

文章编号 1004-924X(2024)03-0324-09

用于荧光显微技术的多波长激光耦合系统

周旻超^{1,2}, 王振亚^{2*}, 方 懿², 罗刚银², 张 哲², 孙晓洁²

(1. 复旦大学 工程与应用技术研究院, 上海 200433;

2. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

摘要:为了满足荧光显微镜技术对多波长单模耦合输出激光的需求,研究了 400~680 nm 内多波长激光耦合进单模光纤的技术,设计了三片式耦合透镜组很好地消除了不同波长耦合时的色差以提高耦合效率,同时考虑光纤耦合调试难度大的问题,设计了能快速简单完成耦合调节的耦合光纤部件结构以及耦合调试的方法,通过实验测试荧光成像常用的 4 种波段激光(405, 488, 561, 638 nm),耦合效率均大于 65%。实验结果达到了较高的光纤耦合水平,证明该多波长激光耦合器性能优异。同时,由于耦合器装调简单且成本低,本文的工作具有进一步商业化的价值,且为多波长单模耦合激光器国产化打下了坚实的基础。

关键词: 荧光显微技术; 单模激光耦合; 多波长激光; 光纤耦合

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243203.0324

Multi-wavelength lasers coupling system used in fluorescent microscopy

ZHOU Minchao^{1,2}, WANG Zhenya^{2*}, FANG Yi², LUO Gangyin², ZHANG Zhe², SUN Xiaojie²

(1. Academy for Engineering and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215000, China)

* Corresponding author, E-mail: wangzy@sibet.ac.cn

Abstract: The rapid advancement of fluorescence microscopy technology has increased the need for better excitation light sources, particularly for multi-wavelength lasers coupled in single mode fiber. This article explores the technology of coupling multi-wavelength lasers into single mode fibers within the spectral range of 400—680 nm. To enhance the coupling efficiency of different wavelengths, a triplet lens is designed to effectively reduce chromatic aberration. Moreover, a fiber coupling component structure and a quick and easy coupling adjustment method was developed to address the challenges of fiber coupling alignment. Fiber coupling experiments involving four commonly used laser wavelengths in fluorescence microscopy (405, 488, 561, 638 nm) have demonstrated a coupling efficiency of over 65% for all four wavelengths. These results validate the effectiveness of the multi-wavelength lasers coupler designed in this study. Furthermore, due to its simple adjustment and low cost, the coupler holds significant commercial value and establishes a solid foundation for the localization of multi-wavelength lasers coupled in single mode fiber.

收稿日期: 2023-09-25; 修订日期: 2023-10-24.

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目(No. Y822141202)

Key words: fluorescence microscopy; single mode laser coupling; muti-wavelength lasers; fiber coupling

1 引言

近年来,荧光显微技术发展快速,功能越来越高级,如共聚焦显微镜、光片显微镜、双光子显微镜以及 SIM, STED, STORM 等超分辨显微镜^[1-2],在多个领域发挥着重要的作用^[3-4]。光源作为荧光显微系统的重要组成部分,发展速度也很快^[3],从一开始的卤钨灯到亮度更高的汞灯,再到现在更为主流的 LED,发光效率和稳定性越来越高,寿命越来越长,但仍不能满足高级荧光显微系统对光束质量、功率密度和单色性等方面的要求。

随着半导体激光器和固体激光器产品的日益成熟^[7-8],它们具有体积小、寿命长、光束质量好等特点,因此成为高级荧光显微系统的首选光源。为了使激光光源能更好地集成进显微系统,且保证良好的光束质量,光纤耦合技术被越来越多地运用^[9]。通过将半导体或固体激光器出射光耦合进一根光纤,再由光纤导入到显微系统,这样做的好处是由于光纤和线缆一样是软连接,使光源模块可以和显微系统分离开,这样利于产品的模块化和小型化,另外光纤可以达到进一步优化光束质量的效果,例如一台准单模激光器出射光耦合进单模光纤后,光纤输出的激光是光束质量更好的单模激光,这样就更符合这些高级荧光显微系统对光源的要求。

目前,光纤耦合输出的单波长激光器的耦合效率一般在 50% 左右^[10]。由于应用的荧光染料不同,高级荧光显微系统的光源一般由多个波长的激光组成,国外已有多波长耦合输出的激光系统相关产品,但受限于特种光纤的制备和多波长耦合技术的落后,国内还一直未有成熟的产品面世。本文研发了一种可用于 400~680 nm 多波长激光的耦合器,可将此波段内的多种波长激光耦合进一根单模光纤,并且各波长激光都有较高的耦合效率。

