

小半径弯曲条件下传能光纤传输效率研究

尧舜 庞晓林 代京京 刘学胜 曹银花 王智勇

(北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

摘要 利用光线理论分析弯曲光纤模型中的包层光线传输特性, 结合半导体激光模块传能尾纤弯曲实验表明, 由于光纤弯曲有效数值孔径减小而进入包层的光线并未完全被耗散, 当光纤弯曲部分长度较短时, 部分未耗散掉的包层光在进入直光纤部分后仍可重新回到纤芯中进而长距离传输作为有用光输出。该结论表明弯曲光纤的传输效率由弯曲半径和弯曲光纤长度共同决定, 即在光纤弯曲半径远小于传统理论临界半径的情况下, 合理控制传能光纤弯曲部分的长度, 仍可获得较高的传输效率。

关键词 光纤光学; 光纤激光器; 半导体激光器; 光纤管理; 弯曲光纤

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0106001

Transmission Efficiency of Bending Fiber with Small Radius

Yao Shun Pang Xiaolin Dai Jingjing Liu Xuesheng Cao Yinhua Wang Zhiyong

(Institute of Laser Technology, National Center of Laser Technology, Beijing University of Technology,
Beijing 100124, China)

Abstract Based on the analysis of propagation ray theory in cladding layer of multimode power delivery optical fiber and the high-power diode laser pigtail fiber bending experiment, part of the light transports into the cladding layer because fiber bending is found transporting back to the fiber core, especially when the length of the bending fiber is short. It means that transmission efficiency of bending fiber is determined by bending radius and bending length. A high transmission efficiency of power in fiber at small bending radius can be obtained when the length of bending is well chosen.

Key words fiber optics; fiber laser; semiconductor laser; fiber management; bending fiber

OCIS codes 060.3510; 140.2020; 250.5960

1 引言

光纤激光器以其卓越的光束质量、超大的光功率密度、高转换效率和结构紧凑等显著特点, 目前已逐步替代固体和气体激光器广泛应用于军事、工业、医疗和空间通信等领域^[1~4]。在光纤激光器众多组成部分中, 半导体激光抽运源是其核心部件之一, 尤其是当前实用化光纤激光器几乎无一例外地采用全光纤结构, 促使光纤耦合输出半导体激光器成为光纤激光器的标准组件, 其性能直接决定了光纤激光器的激光输出特性和稳定性^[5~7], 是推动光纤激光器发展的关键。随着近年来大功率半导体激光器水平的提高^[8], 目前以 100 μm 发光条宽的单元器件

(single emitter)直接光纤耦合($NA=0.15$, 光纤长度 100 μm)的商用器件连续输出功率已超过 20 W^[9], 结合其长寿命优点, 目前已被广泛采用为全光纤结构光纤激光器的抽运源^[10~12]。

在光纤激光器小体积、高功率发展思路的推动下, 光纤耦合输出半导体激光抽运源的集成规模和集成密度不断提高, 在此过程中不可避免的会涉及到大量的半导体激光器传能尾纤弯曲、缠绕以减小系统体积的光纤管理问题, 而传能尾纤弯曲造成的能量损失则关系到激光系统的整体效率, 在高功率系统中尤为重要。现有弯曲光纤中的光传输损耗研究多以 Marcuse 的模式理论^[13]为基础, 给出了光纤

收稿日期: 2010-03-18; 收到修改稿日期: 2010-06-03

作者简介: 尧舜(1979—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事高功率半导体激光系统方面的研究。

E-mail: yaoshun@bjut.edu.cn

中各阶模式的损耗公式,但在传能光纤内部模式众多的情况下难以量化指导实际工作。本文利用光线理论结合半导体激光模块传能尾纤弯曲实验对弯曲传能光纤的传输特性进行分析,为提高小半径弯曲条件下传能光纤传输效率,优化复杂抽运系统中光纤管理、减小抽运系统体积提供了理论与实验基础。

