

文章编号: 0258-7025(2010)07-1730-04

绕纤法分析光纤耦合输出半导体激光器的光束质量

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 为掌握光纤耦合输出半导体激光模块尾纤内的光场特性, 进而提高光纤激光器的抽运效率, 利用光线理论分析了弯曲光纤中的光线传输特性。结合不同光纤耦合输出半导体激光器的绕纤实验发现, 相同标称输出功率的光纤耦合输出半导体激光器尾纤内部光功率模式分布差异较大, 通过相同弯曲半径绕纤后功率差达总功率 15% 以上。针对该问题提出了利用绕纤方式甄别光纤耦合输出半导体激光器光束质量的简便方法, 以提高光纤激光器抽运效率及稳定性, 同时也为光纤耦合输出半导体激光器耦合效果的测量提供了新的思路。

关键词 激光器; 光纤激光器; 半导体激光器; 光纤耦合; 绕纤

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1730

Analysis of Fiber Coupled Laser Diode's Beam Quality with Bending Fiber Approach

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

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

Abstract In order to get the characteristics of optical field in the pigtail fiber of fiber coupled laser diode and increase the pump efficiency of fiber laser, propagation ray calculation and experiments of transmission efficiency in bending pigtail fiber are presented. In bending fiber experiments, it is found that more than 15% of output power differences are given by fiber coupled laser diode with the same nominal output power and pigtail fiber. It means optic modes need to be chosen so as to maintain the pumping efficiency and stability in pumping application. Based on the analysis of propagation ray theory, a new approach to judge the beam quality of fiber coupled laser diode by bending fiber is presented. It also can be used in detecting the fiber coupled efficiency of laser diode.

Key words lasers; fiber laser; semiconductor laser; fiber coupled; bending fiber

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、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、空间通信等领域^[1~4]。而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], 以 100 μm 发光条宽的单元器件直接光纤耦合(数值孔径 NA 为 0.15, 100 μm 光纤)的商用器件连续输出功率已超过 20 W^[9], 结合其寿命长的优点, 目前已被广泛用于全光纤结构光纤激光器的抽运源^[10~12]。

然而实际使用中发现该类商用器件在相同出纤功率的情况下, 不同器件多模光纤内部光能模式分布差异很大, 这直接影响到通过合束器进入双包层光纤后的抽运效率以及整个激光系统的构建。同时, 这种差异是由半导体激光单元器件自身品质区别以及耦合技术水平决定的, 难以直接获得, 目前国

收稿日期: 2009-09-25; 收到修改稿日期: 2009-12-08

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

内外鲜见文献报道该方面的研究。鉴于此,本文利用弯曲光纤中的光线理论,给出一种较为简便的无损甄别方法,用以判断光纤耦合半导体激光器质量的优劣。

2 弯曲光纤中的光线理论分析

现有光线理论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^[13,14]。图 1 为纤芯直径为 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 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右端面出射,其中 n_0, n_1, n_2 分别为空气、纤芯以及包层的折射率。特别地,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 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

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

$$\sin \theta_2 = n_2 / n_1. \quad (2)$$

在 $\triangle ABO$ 中,利用正弦定理有 $\sin(90^\circ + \theta_1)/OB = \sin \theta_2/AO$, 则

$$\cos \theta_1 = \frac{(R + a/2) \sin \theta_2}{R}, \quad (3)$$

将(2)式和(3)式代入(1)式,利用 $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{0.5}$ 得到

$$NA' = \{d_{NA}^2 - n_2^2 [2 + a/(2R)] a/(2R)\}^{0.5}, \quad (4)$$

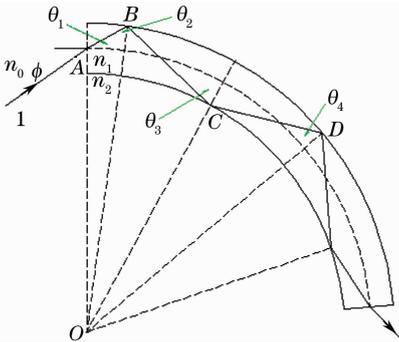


图 1 弯曲光纤纤芯中的子午光线

Fig. 1 Meridional light propagation in bending fiber core

(4)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则为不同通光能量之比。图 2 为不同数值孔径的 $100 \mu\text{m}$ 芯径光纤在不同曲