2 原理

耦合器主要由四维调整架和耦合光纤部件组成,如图 1 所示。四维调整架^[11]是参考英国 kineFLEX 系列产品自主研发设计的。这款调整架在 X 和 Y 两个方向前后各有两个调节旋钮,可实现 XY 两轴平移和倾斜 4 个自由度的调节。四维调整架配合耦合光纤部件工作,由于耦合光纤部件预先调节好耦合透镜和光纤的 Z 轴相对距离,因此四维调整架只需调节好入射激光相对于耦合透镜的入射位置和角度,即可满足 4 个自由度的调节需求。与同类型成熟的耦合产品相比(如索雷博的 FiberPort 系列耦合器),FiberPort 系列耦合器需要调节 5 个自由度,调节难度上该耦合器低了一个数量级;调节时间上,自研耦合器只需几分钟,大幅减少。因此,自研耦合器在实际应用中具有明显的优势。

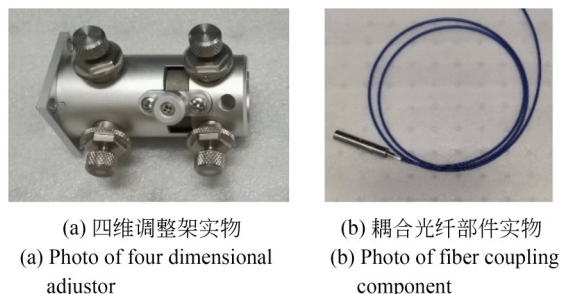


图 1 光纤耦合器

Fig. 1 Optical fiber coupler

该耦合器的关键组成部分是耦合光纤部件。耦合光纤部件主要由耦合透镜和单模光纤两部分组成,通过精密的装配方法调节耦合透镜与单模光纤的相对位置,使它们成为一个组件。

光纤选型是一项重要的工作。因为接近 400 nm 的紫光部分在普通光纤中的损耗较大,普通光纤很难覆盖整个可见光波段。这里选择 Nufern 公司的 PM-S405-XP 特种光纤,这是一款熊猫型单模保偏光纤,其特点是在整个可见光范围内具有很高的传播效率,光纤参数如表 1 所示。光纤接头采用带陶瓷插芯的 FC/PC 或 FC/APC 这种适用于单模光纤的接头,此类接头的定位精

度较高。研究表明,用带有斜 8° 角的FC/APC接头会比FC/PC接头更适合于单模光纤耦合,因为FC/PC的平端面将部分激光反射回激光光源系统,这可能会引入光学噪声,导致激光波长的漂移和光谱的展宽^[12]。

表 1 单模光纤参数

Tab. 1 Parameters of SM fiber

Fiber model	PM-S405-XP
Operating wavelength	400~680 nm
Core NA	0.12
Mode field diameter	(3.3±0.5) μm@405 nm (4.6±0.5) μm@630 nm
Cladding diameter	(125.0±1.0) μm
Core diameter	3 μm
Coating diameter	(245±15) μm
Core/clad offset	≤0.6 μm
Coating concentricity	<5.0 μm

2.1 耦合透镜设计

耦合透镜的作用是将平行的激光聚焦于一点进入光纤中。光纤耦合一般需满足两个条件:一是聚焦后的激光光斑要小于光纤的模场直径(Modal Field Diameter, MFD);二是激光聚焦后入射光纤的NA(角度)要小于光纤接收光的最大NA。通常情况下,无法将所有激光都耦合进光纤,常用耦合效率这项指标来评判光纤耦合的效果,其定义为:

$$\eta = P/P_0, \quad (1)$$

其中: η 是耦合效率, P_0 是进入光纤前的激光功率, P 是光纤输出的激光功率。为了达到较高的耦合效率,耦合透镜的设计是关键,耦合透镜焦距的选择尤为重要。因为耦合透镜焦距不仅决定了激光聚焦后光斑的尺寸,也决定了激光入射光纤NA的尺寸。为了满足光纤耦合条件且追求尽量高的耦合效率,激光的衍射极限光斑应该等于光纤的MFD,如图2(a)所示。根据以下公式来计算:

$$D_{MF} = \Phi_{\text{sopt}} = \frac{4\lambda f}{\pi D}, \quad (2)$$

其中: Φ_{sopt} 是衍射极限光斑直径, λ 是激光波长, f 是耦合透镜焦距, D 是入射光斑直径(一般用 $1/e^2$ 能量处的光斑来计算)。因此,式(2)可以推

算出耦合透镜的焦距 f :