2 弯曲光纤中的光线理论分析

现有光线理论关注信号长距离传输特性,通常只分析限制在纤芯中传输的光线,而进入包层中的光均认为被耗散掉^[14,15]。如图1所示纤芯直径为 a 的直光纤弯曲成半径为 R 的圆弧,子午光线1以 ϕ 角从圆弧光纤左端面纤芯中点 A 点入射,经 θ_1 角折射后以 θ_2 角入射到纤芯与包层界面的 B 点产生全反射,经 C, D 各点全反射最终从光纤后端面出射,其中 n_0, n_1, n_2 分别为空气折射率、纤芯折射率以及包层折射率。特别的,若光线1是 B 点全反射的临界光线,当光线1传输到 C 点时入射角 θ_3 大于 θ_2 时发生全反射, θ_4 与 θ_3 相等同为临界角,则弯曲光纤的数值孔径为

$$NA' = n_0 \sin \phi = n_1 \sin \theta_1, \quad (1)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

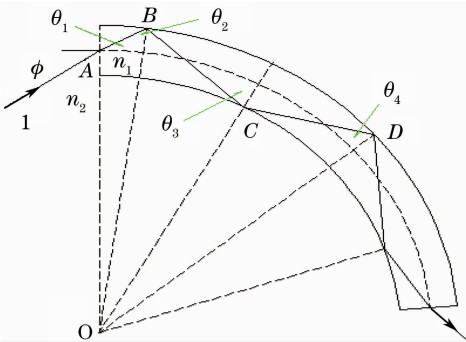


图1 弯曲光纤纤芯中的子午光线

Fig. 1 Meridional-ray propagation in bending fiber core

在 $\triangle ABO$ 中,利用正弦定理,有

$$\sin(90 + \theta_1)/d_{OB} = \sin \theta_2/d_{AO}, \quad (3)$$

则

$$\cos \theta_1 = \frac{\sin \theta_2 \cdot (R + a/2)}{R}. \quad (4)$$

将(2),(4)式代入(1)式,利用 $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ 得到

$$NA' = [NA^2 - n_2^2(2 + a/2R)a/2R]^{1/2}. \quad (5)$$

(5)式表明光纤弯曲后的有效数值孔径由光纤原有数值孔径、纤芯大小以及弯曲的曲率半径共同

决定。根据数值孔径原始定义,不同数值孔径之比表征光学元件通光孔径之比。假设空间中传输光线密度相同,则数值孔径平方之比为不同通光能量之比。图2为不同 NA 的 $100 \mu\text{m}$ 芯径光纤在不同绕纤直径条件下 NA' 与 NA 的比值平方用以表征弯曲光纤的通光效率。由图2可以看出,随着光纤弯曲直径的增大,通光效率迅速增大并趋于饱和并接近直光纤性能。同样的弯曲直径条件下 NA 较大的光纤通光效率明显高于 NA 较小的光纤。对于 $NA=0.15$ 的光纤,当弯曲直径为 100 mm 时,已有 10% 左右的光因为光纤弯曲而逸出,传输效率为 90% ;而当其弯曲直径进一步减小为 30 mm 时,传输效率下降为 70% 左右。

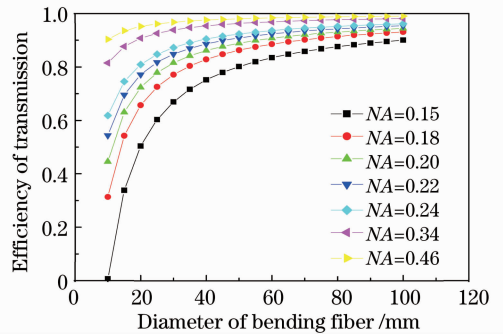


图2 绕纤直径对光纤传输效率的影响

Fig. 2 Relation between transmission efficiency and diameter of bending fiber

3 实验测试及分析

实验中采用进口商用光纤耦合输出半导体激光器进行传能尾纤弯曲实验,测试器件尾纤为 Nufern 公司 $NA=0.15, 105/125 \mu\text{m}$ 的多模光纤,长度为 3 m 。实验中,光纤盘绕在不同直径的圆筒表面,光纤各处保持自然松弛状态。图3为实验装置示意图,图4为实验测试获得传能尾纤沿不同绕纤直径缠绕一圈情况下器件功率-电流($P-I$)曲线。

