

1.5 kW 近单模全光纤激光器

代守军^{1,2} 何 兵¹ 周 军¹ 赵 纯¹ 陈晓龙¹ 刘 驰¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 分析了双包层光纤内包层及纤芯偏移对光纤熔接的影响。根据分析结果, 针对主振荡功率放大全光纤化激光系统中关键熔接点, 提出了合理的光纤熔接方案。在种子光功率为 533 W, 抽运光功率为 1.16 kW 时, 全光纤化激光系统实现了 1509 W 放大激光功率输出, 放大器的斜率效率为 87.3%, 中心波长为 1080 nm, 光束质量因子 $M^2 = 1.46$ 。

关键词 激光器; 光纤激光; 全光纤; 高功率

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0702001

1.5 kW Near Single-Mode All-Fiber Laser

Dai Shoujun^{1,2} He Bing¹ Zhou Jun¹ Zhao Chun¹ Chen Xiaolong¹ Liu Chi¹

(¹Shanghai Key Laboratory of All solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The influence of the double-clad fiber inner-cladding and core axial deviation on fiber splicing is theoretically analyzed. Based on the analysis of the results, in the master oscillator power amplifier laser system, a reasonable method to splice the key points is proposed. The 1509 W amplified power in all-fiber laser system at 1080 nm is achieved with a 533 W seed laser and a 1.16 kW pump power. The slope efficiency of the amplifier is up to 87.3% with central wavelength of 1080 nm, and the beam quality of the output laser is $M^2 = 1.46$.

Key words lasers; fiber laser; all-fiber; high power

OCIS codes 140.3510; 140.3460; 140.3570; 140.4480

1 引 言

光纤激光器具有结构紧凑、转换效率高、光束质量好、易于散热和易于实现高功率等特点, 在很多领域具有广泛的应用。掺镱光纤激光器具有高效率、高掺杂浓度并有较宽的抽运吸收带, 在高功率激光领域得到了巨大发展^[1]。随着双包层光纤的出现以及半导体激光器抽运技术的不断成熟, 掺镱光纤激光器的输出功率不断得到提高^[2-5]。例如, 2009 年 6 月, 美国 IPG Photonics^[6] 成功研制出万瓦级单模光纤激光器, 到目前为止, 这仍是单模光纤激光器的最高水平。近些年来, 国内对光纤激光器研究也取得了较快

的发展, 但许多研究都是基于光学镜片通过空间耦合的方式实现对增益光纤的抽运和谐振腔的反馈, 使用这种技术的光纤激光器不能充分体现光纤激光器的诸多优势。利用全光纤器件取代光学镜片能够使光纤激光器更加紧凑稳定可靠, 随着光纤合束器、光纤光栅等关键器件的研究取得突破性进展, 高功率全光纤化的光纤激光器输出功率不断提高。最近越来越多的研究人员开展了基于全光纤技术的光纤激光器研究工作并取得了较好的进展。2009 年, 段开棕等^[7] 采用一级振荡、两级放大的方式实现了单纤 1000 W 的激光输出, 光-光转换效率为 62%。

收稿日期: 2013-01-11; **收到修改稿日期**: 2013-03-18

基金项目: 国家科技重大专项(2010ZX04013)、国家 863 计划(2011AA030201)、国家自然科学基金(60908011, 60907045)、上海市青年科技启明星计划(12QH1401100)

作者简介: 代守军(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: dd459074770@163.com

导师简介: 何 兵(1975-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事高功率光纤激光器等方面的研究。

E-mail: bryanho@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

2011年, Xiao等^[8]采用单谐振腔方式实现了1008 W的激光输出, 光-光转换效率为68%。同年, 闫平等^[9]采用一级振荡、两级放大的方式实现了1.6 kW的激光输出, 光-光转换效率为65%。2012年, Zhang等^[10]采用一级振荡、一级放大的方式实现了1.05 kW的激光输出, 光-光转换效率为77%。

