

2.79 μm Cr, Er: YSGG 激光光纤耦合的实验探究

黄磊^{1,2}, 熊正东^{2,3}, 程庭清², 江海河²

- (1. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽合肥 230601;
2. 中国科学院合肥物质科学研究院健康与医学技术研究所, 安徽合肥 230031;
3. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026)

摘要: 采用传能光纤替代导光臂传输激光能量能够极大地改善医用手柄的灵活性、降低系统复杂程度、提高激光传输效率。设计研制了 2.79 μm Er, Cr: YSGG 激光器及其光纤耦合系统。分析了激光器谐振腔输出镜对输出高斯光束参数的影响, 设计弯月型透镜作为激光器谐振腔输出镜减小激光光束发散角, 并选择合适的耦合单透镜, 满足了数值孔径为 0.29、芯径为 400 μm 的 ZBLAN 玻璃光纤耦合条件。实验结果表明, 在弯月型透镜作为激光输出镜, 耦合透镜焦距为 20 mm 时, 可实现激光传输耦合效率高达 83%, 最大传输功率 6 W, 满足了激光医疗仪器的临床应用需求。

关键词: Cr, Er: YSGG 激光; 单透镜; 谐振腔; 光纤; 空间耦合

中图分类号: TN242 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210236

Experimental investigation of 2.79 μm Cr, Er: YSGG laser fiber coupling

Huang Lei^{1,2}, Xiong Zhengdong^{2,3}, Cheng Tingqing², Jiang Haihe²

- (1. Institute of Material Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;
2. Institute of Health and Medical Technology, Hefei Institute of Physical Science,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Using the energy transmitting fiber to replace the optical guide arm can greatly improve the flexibility of the medical handle, reduce the complexity of the system and improve the efficiency of laser transmission. A 2.79 μm Er, Cr: YSGG laser and its fiber coupling system were designed and developed. The influence of the output mirror of the laser resonator on the parameters of the output Gaussian beam was analyzed. A meniscus type lens was designed as the output mirror of the laser resonator to reduce the divergence angle of the laser beam, and a suitable coupling single lens was selected to meet the coupling conditions of the ZBLAN glass fiber with a numerical aperture of 0.29 and a core diameter of 400 μm . The experimental results show that when the meniscus type lens is used as the laser output mirror and the focal length of the coupling lens is 20 mm, the coupling efficiency of the laser transmission can reach up to 83%, and the maximum transmission power is 6 W, which meets the clinical application requirements of the laser medical instrument.

Key words: Cr, Er: YSGG laser; single lens; resonant cavity; fiber; space coupling

收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2021-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61675212); 国家重点研发计划 (2018YFB0407204)

作者简介: 黄磊, 男, 硕士生, 主要从事固体激光技术方面的研究。

导师简介: 江海河, 男, 研究员, 博士生导师, 硕士, 主要从事激光技术与光机电一体化应用方面的研究。

0 引言

伴随着激光技术的发展,不同波长的激光被逐渐运用在牙科治疗、医疗美容等医用场景中^[1]。相比于其他波长,2.79 μm 的 Cr, Er:YSGG 激光由于刚好处于水分子和羟基磷灰石的强吸收峰区域,在生物医疗应用领域有着无可比拟的优势。激光可通过导光臂或光纤传输系统将能量输送到治疗处。目前临床上激光医疗仪器传输激光的方式大多是采用导光臂传输,其多关节处数个镜片对光束大角度的反射造成传输损耗较大,刚性结构难以实现口腔等狭小空间任意方位的灵活操作。导光臂中反射镜镀膜系数在 0.90~0.95 之间,传输效率仅在 70%~75% 之间,在临床应用导光臂传输激光能量还存在一定的局限性和不尽人意的地方。由于激光在光纤内部是以全反射的方式传播,具有高传输效率的优点,同时光纤介质柔软具有可柔性传输且结构简单等优点^[2],采用传能光纤传输激光能量,可以在一定程度上弥补导光臂的局限性。

