为 $f_1'=45.45 \text{ mm}$; 依据式(5)、式(7)可知聚焦透镜焦距为 $f_2'=35.96 \text{ mm}$, 聚焦光束聚焦角度 $\theta_M'=0.278$, 其值略大于接收光纤数值孔径; 聚焦透镜放置在准直透镜束腰附近, 依据式(6)可知, $d=l_{M1}=45.45 \text{ mm}$; 将以上结果带入式(3)、式(4), 可知 $l_M'=35.89 \text{ mm}$, 其值小于 f_1' , 并且与 f_2' 接近; 依据式(2)得装置聚焦光斑尺寸 $\omega_M'(0)=0.458 \text{ mm}$, 其值小于 $\omega_M(0)=0.575 \text{ mm}$, 整体表现为聚焦效果。

对于光纤而言, 单色像差主要为轴上点球差, 但光纤为大芯径, 物点、像点不能视为点光源; 传输激光波长范围较宽, 存在垂直色差; 其他轴外点像差可不作为主要控制参数, 只将设计结果的子午面和弧矢面像差作为检验依据。考虑到光纤数值孔径为 0.22, 数值较大。为减小球差, 不应采用普通的球面组合, 需考虑非球面透镜, 能有效降低球差。经以上计算, 设定两片非球面透镜焦距初始值分别为 $f_1'=45.45 \text{ mm}$, $f_2'=35.96 \text{ mm}$, 经软件模拟优化后实际焦距为 $f_1'=39.22 \text{ mm}$, $f_2'=25.50 \text{ mm}$, 非球面方程为式(8)。方程中包含 11 项系数, 其数值如表 1 所示。

$$z = \frac{y^2}{R(1 + \sqrt{1 - (1 + K)y^2/R^2}) + Ay^4 + By^6 + Cy^8 + Dy^{10} + Ey^{12} + Fy^{14} + Gy^{16} + Hy^{18} + Jy^{20}} \quad (8)$$

表 1 非球面方程各系数值

Table 1 Coefficient values of aspheric equation

Lens	R	K	A	B	C	D	E	F	G	H	J
Collimating lens	31.20	1.05	-8.32×10^{-6}	1.07×10^{-8}	1.68×10^{-9}	1.01×10^{-11}	-5.29×10^{-14}	-2.41×10^{-15}	-3.66×10^{-17}	-1.64×10^{-19}	1.15×10^{-20}
Focusing lens	20.50	-1.00	-1.22×10^{-5}	9.09×10^{-8}	4.57×10^{-10}	2.04×10^{-12}	-4.04×10^{-14}	-7.88×10^{-16}	7.80×10^{-18}	0.00	0.00

图 3 是像面光斑的像质分析, 其中图 3(a) 为聚焦端面像面的光斑痕迹图, 它表明四路光纤激光经整形后会聚像点的几何分布, 大圆和小圆分别代表芯径为 $550 \mu\text{m}$ 和 $365 \mu\text{m}$ 的四路光纤激光像斑, 均完全分布在耦合光纤芯径外边界范围内; 图 3(b) 为点列图, 图中给出了有代表性的 3 个视场, 其中左列数据为视场值, 右列数据为像斑直径, 其可分析球差和垂直色差, 两种像差分

布均匀度一致; 图 3(c) 中分别给出了 3 个视场处的子午面、弧矢面垂直像差, 像差接近直线, 像差矫正较好, 最大像差值不大于 0.1 mm 。结合考虑图 3(a), 设计装置的功能是将光斑聚焦, 且不影响激光能量分布。采用光束质量分析仪测试的对比结果表明, 光斑经整形后能量分布均匀度不变, 且光束质量未发生明显劣化, 因此该像差满足需求^[17]。