为保证光纤激光器能实现千瓦级以上高功率输出, 光纤的熔接是至关重要的。熔接点损耗大会引起激光器效率的下降和光束质量的恶化, 甚至会造成光纤器件与抽运源的损坏。全光纤激光器中增益光纤与传能光纤的熔接点通常是温度较高的点, 这两段光纤熔接越好, 则热管理压力越低, 激光系统越稳定。

本文讨论了双包层光纤内包层及纤芯偏移对光纤熔接的影响, 根据讨论结果, 对于高功率全光纤激光系统中关键熔接点, 提出了合理的光纤熔接方案。采用此熔接方案, 实现单光纤1509 W放大激光功率输出, 放大器斜率效率为87.3%, 中心波长为1080 nm, 光束质量因子 $M^2 = 1.46$ 。系统运转稳定, 激光输出功率受限于可供利用的抽运光功率, 运行过程中未观察到非线性效应和热损伤现象。

2 光纤偏移与熔接损耗的分析

2.1 对抽运光的影响

对于双包层光纤内包层抽运光的熔接损耗, 可用几何光学的方法进行分析和讨论。光纤内包层通常可看成均匀折射率分布的多模光纤, 因此可假设光功率在截面上分布是均匀的, 光强的角分布和偏振也是均匀的。设光纤内包层半径为 a , 两包层轴偏离为 d , 可以认为该情况的熔接, 只有两包层重叠部分才有光通过, 其熔接点的耦合效率 η 为^[11]

$$\eta = \frac{16K^2}{(1+K)^4} \times \frac{1}{\pi} \left\{ 2 \arccos\left(\frac{d}{2a}\right) \frac{d}{a} \left[1 - \left(\frac{d}{2a}\right)^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (1)$$

式中 $K = n_1/n_0$, n_1 为内包层的折射率, n_0 为周围介质的折射率; $K = 1$ 时, 为光纤熔接之后的情况, $K = 1.4585$ 时, 为两光纤没有熔接端面处于空气的情况。以上假设两光纤内包层都是圆形结构。实际上为了增加纤芯对抽运光的吸收效率, 双包层光纤的内包层往往设计并制备成非圆结构。实验中使用的增益光纤是大模场直径双包层光纤(纤芯直径为 $20 \mu\text{m}$, 数值孔径 NA 为 0.06 , 内包层直径为 $400 \mu\text{m}$, $NA=0.46$), 内包层的形状是正八边形的。由于增益光纤与传能光纤的重叠区域复杂, 难以得到耦合

系数解析解形式, 可采用蒙特卡罗方法得到其数值精确解。令 $K=1, a=200 \mu\text{m}$, 利用(1)式可得到熔接点耦合系数 η 与两光纤内包层轴偏离量 d 的关系曲线如图1所示。其中曲线2, 3是采用蒙特卡罗法得到的, 曲线2的通光方向是由增益光纤到传能光纤, 曲线3的通光方向是由传能光纤到增益光纤。由图1可知, 可以利用(1)式近似模拟增益光纤与传能光纤内包层偏离量 d 与耦合系数 η 的关系。由图1中曲线2可知, 抽运光从增益光纤到传能光纤耦合效率较低。这是因为增益光纤形状非圆, 其面积大于圆光纤面积, 即使精确对准, 耦合效率也只有94.97%。由图1中曲线3可知, 抽运光从传能光纤到增益光纤耦合效率较高。这是因为圆光纤面积小于增益光纤面积, 如果精确对准, 耦合效率可以达到100%。由图1中的放大图可知, 要使增益光纤与传能光纤熔接点的耦合效率 $\eta > 0.92$, 则光纤内包层偏离量 d 应小于 $15 \mu\text{m}$ 。