由于 Cr, Er:YSGG 激光的波长处于中红外波段,而很多高分子材料,特别是含有羟基的材料,对中红外波段都有强烈的吸收,导致了钬激光的传能光纤探索研发进展缓慢。Bonner、Ravi 等人^[3-4]在 1988 年发现重金属氟化物玻璃 (HMFG) 光纤适合 2.94 μm 的 Er:YAG 激光能量传输;在此基础上,Whitehurst、Stefan 等人^[5-7]进一步发展了复合氟化物玻璃 (ZBLAN) 光纤,传输最大激光能量密度可达 1.0 kJ/cm²;美国 Tran 等人^[8]在 1994 年实验证明了锗酸盐玻璃光纤可传输单脉冲能量 2 J 的 Er:YAG 脉冲式激光,在 10 Hz 情况下传输平均功率达 20 W,最大功率密度约为 360 MW/cm²,平均效率为 75%。经过多年的发展,ZBLAN 光纤已成为目前可实现的传输钬激光能量的光纤传输系统^[9-10],但耦合效率还需要进一步提升。目前,氟化物光纤作为 2.79 μm 的 Cr, Er:YSGG 激光能量传输介质,德国 Doctor Smiles 公司研究人员通过激光光束整形的方法实现最大传输功率 5.3 W、平均耦合效率 65% 的光纤激光输出,但在临床应用上还存在一定的局限性。

光纤芯径小,数值孔径有限,以及激光光束发散角较大等因素通常会给光学耦合带来较大的困难。目前大多采用单透镜或透镜组等耦合装置通过改变

激光光束参数来实现与光纤的耦合。虽然透镜组可实现激光与光纤的高效率耦合,但是其系统复杂性给制造和调节增加了难度,且光学元件较多导致在传输的过程中损耗增加,特别是在中红外波段时,传输损耗尤为突出。单透镜耦合装置结构简单备受关注,但使用单透镜耦合时,由于单透镜的参数可变化有限,这就对激光束空间特性提出更高要求,就需要激光光束参数、耦合光纤参数以及耦合透镜参数三者相互匹配,以获得更高的耦合效率。提高光纤与空间激光耦合效率已成为光纤应用中的一项关键技术,对扩大传能光纤的应用有着重要的研究价值。

文中统筹考虑了激光光束参数、耦合光纤参数以及耦合透镜参数三者的相互匹配关系,设计研制采用单透镜耦合装置实现 2.79 μm Er, Cr:YSGG 激光与 ZBLAN 光纤之间的高效耦合。在充分考虑光纤参数的基础上,以及几何光学成像理论的拉-赫不变原理,研究设计固体激光器的谐振腔,得到满足光纤耦合条件的光束参数。基于高斯光束通过透镜的传输规律,分析耦合透镜的焦距对像方激光光斑尺寸的影响,同时基于光纤参数计算得到最佳耦合透镜参数。利用满足光纤耦合条件的单透镜作为耦合透镜,开展了在不同的激光输入功率下耦合效率变化情况的实验。

1 激光器谐振腔设计

设计合理的激光器谐振腔腔型,不仅获得较大的激光输出能量,也使得输出激光光束参数满足光纤的耦合条件。激光器谐振腔输出高斯光束远场发散角 θ 的关系式为^[11]:

$$\frac{1}{\rho_2} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{1}{R_1} \quad (1)$$

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\omega(z)}{z} = \left[\left(\frac{\omega_2}{\rho_2} \right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi \omega_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: n 为谐振腔输出镜的折射率; R_1 和 R_2 分别为输出镜的内外曲率半径; ρ_2 为出射光束等相面曲率半径; ω_2 为出射高斯光束半径; $\omega(z)$ 为 z 处光斑半径; λ 为激光波长。