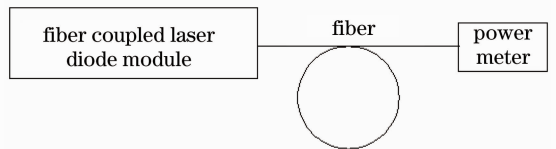


图3 绕纤实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of measurement

由图4可以看出,当测试器件尾纤弯曲直径由无穷大(直光纤)逐渐减小到 44 mm 时,半导体激光模块在不同电流条件下出纤功率无明显变化,而当弯曲直径进一步减小时,器件 $P-I$ 曲线斜率明显下

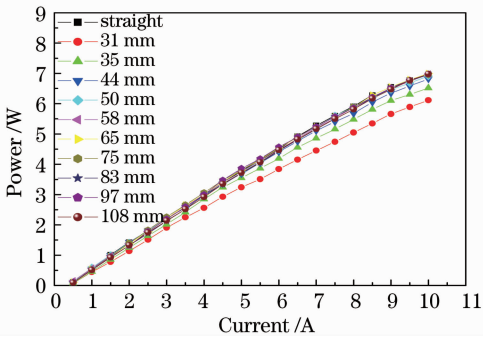


图 4 不同绕纤直径条件下的出纤功率曲线
Fig. 4 Output power at different diameters of fiber bending

降, 总体表现为: 低电流时差别较小, 随着电流增加, 变化增大。这主要是由于低电流下半导体激光器输出发散角较小, 耦合进入光纤后模式特性较好, 弯曲光纤损失较少; 而随着电流增加, 光纤内部高阶模比例提高, 光纤弯曲损耗增加。

图 5 为实验测试获得电流为 10 A 时不同绕纤直径条件下的功率传输效率及其与图 2 计算结果比较。该图清楚表明, 当绕纤直径小于 44 mm 后半导体激光模块出纤功率呈突然快速下降趋势。而对比图 2 计算结果表明, 实验获得尾纤传输效率远高于相同数值孔径($NA=0.15$)弯曲光纤传输效率计算值。该结果表明, 实际工作中利用有效数值孔径方法分析此类问题与实际情况相去甚远, 以此为标准获得弯曲极限指导实际工作将大大降低弯曲光纤对空间的利用率。

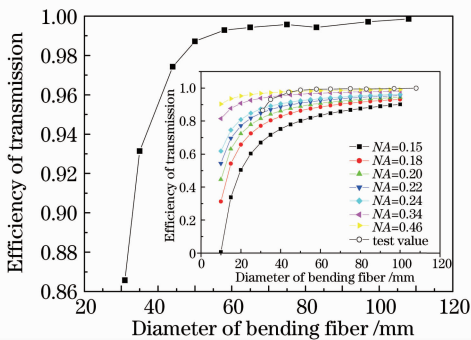


图 5 不同绕纤直径条件下的功率传输效率及其与图 2 比较

Fig. 5 Transmission efficiency at 10 A with different diameter of fiber bending and comparison with fig. 2

为了进一步认识理论计算值与绕纤实验测试值之间差异, 对图 1 模型进行了扩展。图 6 为考虑了光纤包层以及涂敷层情况下的子午光线传输模型, 根据规则圆弧弯曲段内反、折射光线的角度对称性, 当光线由纤芯经包层进入涂敷层后, 不管涂敷层与