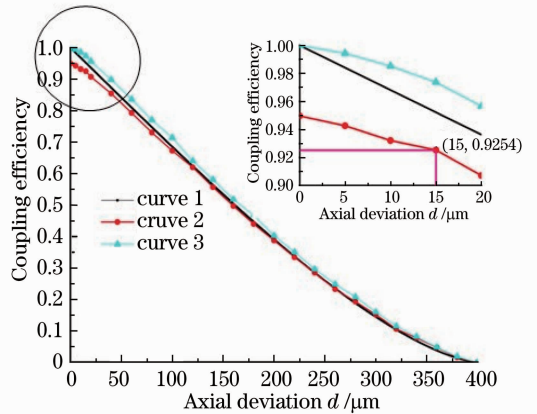


图1 耦合系数 η 与两光纤内包层偏离量 d 的关系
Fig. 1 Relationship between coupling coefficient η and inner cladding axial deviation d

2.2 对纤芯激光的影响

在双包层全光纤激光器中, 信号光在纤芯和包层的界面上发生全反射并被束缚在纤芯中; 抽运光在内包层和外包层的界面上发生全反射, 多次透过纤芯, 从而被纤芯吸收。但是在实际中, 由于光纤的熔接点的存在, 部分纤芯光会泄露到包层中从而形成包层光。包层光不仅会影响输出光的光束质量, 还会对合束器及其他光学器件造成损坏, 甚至破坏, 直接关系到高功率激光器能否安全、稳定地运行。因此有必要研究光纤偏移对纤芯激光的影响。

简便起见, 将光纤芯其端面光功率视为高斯分布。两光纤纤芯的离轴和轴倾斜引起的耦合损耗 α (单位: dB)为^[12]

$$\alpha = 4.34 \left[\left(\frac{d}{\omega_0} \right)^2 + \left(\frac{\pi n \omega_0 u}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中 u 为两光纤轴之间的夹角, ω_0 为光纤的模场半径, n 为纤芯的折射率, λ 为激光波长。当 $u=0$ 时, 则损耗完全是由两光纤纤芯不重合造成的。则此时两光纤纤芯的离轴引起的耦合损耗 α 为

$$\alpha = 4.34 \left(\frac{d}{\omega_0} \right)^2, \quad (3)$$

式中 ω_0 为^[13]

$$\omega_0 = \frac{D}{2} \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \right), \quad (4)$$

$$V = \pi NAD/\lambda, \quad (5)$$

式中 D 为光纤纤芯直径, V 为光纤归一化频率。使用大模场直径双包层光纤(纤芯直径为 $20 \mu\text{m}$, $NA=0.06$; 内包层直径为 $400 \mu\text{m}$, $NA=0.46$) 进行模拟, 可求出 $\omega_0=9 \mu\text{m}$ 。耦合损耗 α 与光纤纤芯轴偏移的关系曲线如图 2 所示。

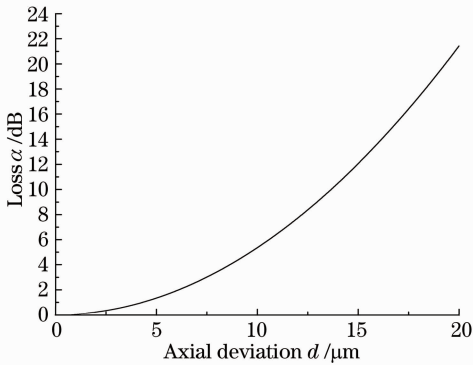


图 2 耦合损耗 α 与光纤纤芯轴偏移 d 的关系

Fig. 2 Relationship between coupling loss α and core axial deviation d

光纤制作时的误差会导致纤芯偏离光纤的中心, 而且光纤熔接时是一般基于包层对准技术而进行熔接的, 因为不能保证两种双包层的纤芯完全对准^[14]。两个相熔接的光纤, 假设一个光纤偏心量为 d_1 , 另一个光纤偏心量为 d_2 。由于光纤熔接时是基于包层对准技术理想熔接的, 则熔接之后总偏心量 d 满足

$$|d_1 - d_2| \leq d \leq d_1 + d_2. \quad (6)$$

图 3 所示为 d, d_1, d_2 的关系, 其中 θ 为两光纤偏离的夹角 ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$), O 为内包层的中心。根据图 3 并利用余弦公式可得

$$d^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2 \cos \theta. \quad (7)$$