率半径弯曲条件下的 NA' (用 NA' 与 NA 的比值平方来表征)比值平方用以表征弯曲光纤的通光效率。由图 2 可以看出,随着光纤弯曲部分曲率半径的增大,通光效率迅速增大并趋于饱和接近直光纤性能,同样的曲率半径条件下 NA 较大的光纤通光效率明显高于 NA 较小的光纤。

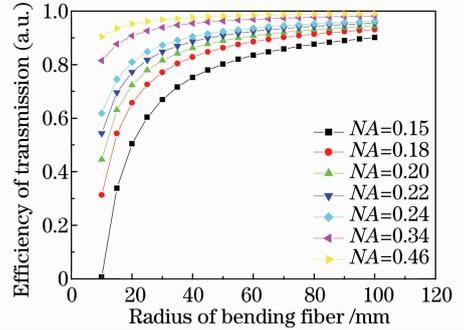


图 2 曲率半径对光纤传输效率的影响

Fig. 2 Relationship between efficiency of transmission and radius of bending fiber

3 实验测试及分析

实验中采用不同进口品牌商用光纤耦合输出半导体激光器进行尾纤盘绕条件下的功率测试,测试器件标称参数均为 $NA=0.15, 105/125 \mu\text{m}$ 多模光纤连续输出 8 W ,尾纤长度 1 m 。为了避免不同品牌器件所用尾纤材质不同而造成的差异,实验前在各器件尾纤端面熔接了相同长度的 Nufern 公司 $NA=0.15, 105/125 \mu\text{m}$ 多模光纤,绕纤实验均在附加光纤上进行,光纤各处保持自然松弛状态。图 3 为实验装置示意图,图 4 为实验测试获得器件 a 不同曲率半径绕纤情况下的出纤功率曲线及传输效率图,图 5 为实验测试获得器件 b 不同曲率半径绕纤情况下的出纤功率曲线。

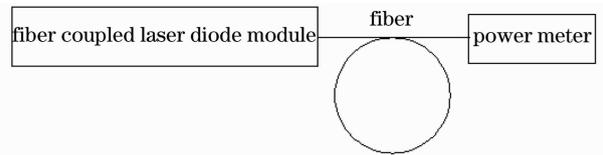


图 3 绕纤实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of measurement

由图 4 发现,器件 a 的出纤功率随绕纤半径的减小而明显下降,其变化趋势与理论计算获得的曲线基本一致,但绝对值比理论计算值大 10% 以上,当绕纤半径较小时差值更大。图 5 表明,尽管器件 b 在直光纤状态下出纤功率略低于器件 a,但随着绕纤曲率半径逐渐减小,其出纤功率与直光纤状态相

比无明显变化,当绕纤半径为 35 mm 时其传输效率仍高于 96%。对比图 1,4,5 标称参数相同的器件 a,b 在实验中性能差异超过 15%,同时与理论计算结果相比也有较大出入,这说明该类器件使用前应加以测试甄别,否则相同的实验可能会获得不同的结果,同时用前节理论模型分析该类问题会有较大缺陷。

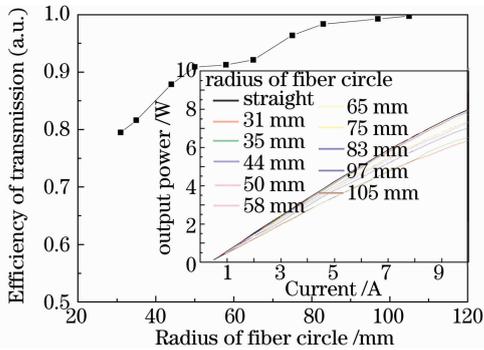


图 4 器件 a 不同曲率半径绕纤情况下的出纤功率曲线及传输效率图

Fig. 4 Output power and transmission efficiency of device a at different radii of fiber bending