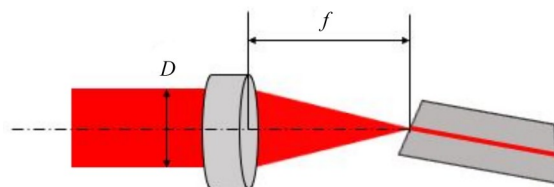
$$f = \frac{\pi D \cdot D_{MF}}{4\lambda}. \quad (3)$$

光纤选型后可以得知其模场直径 D_{MF} 在 $\lambda = 405$ nm波长下是 $3.3 \mu\text{m}$,在 $\lambda = 630$ nm波长下是 $4.6 \mu\text{m}$ 。激光器输出光斑直径(束腰处)为 $0.7 \sim 1$ mm,代入式(3)得到耦合透镜焦距是 $4 \sim 6.4$ mm。

由于激光的入射光束是高斯分布,其光斑直径在束腰位置处最小,由束腰位置往两头延伸光斑直径会逐渐变大,在光纤耦合时需要注意调节束腰位置。通常情况下,无法将束腰位置刚好调在耦合透镜的入射面,因此定义一个工作距离的最大范围 A ,如图2(b)所示。在此范围内认为激光光斑直径近似等于束腰直径, A 的计算公式为:

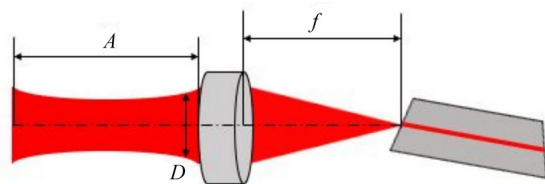
$$A \leq 2f + \frac{D^2 \cdot \pi}{4\lambda}. \quad (4)$$

确定了耦合透镜的焦距值,再考虑透镜的尺寸、工作距等细节情况,耦合透镜设计的基本要求如下:



(a) 光纤耦合计算

(a) Calculation of fiber coupling



(b) 束腰位置工作距计算

(b) Calculation of working distance of beam waist position

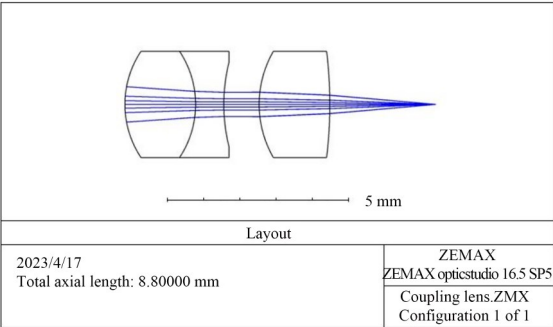
图 2 光纤耦合原理示意图

Fig. 2 Schematic of fiber coupling principle

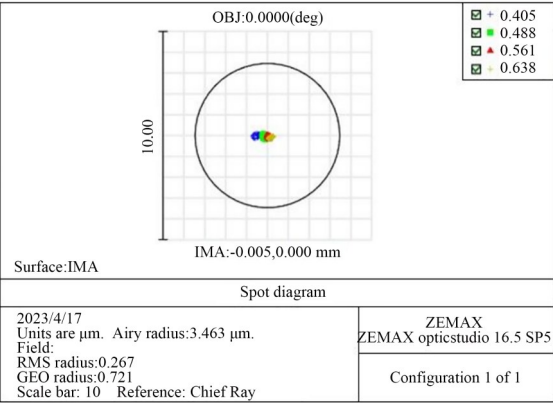
- (1) 焦距为 $4.0 \sim 6.4$ mm,工作距 ≥ 2 mm;
- (2) 透镜口径 ≤ 3 mm;
- (3) 以 $405, 488, 561$ 和 638 nm这4个生物荧光成像常用的激发波段作为设计波长;

- (4)聚焦后光斑小于衍射极限;
- (5)在 400~680 nm 内由色差引起的焦点漂移小于 5 μm 。

通常将非球面透镜^[13]或双胶合消色差透镜用作耦合透镜。非球面镜一般用于单一波段激光的耦合,它能改善单透镜成像时的球差,使聚焦后的光斑达到衍射极限,但无法消除多波长系统的色差。因此,多波段激光耦合系统通常选用双胶合消色差透镜作为耦合透镜。为了达到更好的消色差效果,用Zemax仿真设计了一种3片式透镜组,在评价函数中重点控制轴向色差,通过玻璃配对实现色差要求。透镜组由一片双胶合和一片单透镜组成,其模型如图3(a)所示。该透镜组的焦距是5.86 mm($\lambda=488\text{ nm}$),工作距离为3 mm,口径为3 mm。图3(b)是耦合透镜组的点列图,可以看出聚焦光斑是满足衍射极限的。此外,通过单模光纤耦合效率仿真,4种波长