利用 100 倍显微镜 (CMM-50, 金相显微镜) 测量了所使用光纤的偏心量, $20/400 \mu\text{m}$ 传能光纤偏心量 d_1 为 $0.607 \mu\text{m}$, $20/400 \mu\text{m}$ 增益光纤经测量

偏心量 d_2 为 $0.712 \mu\text{m}$ 。光纤熔接时假设基于包层对准技术理想熔接的, 根据 (3)~(7) 式可知纤芯光的损耗与两光纤偏离的夹角 θ 的变化曲线, 如图 4 所示。由图 4 可知随着角度增大, 损耗增大, 最大才到 0.09 dB 。

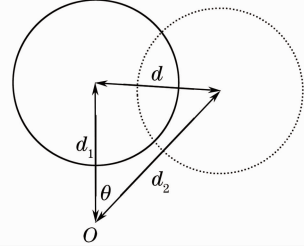


图 3 总偏心量与两个光纤偏心量的关系

Fig. 3 Relationship between total axial deviation and axial deviations of both fibers

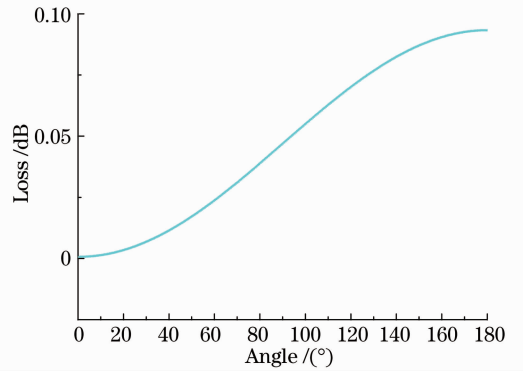


图 4 纤芯光的损耗与两光纤偏离夹角 θ 的变化

Fig. 4 Relationship between core light loss and the two fiber deviation angle θ

由图 4 可知, 如果光纤的偏心量很小, 则基于包层对准技术理想熔接是不会造成熔接点的损耗太大的。但在大功率抽运光注入的熔接点应该选择光纤包层优先对准, 同时尽量旋转两侧光纤使两光纤偏离的夹角 θ 最小。实验中在搭建种子光系统时, 抽运光注入的熔接点(高反光栅与增益光纤的熔接点)就选择了此种光纤熔接模式。而另外一个传能光纤与增益光纤的熔接点(低反光栅与增益光纤的熔接点), 由于其纤芯传播的激光占主要部分, 则采用纤芯优先的熔接模式进行光纤熔接。在激光系统搭建过程中不仅要尽量减少熔接点的数量, 还应该重视每一个熔接点的质量。因为千瓦量级的光纤激光系统中每个熔接点都是潜在的问题, 都有可能造成严重破坏后果。应该根据每个熔接点的传光特性来决定是包层优先考虑还是纤芯优先考虑。在光纤纤芯偏心较大时, 则需要综合考虑包层偏离与纤芯偏离对此熔接点及熔接点之后激光系统的影响。

3 1.5 kW 近单模全光纤化激光器的实验研究

3.1 实验装置

根据以上光纤熔接指导方案,采用一级振荡、一级放大的结构搭建实验装置,如图 5 所示。各器件间采用光纤熔接的方式连接,形成全光纤结构,且各熔接点都已利用低折射率涂覆树脂再涂覆。采用水冷方式使激光器系统中增益光纤、抽运源、关键熔接点及其他光纤器件在高功率状态下安全运转。种子源激光腔由一对光栅(FBG)、增益光纤(YDCF)以及一个 $(6+1) \times 1$ 合束器 1 组成。增益光纤长度为 20 m,纤芯直径为 $20 \mu\text{m}$, $NA=0.06$,内包层为八边形,直径为 $400 \mu\text{m}$,对 976 nm 抽运光的吸收系数为 1.26 dB/m。高功率全光纤系统需考虑光纤兼容问题,所以实验中光纤光栅都是在纤芯直径为 $20 \mu\text{m}$, $NA=0.06$,内包层直径为 $400 \mu\text{m}$, $NA=0.46$ 的传能光纤上刻制。而图 5 中的两个 $(6+1) \times 1$ 合束器信号输入光纤与信号输出光纤的参数与光纤光栅参数相同,合束器抽运臂参数为 $200/220 \mu\text{m}$ 。采用 6 个尾纤输出、中心波长为 976 nm