从公式 (1) 和 (2) 可以看出,谐振腔输出镜的内外曲率半径以及腔镜的折射率对输出高斯光束远场发散角有较大影响。在不考虑传输系统的像差时,从激

激光器谐振腔出射后的激光光束在传输过程中其光束参数乘积 BPP 值保持不变,即激光光束束腰半径和发散角成反比例关系,发散角增大时,束腰光斑直径就增大。从激光器谐振腔出射的高斯光束必须满足光纤的耦合条件,才能经过耦合透镜变换后与光纤参数相匹配。光纤耦合条件为激光光束束腰半径与远场发散角乘积的 BPP 值必须满足^[12]:

$$BPP < \frac{1}{2}d_{core} \cdot \arcsin NA \quad (3)$$

式中: d_{core} 为光纤芯径; NA 为光纤的数值孔径。

谐振腔腔型为平凸型,为非稳定腔。通过理论计算前腔镜焦距,但 $217 \text{ mm} < R_1 < 412 \text{ mm}$ 和 $279 \text{ mm} < R_2 < 453 \text{ mm}$ 时,输出光束参数乘积满足 ZBLAN 光纤的耦合条件。通过对比不同焦距的透镜作为输出镜时的激光输出功率的大小,能够从中选择最优参数的透镜作为谐振腔输出镜。采用焦距分别为 $R_1=250 \text{ mm}$, $R_2=300 \text{ mm}$ 和 $R_1=300 \text{ mm}$, $R_2=350 \text{ mm}$ 以及 $R_1=350 \text{ mm}$, $R_2=400 \text{ mm}$ 的氟化钙透镜作为耦合透镜,测量它们的输出功率的对比图,如图 1 所示。

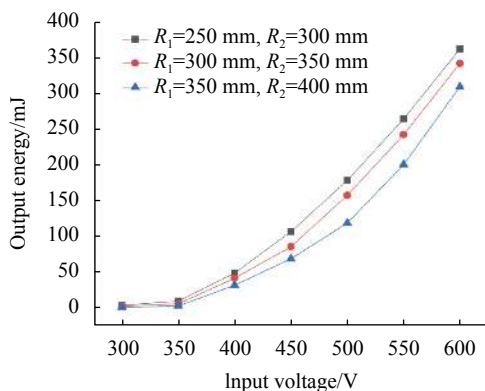


图 1 不同参数的透镜对应输出功率的关系图

Fig.1 Diagram of output power of lens with different parameters

从实验结果可以看出,在进行耦合实验时,在满足光纤耦合的条件下,尽可能地选择使激光器输出功

率较大的透镜作为谐振腔的输出镜。最终选择了参数为 $R_1=250 \text{ mm}$, $R_2=300 \text{ mm}$ 的弯月形透镜作为谐振腔输出镜,并通过实验测量了不同参数的透镜作为耦合透镜时其输出激光的 BPP 值,来验证理论计算的准确性。

在激光器输出光束直径一定的情况下,若激光束远场发散角较大,其光束参数乘积不满足光纤耦合条件,就无法耦合进光纤。实验中的 ZBLAN 光纤数值孔径 $NA=0.29$ 、光纤芯径为 $400 \mu\text{m}$ 。由公式 (3) 计算得到耦合的激光光束参数 BPP 值需要小于 $59.2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 才能满足光纤耦合条件。从公式 (1)、(2) 可以看出,采用不同曲率半径的透镜替代平面镜作为谐振腔输出镜,可以改变输出光束的发散角。为此,笔者设计了弯月型输出镜的激光器谐振腔,以减小激光光束发散角。实验中激光器采用 Er, Cr:YSGG 晶体圆棒的尺寸为 $\Phi 4 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$, Er^{3+} 的浓度为 20at.%, Cr^{3+} 的浓度为 3at.%, 晶体棒的两端镀有对 $2.79 \mu\text{m}$ 的增透膜,后腔镜为平面全反镜,在 $2.79 \mu\text{m}$ 处反射率 $>99\%$,用不同曲率半径的弯月型氟化钙透镜作为输出镜,其折射率 $n=1.4349$,凹面面向腔内,两边镀有增透膜,对 $2.79 \mu\text{m}$ 波长的激光透过率为 $T=20\%$ 。由于激光从激光器输出后其光束参数乘积是保持不变的,可测量激光器输出端后任意位置处的光束参数乘积来表示激光器输出光束参数。实验采用距离激光输出镜 16 cm 处作为测量点,测量不同曲率半径的弯月型透镜作为输出镜的激光光束发散角和光斑直径,并计算它们的 BPP 值如表 1 所示。