(a) 耦合透镜组模型
(a) Shape model of the coupling lens



(b) 耦合透镜组点列图
(b) Spot diagram of the coupling lens

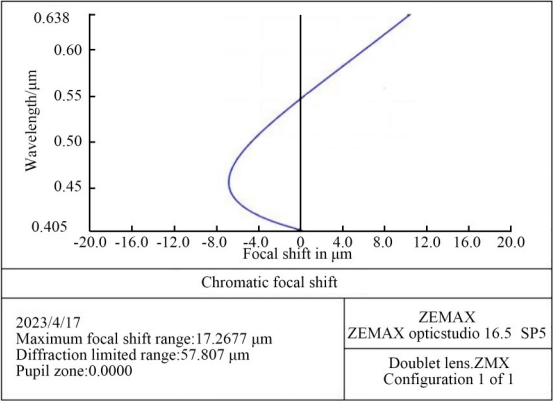
图3 耦合透镜设计

Fig. 3 Design of coupling lens

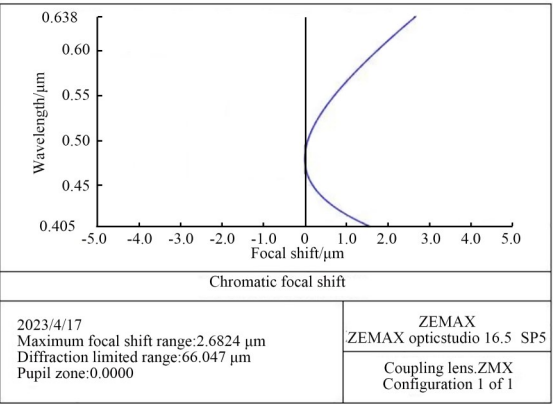
的耦合效率分别是61.4%,60.7%,60.3%和60.0%。

同时仿真了一款参数类似的双胶合透镜(Edmund公司型号45089,焦距为6 mm,口径为3 mm),将双胶合透镜与三片式透镜组进行比较。图4是二者焦点位置随波长的漂移曲线,双胶合透镜的焦点位置漂移小于20 μm ,三片式透镜组的焦点位置漂移小于3 μm 。综合考虑加工装调误差,不同波长下20 μm 的焦点漂移对耦合效率还是有影响的,但3 μm 的焦点漂移对耦合效率完全没有影响。因此,针对多波长激光耦合时,三片式透镜组的表现优于双胶合透镜。

耦合透镜设计完成后进行公差分析。常规的光学加工精度已能满足要求,仿真分析了透镜



(a) 双胶合透镜焦点位置随波长漂移曲线
(a) Chromatic focal shift of doublet lens model



(b) 三片式透镜组焦点位置随波长的漂移曲线
(b) Chromatic focal shift of triplet lens model

图4 两种透镜焦点位置随波长漂移曲线比较

Fig. 4 Comparison of chromatic focal shift of two lens models

装配对耦合效率的影响,发现透镜组和光纤端面之间的位置关系引起的误差对耦合效率的影响很大,主要是XY轴的偏移、XY轴的倾斜和Z轴(沿光轴方向)的偏移这5项装配公差,这些偏离

公差与耦合效率的关系如图5所示。根据图5,要使耦合效率尽量保持在最高水平,XY轴偏移量要控制在 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 以内,XY轴倾斜角要控制在 0.5° 以内,Z轴偏移量要控制在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以内。

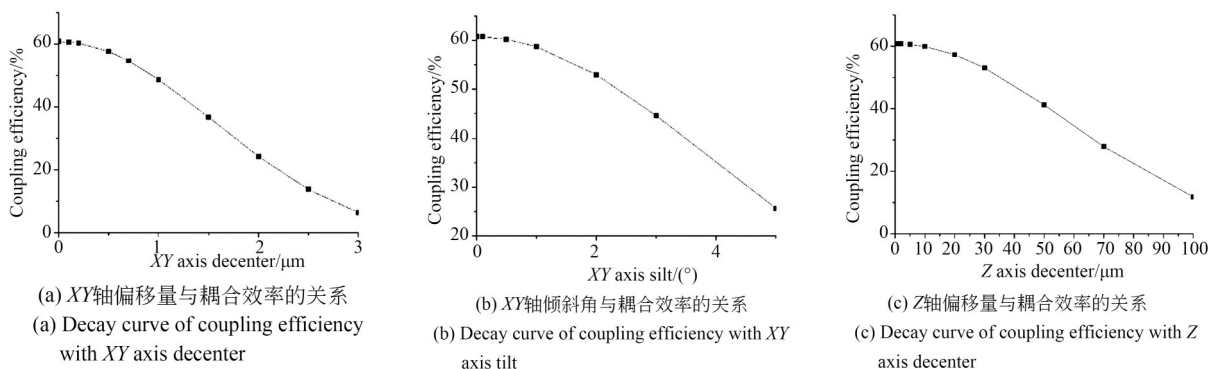


图5 耦合透镜与光纤端面装配误差对耦合效率的影响

Fig. 5 Decay curves of coupling efficiency with adjustment errors between coupling lens and fiber end face