的激光二极管(LD)作为抽运源,抽运光先经过 $(6+1) \times 1$ 合束器进行合束,再经高反 FBG1 后进入增益介质 YDCF 吸收。FBG1 为激光高反光栅,对中心波长为 1079.85 nm 的 LP_{01} 基模激光的反射率 $R>99.8\%$,3 dB 带宽为 1.46 nm。 $(6+1) \times 1$ 合束器信号输入端作为监测端口,被制成 8° 倾角防止 4%的非涅耳反射和放大自发辐射(ASE)自生振荡。FBG2 为激光低反腔镜,并作为输出耦合腔镜,对中心波长为 1079.80 nm 的 LP_{01} 基模激光的反射率约为 10%,3 dB 带宽为 0.86 nm。激光放大器由一段长度为 14 m 的大模场直径增益光纤(LMA-YDCF)和一个 $(6+1) \times 1$ 合束器 2 组成,合束器的信号纤与种子源输出光纤相熔接。LMA-YDCF 纤芯直径为 $25 \mu\text{m}$,八边形内包层直径为 $400 \mu\text{m}$,对 976 nm 抽运光的吸收系数为 1.8 dB/m。放大器由 6 个尾纤输出中心波长在 976 nm 的 LD 抽运。增益光纤输出端熔接一段长度为 5 m 传能光纤便于激光系统输出,端面切 8° 避免反馈,传能光纤纤芯直径为 $25 \mu\text{m}$,内包层直径为 $400 \mu\text{m}$ 。

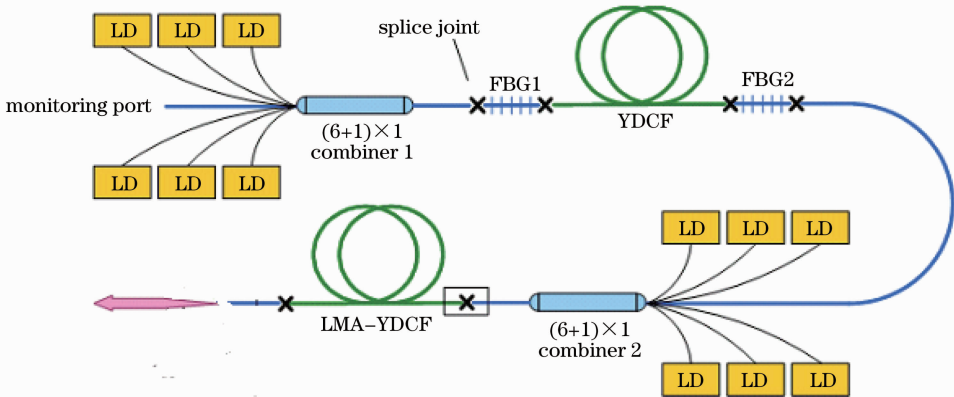


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

3.2 实验结果与讨论

图 6 所示为种子激光腔输出激光功率随抽运光功率之间的关系曲线。在抽运光为 987 W 时,种子光输出为 533 W,光-光转换效率为 53.9%,斜效率为 55.2%。由图 6 可知,种子光功率与抽运光功率呈良好的线性关系,并未出现饱和现象,这表明继续增大抽运光功率,可实现更高功率的激光输出。

图 7 所示为放大器输出激光功率与抽运光功率之间的关系曲线。当种子光功率为 533 W、抽运光功率为 1.16 kW 时,输出激光功率为 1509 W,放大器斜率效率为 87.3%。整个激光系统光光转换效