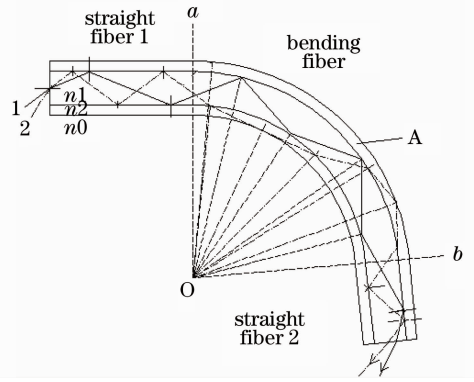


图 6 弯曲光纤中的子午光线

Fig. 6 Meridian-ray propagation in bending optic fiber
包层折射率数值大小关系如何, 在涂敷层与空气界面只要满足全反射条件, 则光线必定能经包层回到纤芯。为了作图分析清楚简洁, 模型中将光纤包层与涂敷层等效为一层材料 A 包裹在纤芯周围, 其等效折射率为 n_2 , n_0 为空气折射率。由于光纤涂敷层折射率低于包层折射率, 且涂敷层对光具有一定吸收率, 因此该模型中材料 A 具有一定吸收率 α 。如图 6 所示, 该弯曲光纤模型中主要有两类光线:

1) 光线 1 为整个传输过程中完全限制在纤芯中传输的光线, 其传输特性同图 1 中光线 1;

2) 光线 2 在直光纤部分 1 中完全限制在纤芯中, 当通过 a 面进入弯曲部分时由于弯曲光纤 NA' 减小, 不再满足全反射条件而进入 A 层内, 但该类光线在层 A 与空气界面处入射角并不大, 能够发生全反射, 因此被限制在层 A 中传输。由于材料 A 具有吸收率 α , 因此具有一定传输损耗但能传输较长距离。当光线 2 通过界面 b 而进入到直光纤部分 2 时, 光纤 NA 变大, 进而重新限制在纤芯中继续传输, 最终通过光纤后端面输出为功率计接收。

图 6 模型与传统图 1 模型最大的区别在于将原有模型中包层的无穷大吸收率替换为 α , 在传能光纤短距离传输光能的情况下, 弯曲光纤长度较短, 在光纤弯曲过程中进入包层的一部分光有可能重新返回纤芯继续传输。通过对图 6 模型中两类光线的分析结合绕纤实验数据可以推断, 当尾纤无明显弯曲时, 1, 2 类光线可以无损通过(忽略光纤自身损耗), 大部分能够出纤进入功率计; 而当光纤弯曲后 2 类光线部分能量被吸收, 绕纤曲率直径越小, 2 类光线越多, 被层 A 吸收能量越大, 出纤能量越低。

图 7 为固定半导体激光模块尾纤弯曲直径 31 mm 时, 通过改变缠绕圈数获得不同光纤弯曲长度条件下 $P-I$ 曲线变化图及电流为 10 A 时同条件

下光纤传输效率变化曲线。由该图可以看出在半导体激光模块尾纤弯曲曲率固定情况下,随着光纤弯曲长度增加,光纤的传输效率由 1 快速下降,但随着弯曲光纤长度的进一步增加,这种下降趋势逐渐减缓且有向 70%左右收敛的趋势。

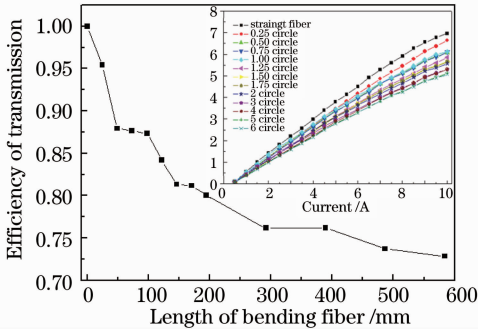


图 7 不同弯曲光纤长度条件下的 $P-I$ 曲线及功率传输效率

Fig. 7 $P-I$ profile and transmission efficiency at different length of bending fiber

综合图 2 中 $NA=0.15$ 光纤计算结果、图 6 模型分析和图 7 中实验数据,当光纤以 31 mm 为直径做多圈缠绕过程中,光纤中传输的 2 类光线逐渐耗散,半导体激光模块尾纤传输效率逐渐下降;当弯曲光纤足够长时,2 类光线消失殆尽,其值约为总能量的 30%左右,这基本与图 2 计算结果吻合;而当弯曲光纤长度较短时,虽然光纤弯曲直径很小却仍可获得非常高的传输效率。