2.2 耦合光纤部件的结构和装调

耦合光纤部件是需要插入四维调整架的。由于四维调整架的内孔是 $\Phi 12\text{ mm}$ 的圆孔,耦合光纤部件要与之配合就需要设计成外径相同的圆柱形结构,把耦合透镜和光纤接头安装在圆柱孔内并调节好耦合透镜与光纤端面的相对位置。耦合透镜和光纤端面的相对位置调节是最大的难点,一方面调节精度要求高,尤其是XY轴的偏移量要控制在 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 以内;另一方面,耦合光纤部件体积很小,一些高精度调节手段(如纳米位移台)难以使用。本文通过固定耦合透镜组位置来调节光纤端面的位置,因为调节耦合透镜会引入像差造成聚焦光斑变大,从而影响耦合效率。耦合光纤部件的结构如图6所示,耦合透镜组从前面安装到圆柱形外框内部并通过压圈固定,光纤接头从后面插入外框,在陶瓷插芯的前端有3个顶丝去调节陶瓷插芯从而改变光纤端面纤芯的位置,陶瓷插芯后端有一圈小台阶用来对陶瓷插芯限位并配合顶丝调节。在完成调节后,在圆柱形外框上还有几个小圆孔用来灌胶固定光纤接头,确保整个耦合光纤部件的稳定性。

耦合光纤部件的组装过程需要借助高精度长导轨,主要分为两个步骤。第一个步骤是检查

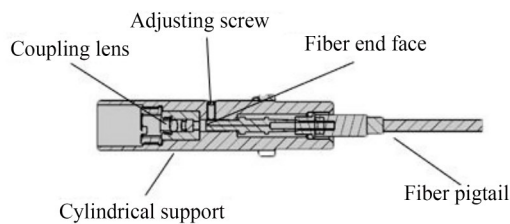


图6 耦合部件结构

Fig. 6 Structural of coupling component

耦合透镜组的安装情况,耦合透镜组预先安装在一个镜框内,由于透镜尺寸非常小,组装过程透镜可能会发生倾斜或偏心,因此组装后需要通过测试判断透镜组的安装质量。测试方法如图7(a)所示,用一台光纤耦合输出的激光器作为参考光源,光纤输出头安装在导轨上的四维调整架中,耦合透镜组通过一个固定座安装在导轨上,光束质量分析仪紧挨着耦合透镜组,参考激光调整好方向正入射到耦合透镜组后聚焦在光束质量分析仪上,通过前后移动耦合透镜组找到光束质量分析仪上出现最小光斑的位置,此时的光斑尺寸与理论值比较可以判断透镜组的安装质量。第二个步骤就是耦合光纤部件的调试,主要任务是调整光纤的位置。如图7(b)所示,激光光源和耦合光纤部件在导轨上尽量拉远,通过四维调整架确保激光正入射到耦合光纤部件内部的耦合透镜组,光纤接头的尾部固定在一维位移台上,

光纤的另一端接光功率计,通过3个顶丝调节光纤端面纤芯的 XY 位置和入射角度,再通过一维位移台调节光纤端面 Z 轴方向位置,调至光功率计接收的功率最高时即完成,此时点胶并松开一维位移台与光纤的连接。 XY 轴的偏移量要控制在 $0.2\ \mu\text{m}$ 内,但考虑到顶丝调节达不到这么高的精度,所以顶丝只是用于初定位,再通过四维调整架的精密调节可以使参考激光输入光纤的功率达到最高。