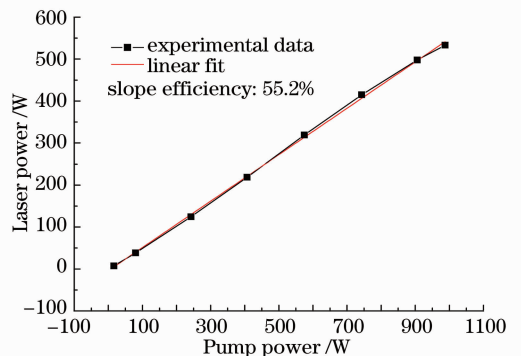


图 6 种子输出激光功率随抽运光功率的变化

Fig. 6 Laser output power of seed versus pump power

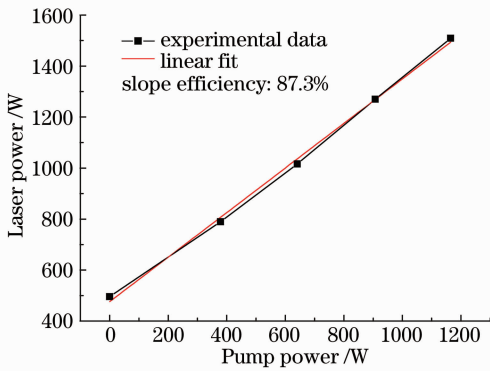


图 7 放大级输出激光功率随抽运光功率的变化
Fig. 7 Laser output power versus pump power

率为 70.2%。抽运光功率与输出功率具有较好的线性关系,进一步增大抽运功率能够实现更高功率的激光输出。实验实现了千瓦级抽运功率注入,解决了掺镱增益光纤切割、熔接点涂覆和冷却问题,为千瓦级高功率光纤激光器实用化打下基础。

输出激光光谱如图 8 所示,种子激光功率为 113 W 时激光中心波长为 1080.1 nm, 3 dB 带宽约为 1.10 nm, 主振荡功率放大器 (MOPA) 输出激光功率为 1509 W 时激光中心波长为 1080.2 nm, 3 dB 带宽约为 1.9 nm, 放大光谱基本没变化, 未见异常。整个过程中, 激光功率未出现饱和, 未见光纤有激光烧蚀或损伤现象。光纤输出端光纤纤芯功率密度达到 300 MW/cm² 量级。通过对光纤损伤机制的深入研究和多项工艺改进, 有效地解决了大功率条件下光纤端面损伤问题。利用激光光束分析仪 (PRIMES Laser Quality Monitor) 测试激光光束质量, 图 9 所示为激光光斑形状以及 M² 因子的测试结果, M² = 1.46。由图 9 可知, 激光远场光斑形状和光束质量都较好。