通过实验数据计算得到第四组激光束的参数乘积 BPP 值为 $33.57 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,满足光纤耦合条件。因而选用曲率为 $R_1=250 \text{ mm}$ 、 $R_2=300 \text{ mm}$ 的弯月型透镜作为激光器谐振腔的输出镜。

表 1 不同参数输出镜对应的发散角

Tab.1 Divergence angle of the output mirror with different parameters

	Output mirror parameters/mm	Divergence angle/mrad	Spot diameter/mm	BPP value/mm·mrad
1	$R_1=\infty, R_2=\infty$	44.63	5.91	131.90
2	$R_1=150, R_2=200$	31.10	6.03	93.77
3	$R_1=200, R_2=250$	27.62	5.37	74.10
4	$R_1=250, R_2=300$	20.60	3.26	33.57

2 耦合透镜分析

激光光束经过透镜后其光束参数会发生变化。透镜可作为激光光束与光纤之间的耦合元件,用于改变激光光束参数,使得传输到光纤端面的激光光斑小于光纤芯径,同时激光光束发散角小于光纤的数值孔径,以保证光束能量全部耦合进入光纤。耦合到光纤端面的光束参数是由耦合透镜焦距、物方高斯光束共焦参数、像方光束束腰半径以及其距离透镜的物距共同决定^[13]。在短焦距透镜且入射光束束腰距前焦点足够远时,像方光斑可表示为:

$$\omega_1 = \frac{f\lambda}{\pi\omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda r}{\pi\omega_0^2}\right)^2}} = \frac{f\lambda}{\pi\omega(l)} \quad (4)$$

经过透镜变换后激光光束的发散角为: $\theta_1 = 2\frac{\lambda}{\pi\omega_1}$, 像方数值孔径为:

$$R_{NA} = n \sin \frac{\lambda}{\pi\omega_1} \quad (5)$$

式中: ω_0 和 ω_1 分别为物方光束束腰半径和像方光束束腰半径; r 为高斯光束束腰距透镜的距离; $\omega(l)$ 为高斯光束入射至透镜表面处的束腰半径; n 为激光所在介质的折射率,空间激光到光纤端面之间充满空气,空气折射率 $n=1$ 。激光光束在空气中传播时,单透镜的焦距越小,像方束腰数值越小,聚焦效果越好。但在光纤能量传输时,不能一味追求小的光斑,光斑越小发散角也就越大。耦合透镜的选择不仅要考虑像方光斑小于光纤芯径同时还要考虑光纤端面的发散角也要小于光纤的数值孔径。

针对文中实验中的 ZBLAN 玻璃光纤,光纤端面的激光光斑大小以及发散角需满足的条件为: $\omega_1 \leq 400 \mu\text{m}$, $R_{NA} \leq 0.29$ 。实验测得透镜表面光束束腰半径 $\omega(l)$ 为 1.5 mm,代入公式 (4)绘制的像方腰斑 ω_1 与透镜焦距 f 的关系图 (图 2)可以看出,当透镜焦距 $f < 675 \text{ mm}$ 时,像方光斑小于光纤芯径 $400 \mu\text{m}$ 。从公式 (5)绘制的像方激光光束数值孔径 R_{NA} 与像方光斑半径 ω_1 的关系图 (图 3)可以看出,当像方激光光束腰斑大于 $3 \mu\text{m}$ 时,像方光束数值孔径均小于光纤的数值孔径 0.29,此时对应的透镜焦距为 $f=5.17 \text{ mm}$,只有当 $f > 5.17 \text{ mm}$ 时,像方激光光束数值孔径才始终小于

光纤的数值孔径。通过以上计算对比发现,使得像方激光光斑直径小于 $400 \mu\text{m}$,同时光束发散角小于 0.29 的透镜焦距范围为: $5.17 \text{ mm} < f < 675 \text{ mm}$ 。根据市面上以及实验室已有的透镜参数,最终选择焦距为 20 mm、50 mm、75 mm、100 mm 和 300 mm 氟化钙凸透镜作为耦合透镜,两面镀上对波长为 $2.79 \mu\text{m}$ 激光传输的增透膜,实验对比了不同参数的耦合透镜对耦合效率的影响。