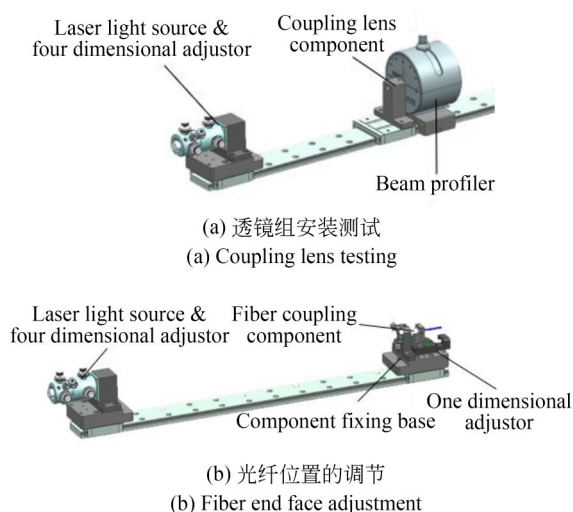


图7 耦合光纤部件装调

Fig. 7 Assembly and adjustment of fiber coupling component

为了进一步提高各激光波长的耦合效率,还需要对激光合束进行微调。不同波长合束时,其指向性之间的夹角决定了耦合时聚焦光斑的位置偏差:

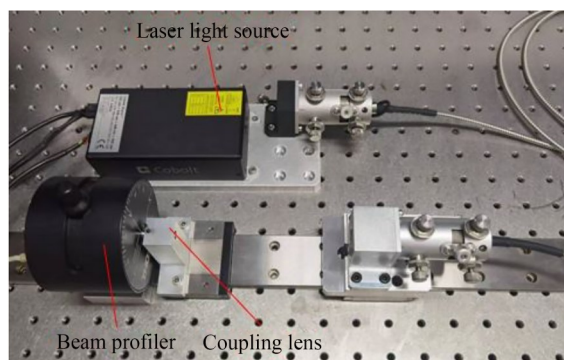
$$\Delta d = f \cdot \theta, \quad (5)$$

其中: Δd 是不同波长激光经过耦合透镜聚焦后光斑中心的距离, f 是耦合透镜焦距, θ 是不同波长激光合束时指向性之间的夹角。光纤耦合时,不同波长的激光光斑的重叠程度越高越好,因此为了减小 Δd ,就要减小不同波长激光指向性之间的夹角 θ 。通过微调用于激光合束的二色镜的角度,不同波长激光可以实现更好的合束性能,达到更高的耦合效率。

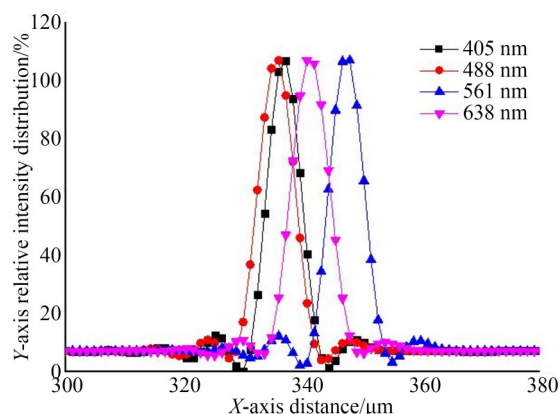
3 实验及讨论

3.1 耦合透镜测试实验

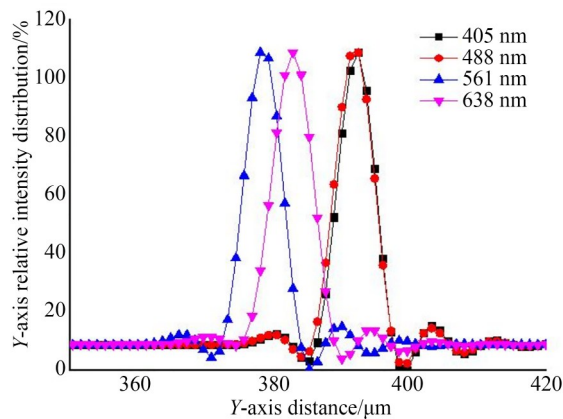
为了验证激光光斑聚焦后的性能,首先对耦合透镜组的性能进行测试。搭建的测试系统如图8(a)所示,激光光源采用Cobolt公司Skyra系列四波长激光器,4种波长分别是405,488,561和638 nm。经过测试,4种波长激光的光斑直径均是 $(0.7 \pm 0.1)\text{mm}$;以488 nm为参考波长测试激光合束性能,其他波长指向性与参考波长之间的角度小于 $0.1\ \text{mrad}$ 。光束质量分析仪(索雷博,BP209-VIS/M)可以测试 $2.5\ \mu\text{m}$ 的光斑。以488 nm激光为主,在光束质量分析仪上找到最小光斑的位置,此时测试4种波长在光束质量分析仪上的光斑尺寸和分布,其 X 轴和 Y 轴的光强分布如图8(b)和8(c)所示。从图中可以看出,各激光经过耦合透镜聚焦的光斑都有衍射效应,其主峰都是较好的高斯分布,光斑尺寸较小。不同波