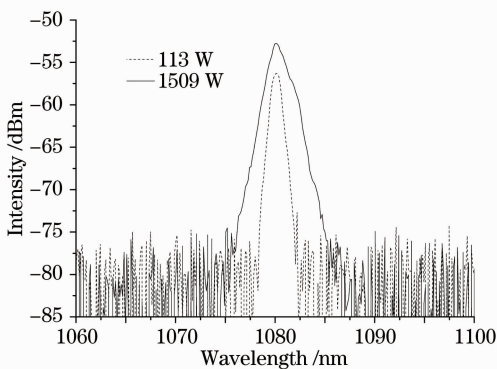


图 8 输出激光光谱图
Fig. 8 Spectra of output laser

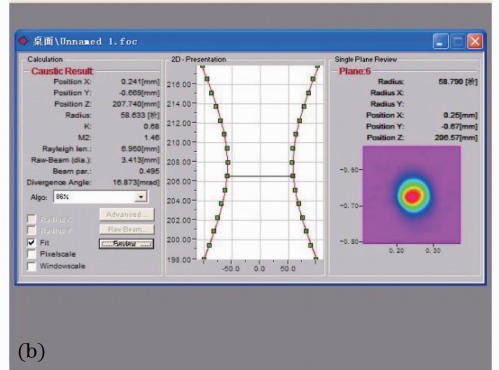
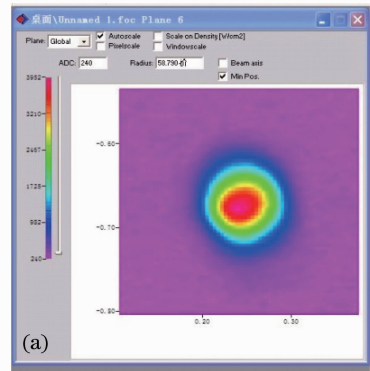


图 9 (a) 激光远场光斑形状和 (b) 光束质量测试结果
Fig. 9 (a) Spatial form of far-field laser and (b) beam quality measurement

4 结 论

讨论了双包层光纤内包层及纤芯偏移量对光纤熔接点的影响。对于千瓦级光纤激光系统的熔接点提出了光纤熔接方案, 即根据每个熔接点的传光特性确定包层优先还是纤芯优先, 以减少熔接点损耗。根据此光纤熔接方案, 基于主振荡功率放大器结构, 搭建出 1080 nm, 1509 W 输出的全光纤激光器, 放大器的斜率效率为 87.3%。光束质量因子 M² = 1.46。并且继续增大抽运光功率, 可实现更高功率的激光输出。

参 考 文 献

- 1 D J Richardson, D J Richardson, W A Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.
- 2 Y Jeong, J K Sahu, D N Payne, et al.. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW continuous-wave output power [C]. OSA Technical Digest, Advanced Solid-State Photonics, February 1, 2004, Santa Fe, No. 26 Mexico: PDP13.
- 3 Y Jeong, J K Sahu, D N Payne, et al.. Ytterbium-doped large-core fiber laser with a 1.36 kW continuous-wave output power [J]. Opt Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- 4 G Bonati, H Voelckel, T Gabler, et al.. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser [C]. Late Breaking Developments San Jose: Photonics West, 2005: 5709-2a.
- 5 Lou Qihong, He Bin, Xue Yuhao, et al.. 1.75 kW Yb-doped

- double cladding fiber laser made in China[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1277.
- 楼祺洪, 何 兵, 薛宇豪, 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1277.
- 6 IPG Photonics, IPG Photonics Successfully Tests World's First 10 Kilowatt Signal-mode Production Laser. < <http://www.ipgphotonics.com/newsproduct.htm> >.
- 7 Duan Kailiang, Zhao Baoyin, Zhao Wei, *et al.*. 1000 W all fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3219.
- 段开棕, 赵保银, 赵 卫, 等. 1000 W 全光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3219
- 8 Hu Xiao, Yanxing Ma, Pu Zhou, *et al.*. Experimental study on kilowatt fiber laser in an all-fiber configuration[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(2): 021404.
- 9 Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Chen, *et al.*. 1.6 kW Yb-doped all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416001.
- 闫 平, 肖起榕, 付 晨, 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416001.
- 10 L M. Zhang, S H Zhou, H Zhao, *et al.*. Experimental research on kW single mode MOPA fiber laser[C]. Optoelectronics and Microelectronics (ICOM), 2012, 192-194.
- 11 H Tsuchiya, H Nakagome, N Shimizu, *et al.*. Double eccentric connectors for optical fibers [J]. Appl Opt, 1977, 16(5): 1323-1331.
- 12 Liao Yanbiao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 101-105.
- 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 101-105.
- 13 B Morasse, S Chatigny, C Desrosiers, *et al.*. Simple design for singlemode high power CW fiber laser using multimode high NA fiber[C]. SPIE, 2009, 7195: 7195005.
- 14 S P Yin, P Yan, M L Gong. End-pumped 300 W continuous-wave ytterbium-doped all fiber laser with master oscillator multistage power amplifiers configuration[J]. Opt Express, 2008, 16(22): 17864-17869.

栏目编辑: 张 腾