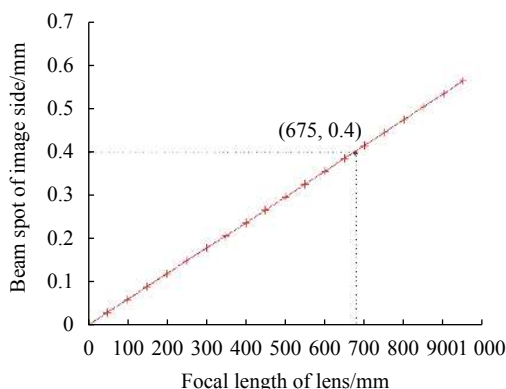


图 2 像方腰斑 ω_1 与透镜焦距 f 的关系

Fig.2 Relationship between waist spot ω_1 of image side and focal length f of lens

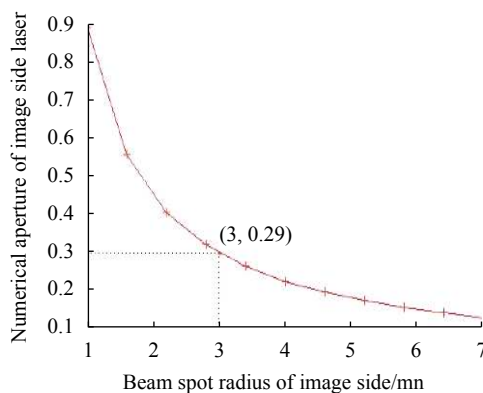


图 3 像方激光数值孔径 R_{NA} 与光斑半径 ω_1 的关系

Fig.3 Relationship between numerical aperture R_{NA} and spot radius ω_1 of image side laser

图 4 为采用在焦距范围内的不同焦距的透镜对耦合效率的影响对比图。从实验结果可以看出,随着透镜焦距的增大,输出激光能量在降低。尽管它们之间相差不大,但是为了得到最高的耦合效率,笔者在实验中采用了焦距为 20 mm 的氟化钙透镜作为耦合透镜。

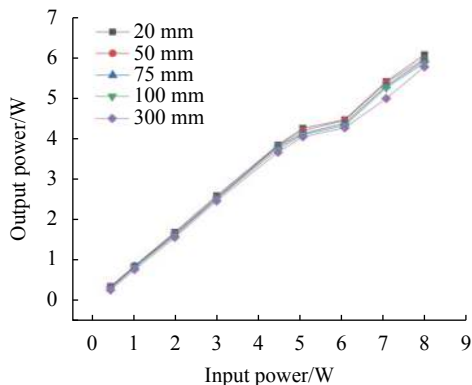


图 4 不同耦合透镜对应的耦合效率

Fig.4 Coupling efficiency of different coupling lenses

3 实验结果与分析

实验中为了便于调节光纤端面位置,把光纤固定在五维调整架上,光纤两头接有 SM905 接口,激光器采用灯泵侧面泵浦的方式进行激发。图 5 为实验光路示意图。

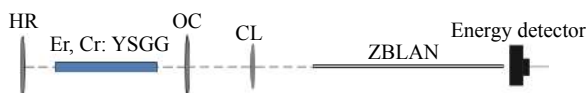


图 5 单透镜耦合实验光路示意图

Fig.5 Light path diagram of single lens coupling experiment

由于激光医疗仪器的导光臂输入端距激光器输出端面的距离为 32 cm,便于今后采用光纤替代导光臂传输,在实验阶段进行测量时,同样将光纤输入端放置距激光器输出面 32 cm 处。在激光频率为 20 Hz,电压为 450 V 时,通过光斑相机 (Pyrocam III-C-A, SPIRICON) 分别测量了激光器输出端光斑图以及光纤端面的光斑图。为了避免 CCD 的损坏,选择了反射率为 98% 的镜片获得合适的衰减量。测得激光器输出端和光纤端面的光斑直径分别为 5.24 mm 和 0.32 mm,同时依据固体激光器参数测量标准,采用刀口法分别测量了两处发散角分别为 12.82 mrad 和 0.21 mrad。图 6 和图 7 分别为激光器输出端和光纤端面的光斑图。