4 结 论

通过对弯曲光纤模型中的光线传输特性分析,结合半导体激光传能尾纤弯曲实验发现,光线在弯曲光纤内部传输过程中,由于有效数值孔径的减小,部分光线进入包层而逐渐被耗散,而当弯曲光纤长度较短时,尚未耗散掉的包层光在进入直光纤部分后仍可回到纤芯内部长距离传输作为有用光输出。该结果表明弯曲光纤的传输效率由弯曲半径和弯曲光纤长度共同决定,即在光纤弯曲半径小于传统理论临界半径的情况下,合理控制弯曲光纤的长度,仍可获得较高的传输效率。该结论为提高弯曲光纤传输效率,改善复杂抽运系统的光纤管理提供了新的思路及理论和实验依据。

参 考 文 献

- V. Gapontsev, W. Krupke. Fiber lasers grow in power [J]. *Laser Focus World*, 2002, **38**(8): 83~89
- V. P. Gapontsev, N. S. Platonov, O. Shkurihin *et al.*. 400 W low-noise single-mode cw ytterbium fiber laser with an integrated fiber delivery[C]. CLEO, 2003, CThPDB9
- A. Galvanauskas. High power fiber lasers[J]. *Opt. Photon. News*, 2004, **15**(7): 42~47
- Xue Yuhao, Zhou Jun, Lei Siyuan *et al.*. The research development of fiber-based high average power ultrashort pulse amplification [J]. *Laser Optoelectron. Progress*, 2008, **45**(11): 28~34
- 薛宇豪, 周 军, 雷思远等. 高平均功率超短脉冲激光光纤放大研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(11): 28~34
- M. Faucher, B. Sevigny, R. Perreault *et al.*. All-fiber 32×1 pump combiner with high isolation for high power fiber laser[C]. CLEO, 2008, CMA5
- Yan Ping, Yin Shupeng, Gong Mali. 175-W continuous-wave master oscillator power amplifier structure ytterbium-doped all-fiber laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 580~582
- Wang Yuanxiang, Jiang Peipei, Yang Dingzhong *et al.*. All-fiberized master oscillator power amplifier structured pulsed Yb fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1861~1865
- 汪园香, 姜培培, 杨丁中等. 全光纤结构主振荡功率放大掺镱脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1861~1865
- Xin Guofeng, Qu Ronghui, Fang Zujie *et al.*. New development of high power semiconductor laser [J]. *Laser Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(2): 3~8
- 辛国锋, 瞿荣辉, 方祖捷等. 大功率半导体激光器的最新进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(2): 3~8
- V. Gapontsev, N. Moshegov, P. Trubenko. A high-brightness fiber coupled pumps[C]. *SPIE*, 2009, **7198**: 719801
- V. Gapontsev, I. Berishev, V. Chuyanov *et al.*. $8 \times 10 \times 10$ nm highly efficient single emitter pumps[C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 687601
- P. Yalamanchili, V. Rossin, J. Skidmore *et al.*. High-power, high-efficiency fiber-coupled multimode laser-diode pump module (9×10 nm) with high-reliability[C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 687612
- Feng Yutong, Du Songtao, Yang Yan *et al.*. All-fiber laser based on LD pulse-modulated MOPA architecture [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1932~1936
- 冯宇彤, 杜松涛, 杨 燕等. 基于 LD 脉冲调制的全光纤 MOPA 结构激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1932~1936
- D. Marcuse. Curvature loss formula for optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 216~220
- He Guangyu, Jiang Jiuxing, Liu Peng. Theory of losses in bending of multi-mode fibers [J]. *J. Harbin Univ. Sci. Technol.*, 1997, **2**(5): 91~96
- 贺光裕, 姜久兴, 刘 鹏. 多模光纤弯曲损耗的理论分析[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 1997, **2**(5): 91~96
- Liu Yexin, Yang Xiaoyun, Chen Xueqin *et al.*. Analysis of multimode fiber bending loss [J]. *Acta Scientiarum Naturalium University Sunyatseni*, 2002, **141**(15): 25~27
- 刘叶新, 杨晓云, 陈学琴等. 多模光纤弯曲损耗的分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2002, **141**(15): 25~27