(a) 耦合透镜组测试系统实物
(a) Photo of coupling lens testing system



(b) 耦合透镜焦平面 X 轴光斑分布
(b) X-axis spot light distribution of coupling lens at focal plane



(c) 耦合透镜焦平面Y轴光斑分布
(c) Y-axis spot light distribution of coupling lens at focal plane

图8 耦合透镜组测试结果

Fig. 8 Result of coupling lens test

长激光光斑的中心位置有小于十几微米的偏差,这主要是测试系统误差造成的。由于不同波长的光斑强度分布不是同一时间采集的,测试系统的振动会导致主峰的中心位置发生轻微抖动。对测试结果进行计算,用一定距离内的强度积分与整个主峰内的强度积分之比作为耦合效率的预估值,由于光纤的模场直径是 $3.3(\lambda = 405\text{ nm}) \sim 4.6\text{ }\mu\text{m}(\lambda = 630\text{ nm})$,结合测试数据计算 $3.6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $4.8\text{ }\mu\text{m}$ 下(光束质量分析仪测试数据间隔是 $1.2\text{ }\mu\text{m}$) 4 种波长的耦合效率,如表 2 所示。从测试数据来看,耦合效率在 $60\% \sim 81\%$ 内,符合设计预期,耦合透镜的加工和装配没有明显的误差。

表 2 耦合效率计算结果

Tab. 2 Calculation result of coupling efficiency (%)

Wave-length/ nm	X-axis light intensity distribution		Y-axis light intensity distribution	
	Within		Within	
	$3.6\text{ }\mu\text{m}$	$4.8\text{ }\mu\text{m}$	$3.6\text{ }\mu\text{m}$	$4.8\text{ }\mu\text{m}$
405	69	81	69	81
488	63	75	67	78
561	66	76	69	80
638	60	60	62	74

3.2 耦合光纤部件装调实验

实验系统如图 9 所示,选用 488 nm 激光进行调试,用 Thorlabs 公司的光功率计(探头型号

S120C,表头型号 PM100D)先测试入射端激光功率,再放置到光纤出射端测试激光功率。入射激光通过四维调整架调整确保正入射到耦合透镜组,调整 3 个顶丝直至功率计显示功率值最高;然后再沿着功率升高的方向微调一维位移台,再微调顶丝至功率值最高,反复迭代调节直至功率值不再上升,此时通过调节四维调整架使激光功率继续上升直至达到最高值。调节好后固定住光纤与外框之间的相对位置,用功率计测试激光功率,计算耦合效率,如表 3 所示。4 种波长的耦合效率在 $68\% \sim 72\%$ 内,耦合效率保持较高且相对稳定的水平。

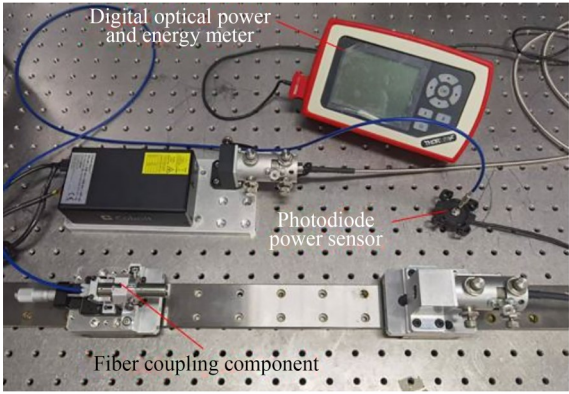


图9 耦合光纤部件装调

Fig. 9 Assembly and adjustment of coupling devices

表 3 耦合效率测试结果

Tab. 3 Coupling efficiency test result

Wave-length/nm	Power before coupling/mW	Power after coupling/mW	Coupling ef- ficiency/%
405	37.8	25.8	68.3
488	38.5	26.6	69.1
561	41.2	29.3	71.1
638	39.4	28.1	71.3

3.3 光纤耦合实验

对安装调试好的耦合光纤部件进行测试,将部件插入连接四波长激光光源的四维调整架中,光纤输出端连接光功率计探头,打开 488 nm 激光,调整四维调整架旋钮使光功率计上的功率值最大,此时依次测试 4 种波长激光功率,耦合效率计算结果如表 4 所示。4 种波长的耦合效率均大于 65% ,在 $65\% \sim 70\%$ 内。

表 4 耦合效率测试
Tab. 4 Coupling efficiency test

Wave-length/nm	Power before coupling/mW	Power after coupling/mW	Coupling Efficiency/%
405	54.0	35.3	65.4
488	53.3	35.0	65.7
561	53.6	37.2	69.4
638	51.2	34.5	67.4