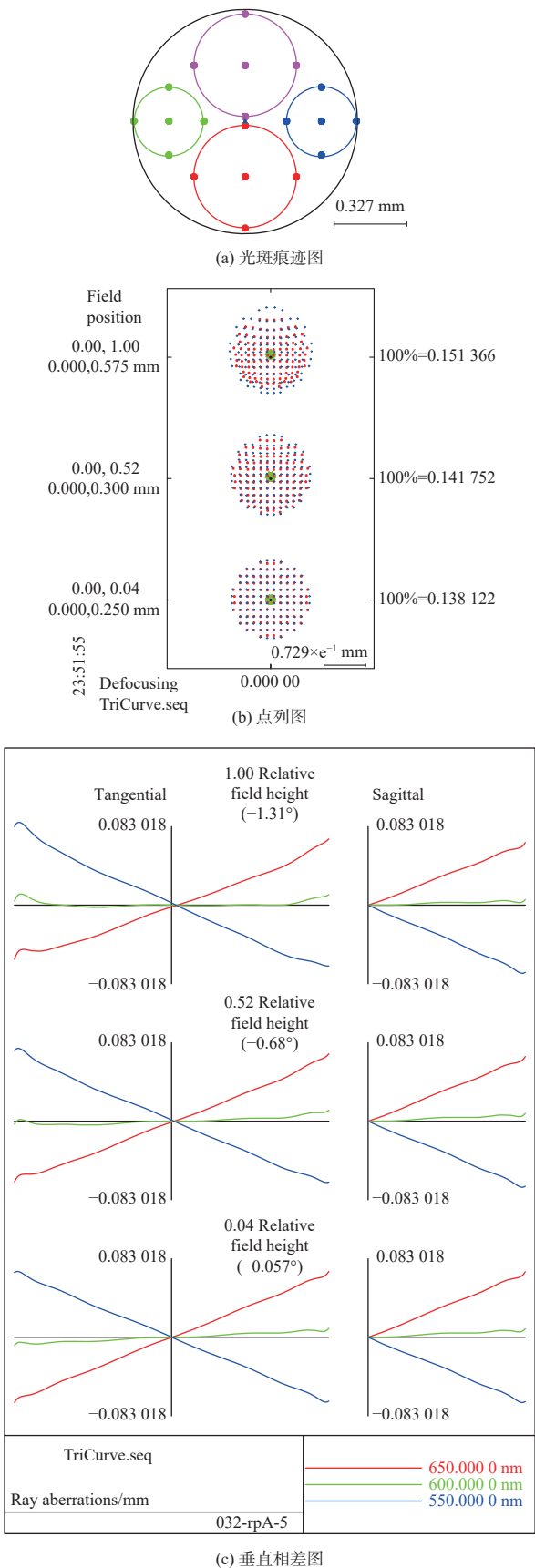


图3 Code V 软件优化图

Fig. 3 Code V software optimized diagram

3 实验与分析

将两个非球面透镜按照设计方向定位组装成模块,将此模块机械固定在整形装置卡槽中,将四合一光纤出射端和单芯光纤通过 SMA905 接口按设计方向分别固定在两台三维调整架上。调整架分别具备 x 、 y 、 z 三维调节,其中激光传输方向为 z 轴,调节范围 ± 3 mm; x 轴为水平方向, y 轴为垂直方向,调节范围均为 ± 1.5 mm。通过调整保证入射与出射光纤同轴,同时此装置可以任意角度摆放固定在光学平台上,图 4 所示为耦合装置图。将四路重频 10 kHz,脉宽 30 ns 的高重频脉冲激光分别耦合入四合一光纤,在单芯光纤出口处架设功率监测装置。光纤通光后,通过精调两台调整架,将出射功率优化到最大值,实验数据如表 2 所示,该耦合装置在实验条件下得到了最大 60.6% 的耦合效率。

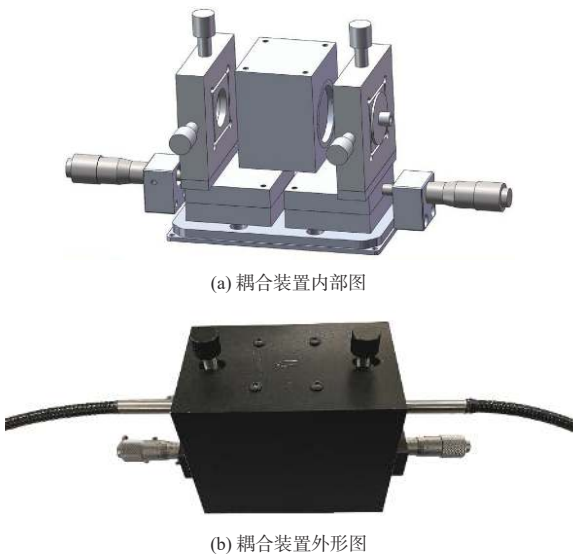


图4 耦合装置机械调整结构

Fig. 4 Structure diagram of mechanical adjustment for coupling device

表2 耦合装置实验结果

Table 2 Experimental results of coupling device					
Wavelength /nm	Laser power /W	4-in-1 fiber output power/W	Single-core fiber output power/W	Efficiency /%	Input core/ μm
567	1.17	1.10			365
567	1.00	0.94	6.57	60.6	365
580	3.50	3.40			550
641	6.00	5.40			550

依据几何关系,理论光纤耦合效率由公式(9)

确定^[18]:

$$\eta = \left[1 - \exp\left(-\frac{2M_F^2}{M^2}\right) \right]^2 \quad (9)$$

式中 M^2 为激光光束质量因子, 与之对应, M_F^2 为光纤参数确定的“光束质量因子”。经计算, 理论耦合效率为 62.4%。测试结果与理论数值接近, 说明通过两片非球面透镜组, 实现了良好的像差优化。同时耦合透镜组引入的少量球差、波长差异带来的色差、系统装调存在的机械误差等均引起了耦合效率下降, 导致实验结果略低于理论数值。