在测量误差允许范围内,通过实验数据分析发现,两处光束参数乘积 BPP 值分别为 33.58 mm·mrad 和 33.60 mm·mrad,符合几何光学成像理论的拉-赫不变原理。此时光纤端面的光斑直径为 0.32 mm,小于光纤芯径的 0.4 mm,发散角的大小为 0.21 rad,小于光

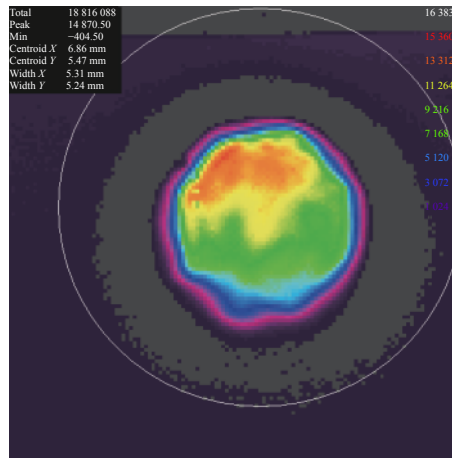


图 6 激光器输出端光斑

Fig.6 Spot of laser output end

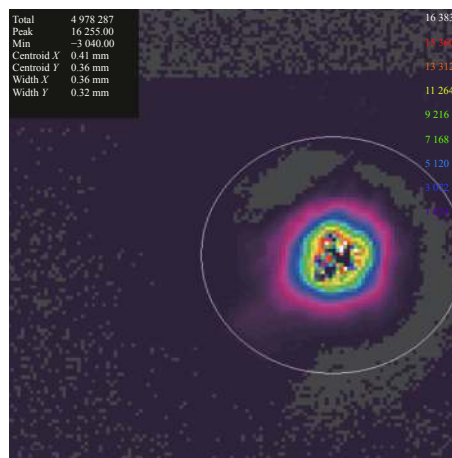


图 7 光纤端面光斑图

Fig.7 Spot image of optical fiber end

纤的数值孔径 0.29,满足 ZBLAN 光纤的耦合条件。在此条件下,开展了在不同的输入功率下耦合效率变化的实验。

图 8 为光纤输出功率以及光纤耦合效率与输入功率变化曲线,在不同的输入功率下激光与光纤耦合平均效率为 83%,最大输出功率为 6 W。图 8 中耦合效率随着泵浦输入功率的增加所体现出来的下降,主要是由光束质量的变化所造成的。随着激光器输入功率的增加,工作物质的热透镜效应就更明显,激光器的工作状态由稳区进入非稳区 [14-15],在稳区工作时激光器的光束质量优于非稳区状态下的光束质量,从而导致耦合效率的下降。此外,非激光器影响因素是随着输入功率的增加,光纤端面的热效应越来越明显,很大一部分能量被光纤所吸收,导致耦合效率大