从实验结果来看,耦合光纤部件的耦合效率达到了较高的水平,耦合效率在耦合透镜测试实验中的预估范围内。比较表 3 和表 4,发现耦合光纤部件装调时的耦合效率比最终测试时要稍高一些,其原因可能是装调实验中入射耦合光纤部件的激光是从一根单模光纤中出射的,其光束

质量比进行耦合实验时的自由空间输出的激光更好,因此耦合效率相对也更高。

4 结 论

针对多波长激光耦合产品国产化的问题,本文研究了多波长单模激光耦合的关键技术,研发了一套可用于 400~680 nm 的多波长激光耦合进单模光纤的耦合器,采用三片式耦合透镜组消除不同波长间的色差从而得到更高的耦合效率,经测试不同波长激光的耦合效率均在 65% 以上。为了推进耦合器的产业化进程,还需要对耦合器进行大量的测试,通过不断的优化来提高其稳定性和可靠性,争取早日实现多波长单模光纤耦合激光器的国产化。

参考文献:

[1] HEGER L, LÜHR J J, AMON L, *et al.* Six-color confocal immunofluorescence microscopy with 4-laser lines[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2021, 2350: 21-30.

[2] 纵浩天,张运海,王发民,等. 大视场线扫描共聚焦全息显微成像[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 1-9.

ZONG H T, ZHANG Y H, WANG F M, *et al.* Large field of view line-scanning confocal holographic microscopy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(1): 1-9. (in Chinese)

[3] DUNST S, TOMANCAK P. Imaging flies by fluorescence microscopy: principles, technologies, and applications[J]. *Genetics*, 2019, 211(1): 15-34.

[4] 常松涛,夏豪杰. 时间延迟积分荧光显微成像平场校正技术[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(5): 527-535.

CHANG S T, XIA H J. Flat field correction technique for time delay integration fluorescence microscopy imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(5): 527-535. (in Chinese)

[5] LADOUCEUR A M, BROWN C M. Fluorescence microscopy light source review[J]. *Current Protocols*, 2021, 1(9): e243.

[6] LI R, LIU A, WU T, *et al.* Digital scanned laser light-sheet fluorescence lifetime microscopy with wide-field time-gated imaging[J]. *Journal of Microscopy*, 2020, 279(1): 69-76.

[7] JIANG Y, LIU Y Y, LIU X, *et al.* Organic solid-state lasers: a materials view and future development[J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, 49(16): 5885-5944.

[8] 王立军,宁永强,秦莉,等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.

WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.* Development of high power diode laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(1): 1-19. (in Chinese)

[9] 刘翠翠,王鑫,井红旗,等. 三波长合束单管激光器光纤耦合模块设计[J]. *发光学报*, 2018, 39(3): 337-342.

LIU C C, WANG X, JING H Q, *et al.* Design of fiber-coupled laser diode module based on three-wavelengths multiplexing by ZEMAX[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(3): 337-342. (in Chinese)

[10] ZHU M Z, SHEN Y, CHILUISA A J, *et al.* Optical fiber coupling system for steerable endoscopic instruments[J]. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Annual International Conference*, 2021, 2021: 4871-4874.

[11] 帅洪,王弼陡,于波,等. 用于光纤终端的四维调

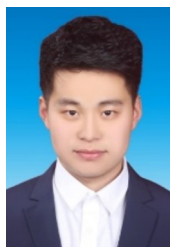
- 整装置: CN210129053U[P]. 2020-03-06.
- SHUAI H, WANG B, YU B, *et al.* Four-dimensional adjusting device for optical fiber terminal: CN210129053U[P]. 2020-03-06. (in Chinese)
- [12] 门巴耶夫(美)沙伊纳. 光纤通信技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 369.
- SHAYNA M. *Fiber Optic Communication Technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 369. (in Chinese)
- [13] 陈海涛, 杨华军, 黄小平, 等. 基于非球面透镜的光纤耦合系统设计[J]. 激光与红外, 2013, 43(1): 76-78.
- CHEN H T, YANG H J, HUANG X P, *et al.* Design of optical fiber coupling system with an aspherical lens [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(1): 76-78. (in Chinese)

作者简介:



周旻超(1985—),男,江苏无锡人,博士研究生,副研究员,2011年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事高/超分辨显微成像的研究。E-mail: zhoumc@sibet.ac.cn

通讯作者:



王振亚(1993—),男,江苏镇江人,硕士,助理研究员,2018年于苏州科技大学获得硕士学位,主要从事高/超分辨显微成像的研究。E-mail: wangzy@sibet.ac.cn