将该装置应用于钕的复色激光共振激发电离实验中, 以检验效果。将三色激光“596.766 nm-579.576 nm-640.679 nm”^[19]经装置耦合合成后传输, 在自研飞行时间质谱中与钕原子束作用, 实现共振激发电离¹⁴⁴Nd, 通过精确标定装置效率, 分别改变三步激光功率, 进而研究各步跃迁激光饱和和功率密度。得到如图5所示功率扫描曲线, 其中图5(a)、5(b)、5(c)分别对应第一、二、三步跃迁过程。耦合装置经实验前调节标定后, 实验过程中未重复调节。

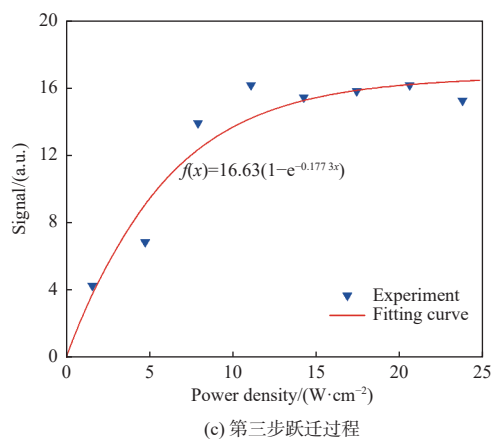
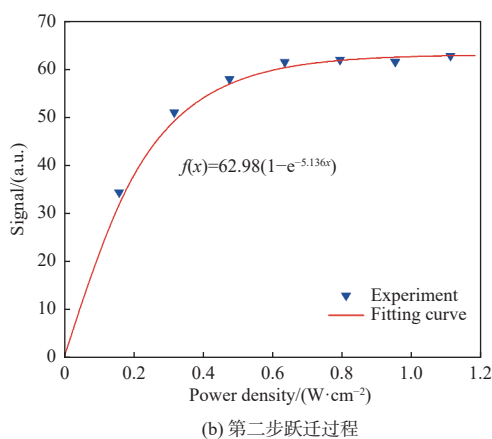
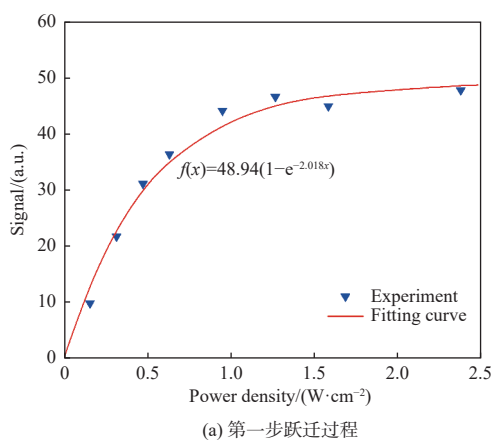


图5 多步光电离路径的激光饱和和功率密度扫描曲线

Fig.5 Laser saturation power density scanning curve of multi-step photoionization path

由此获得的三步跃迁过程激光饱和和功率密度分别为 1.14 W/cm²、0.45 W/cm² 和 12.99 W/cm², 推算得到光电离跃迁截面在 10⁻¹⁵ cm² 量级。通过光纤耦合装置, 实现了三色宽波段、平均功率 20 W 脉冲激光的光纤合成耦合, 完成了钕三步跃迁路径激光饱和和功率密度的测量。

4 结论

为匹配高重频、高峰值功率的脉冲激光传输过程, 实现大芯径四合一集束光纤与单芯光纤之间的高效耦合, 在混合模类高斯光束传输变换特性和耦合装置初始参数的基础上, 结合软件模拟和像差分析, 细化了光纤激光耦合装置的加工参数, 并通过机械结构装调测试, 得到了最高 60.6% 的耦合效率。通过钕的光电离实验, 验证了该装置满足复色激光共振激发电离特定同位素的光谱应用需求。本装置经首次调节后, 实验过程中无需重复调节, 大幅节省了多束激光合成传输所需的整备时间, 对相似大芯径光纤耦合装置的搭建具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] DURVILLE F, CILIA D. Optical systems for high power laser beam delivery[J]. SPIE, 1989, 1024: 75-78.
 - [2] 田晓, 黄宝玉, 张俊. 利用单透镜结构实现自由空间激光进入单模光纤的耦合研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(4): 362-366.
- TIAN Xiao, HUANG Baoyu, ZHANG Jun. Study on high efficiency coupling of free space laser entering single