大降低。影响耦合效率的因素除激光器及光纤本身因素外,耦合系统使用透镜的球差损耗以及激光与光纤机械对准误差等^[16]也会直接影响光纤的耦合效率。

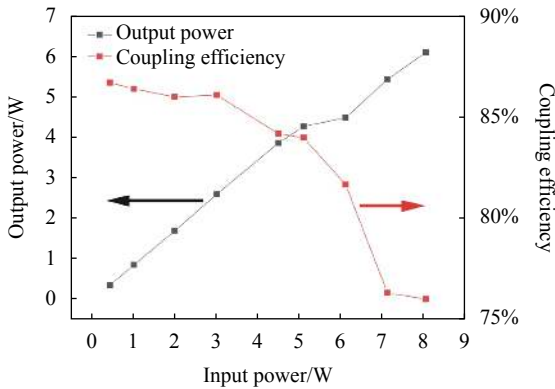


图 8 输出功率、耦合效率随输入功率的变化情况

Fig.8 Variation of output power and coupling efficiency with input power

4 结 论

文中采用单透镜作为耦合透镜,成功实现 2.79 μm Er,Cr: YSGG 激光与 ZBLAN 光纤的耦合,其结构简单且传输效率较高,能够很好地替代激光医疗设备上导光臂传输激光能量。此研究中激光与光纤的耦合受激光器输出光束发散角的影响,理论分析和实验研究表明,采用弯月型透镜作为激光器输出镜可减小激光光束发散角,提高激光与光纤的耦合效率。分析了单凸透镜对激光光束像方光斑以及数值孔径的影响,计算获得像方光束束腰半径小于光纤芯径且发散角小于光纤数值的透镜参数,在透镜参数可选范围内,选择了焦距为 20 mm 的氟化钙凸透镜作为耦合透镜,成功实现了激光与光纤的耦合。在不同的输入功率下激光与光纤耦合平均效率为 83%。最大输出功率为 6 W。该研究有助于对固体激光与传能光纤的传输特性进行深入了解,并对激光医疗仪器光传输技术的应用与发展具有重要的参考价值。

参考文献:

[1] Jabczynski J K, Zendzian W, Kwiatkowski J. Acousto-optic modulation in diode pumped solid state lasers[C]//Proceedings of SPIE, 2007, 6599: 65990B.
 [2] Liu Xingyang, Zhai Shangli, Pan Wang, et al. Research progress of energy transmission characteristics of infrared energy

transmission fiber [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(8): 907-913. (in Chinese)
 [3] Bonner R F, Provost L G, Leon M B, et al. New source for laser angioplasty Er: YAG laser pulses transmitted through zirconium fluoride optical fiber catheters[C]//Proceedings of SPIE, Optical Fibers in Medicine III, 1988, 906: 288-293.
 [4] Jain R K, Zhu Xiushan. Advances in materials and fibers for high power mid-infrared fiber lasers[C]//Workshop on Advanced Optoelectronic Materials & Devices. IEEE, 2008: 307-316.
 [5] Whitehurst C, Dickinson M R, Charlton A, et al. Transmission of 2.94 μm laser radiation by zirconium fluoride optical fibers[C]//Proceedings of SPIE, 1989, 1048: 141-144.
 [6] Stefan Wüthrich, Willy Lüthy, Weber H P. Optical damage thresholds at 2.94 μm in fluoride glass fibers [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(27): 5833-5837.
 [7] Itoh K, Miura K, Masuda I, et al. Low-loss fluorozirconaluminate glass fiber [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1994, 167(1-2): 112-116.
 [8] Tran D C. Heavy metal-oxide glass optical fibers for use in laser medical surgery and proces of making: US, US5796903[P]. 1998-08-18.
 [9] Wang Nimeng, Zhang Yanrong, Qing Dajia. Special fiber for high power infrared transmission [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, 40(3): 31-38. (in Chinese)
 [10] Huang Xiangrong. Status of infrared fiber for medical laser transmission [J]. *Laser Highlights*, 1994, 4(2): 32-35. (in Chinese)
 [11] Yu Benhai, Mao Guangcheng, Hu Xuehui. Study on the divergence Angle of output beam of multi-rod serial solid state laser [J]. *Laser Magazine*, 2007, 28(5): 29-31. (in Chinese)
 [12] Tian Xiao, Huang Baoyu, Zhang Jun, et al. 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. (in Chinese)
 [13] Lv Baida. *Laser Optics*[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1986: 89. (in Chinese)
 [14] Peter Verboven. Pulsed kilowatt Nd: YAG laser with fiber optic beam delivery[C]//Proceedings of SPIE, 1994, 2206: 416-425.
 [15] Fang Mingxing, Li Qiang, Jiang Menghua, et al. Four-rod resonator for krypton lamp pumped CW Nd : YAG laser with high power output [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2005, 17(11): 1644-1648. (in Chinese)
 [16] Li Yu, Zhang Kuohai, Li Qiang, et al. Research on fiber optic coupling for the high- power laser beam [J]. *Applied Laser*, 2004, 24(5): 276-278. (in Chinese)