- mode fiber using single lens[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2020, 31(4): 362-366.
- [3] 郭照师, 秦文斌, 李景, 等. 基于楔形整形镜对半导体激光的光纤耦合[J]. *发光学报*, 2021, 42(1): 98-103.
GUO Zhaoshi, QIN Wenbin, LI Jing, et al. Fiber coupling of semiconductor laser based on wedge-shaped lens[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(1): 98-103.
- [4] 丁兵, 赵鹏飞, 段程芮, 等. 高亮度绿光半导体激光器光纤耦合系统设计与仿真[J]. *中国激光*, 2021, 48(5): 210-217.
DING Bing, ZHAO Pengfei, DUAN Chengrui, et al. Design and simulation of high brightness fiber coupling system of green laser diodes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 210-217.
- [5] 王文亮, 李志明, 沈小攀, 等. 用于原子能级结构研究的激光共振电离光谱系统[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(12): 3653-3657.
WANG Wenliang, LI Zhiming, SHEN Xiaopan, et al. A laser resonance ionization spectroscopy apparatus for study on atomic energy level[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(12): 3653-3657.
- [6] 沈小攀, 李志明, 王文亮, 等. 激光共振电离质谱法测量锡的同位素比[J]. *分析化学*, 2017, 45(3): 342-347.
SHEN Xiaopan, LI Zhiming, WANG Wenliang, et al. Measurement of tin isotope ratios by laser resonance ionization mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2017, 45(3): 342-347.
- [7] SHEN X P, WANG W L, ZHAI L H, et al. New spectroscopic data on high-lying excited even-parity levels of atomic neodymium[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2018, 145: 96-98.
- [8] 张钧尧, 薛轶, 周鸿儒. 基于激光共振电离质谱的钪奇宇称高激发态研究[J]. *原子与分子物理学报*, 2024, 41(1): 014002-1-5.
ZHANG Junyao, XUE Yi, ZHOU Hongru. The research on odd-parity high-lying energy levels of gadolinium based on resonance ionization mass spectroscopy[J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2024, 41(1): 014002-1-5.
- [9] 赵兴海, 高杨, 徐美健, 等. 脉冲激光诱导光纤损伤的测试方法[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(10): 1627-1631.
ZHAO Xinghai, GAO Yang, XU Meijian, et al. Experimental measurement of pulsed-laser induced damage to fibers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(10): 1627-1631.
- [10] KUHN A, BLEWETT I J, HAND D P, et al. Optical fibre beam delivery of high-energy laser pulses: beam quality preservation and fibre end-preparation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34(4/5/6): 273-288.
- [11] 赵兴海, 高杨, 徐美健, 等. 高峰值功率脉冲激光的光纤传能特性[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3): 444-448.
ZHAO Xinghai, GAO Yang, XU Meijian, et al. Power delivery characteristics of fibers for high-peak power pulse laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 444-448.
- [12] 黄永明, 吕英华, 杨性愉. 高阶模激光束通过会聚光学系统的聚焦特性[J]. *光学技术*, 2000, 26(4): 331-333.
HUANG Yongming, LYU Yinghua, YANG Xingyu. Focusing characteristic of higher order mode laser beams propagation through focusing optical system[J]. *Optical Technique*, 2000, 26(4): 331-333.
- [13] 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 64-65.
LYU Baida. Propagation and control of high-power lasers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 64-65.
- [14] 朱洪波, 刘云, 郝明明, 等. 高效率半导体激光器光纤耦合模块[J]. *发光学报*, 2011, 32(11): 1147-1151.
ZHU Hongbo, LIU Yun, HAO Mingming, et al. High efficiency module of fiber coupled diode laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(11): 1147-1151.
- [15] 王宝华, 姜梦华, 惠勇凌, 等. 大功率固体激光器高效率光纤耦合[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 195-199.
WANG Baohua, JIANG Menghua, HUI Yongling, et al. Improving coupling efficiency of optical fiber for high-power laser beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(2): 195-199.
- [16] 张俊, 冯莹, 陈爽. 高功率激光光纤耦合系统设计与分析[J]. *光学与光电技术*, 2007, 5(1): 47-49.
ZHANG Jun, FENG Ying, CHEN Shuang. Design and analysis of coupling system between fibers for high power laser beam[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, 5(1): 47-49.
- [17] 张栩, 邢颖滨, 褚应波, 等. 基于全光纤结构的光束匀化整形技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(15): 192-208.
ZHANG Xu, XING Yingbin, CHU Yingbo, et al. Research progress on beam homogenization and shaping technology using all-fiber structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(15): 192-208.

-
- [18] NIU J F, XU J Q. Coupling efficiency of laser beam to multimode fiber[J]. *Optics Communications*, 2007, 274(2): 315-319.
- [19] BABICHEV A P, GRIGORIEV I S, GRIGORIEV A I, et al. Development of the laser isotope separation method (AVLIS) for obtaining weight amounts of highly enriched 150 isotope[J]. *Quantum Electronics*, 2005, 35(10): 879-890.