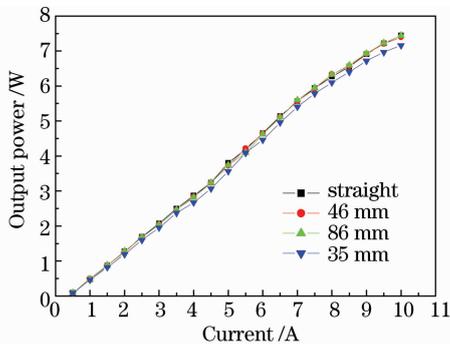


图 5 器件 b 不同曲率半径绕纤情况下的出纤功率曲线

Fig. 5 Output power of device b at different radii of fiber bending

为了更加清楚地认识不同光纤耦合输出半导体激光器在绕纤实验中表现出的性能差异,在图 1 模型的基础上进行了扩展,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。由于此处仅作定性分析,为简单起见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_A , n_0 为空气折射率。如图 6 所示,该弯曲光纤模型中主要有三类光线:

光线 1 为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。

光线 2 在直光纤部分 1 中完全限制在纤芯中,当通过 I 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,该类光线在层 A 中传输损耗相对较小能够传输较长距离,当光线 2 通过界面 II 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。

光线 3 与光线 2 相比为更高阶模,其产生是由于半导体激光芯片模式不佳以及光纤耦合技术的缺陷,在激光耦合进入光纤后即被限制在层 A 中传输,如果没有绕纤可以传输较长距离,当其通过界面 I 进入弯曲部分后,由于入射角较大很快逸出光纤,不能通过光纤后端面最终输出。

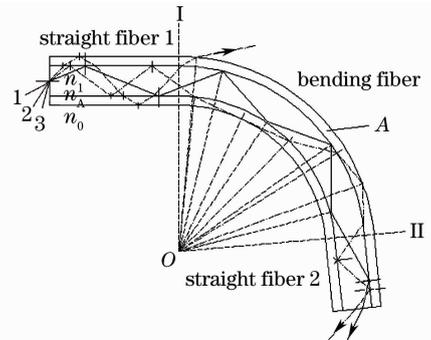


图 6 弯曲光纤中的子午光线

Fig. 6 Meridional light propagation in bending fiber

通过对以上三类光线的分析结合器件 a,b 绕纤实验数据可以推断,器件 a 尾纤中包含 1,2,3 类光线,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),3 类光线损耗较低,大部分能够出纤进入功率计;而当光纤弯曲后 3 类光线所带全部能量以及 2 类光线部分能量被耗散,导致绕纤曲率半径较大时出纤能量明显下降。器件 b 尾纤中能量主要由 1,2 类光线构成,通过绕纤后出纤能量变化不明显。图 1 与图 4,5 中传输效率相差 10% 左右,基本为 2 类光纤所携带的能量。

在作为光纤激光器抽运源应用中,1,2 类光线均能够进入双包层光纤为可用光,3 类光线由于 NA 较大在通过合束器时被耗散掉,如果此类光线能量较高,不仅降低光纤激光器抽运功率,同时加大了合束器热负载,因此为获得高性能光纤激光器,应选择 3 类光线较少的光纤耦合输出半导体激光器,即本实验中器件 b 性能优于器件 a。

4 结 论

通过对弯曲光纤模型中的光线传输特性分析,结合不同光纤耦合输出半导体激光器的绕纤实验中展示出的性能差异表明,相同出纤功率的光纤耦合

输出半导体激光器输出光模式分布差异超过 15%。在此基础上,提出了利用绕纤方式甄别光纤耦合输出半导体激光器光束质量的简便方法,以提高光纤激光器抽运效率及稳定性,同时也为光纤耦合输出半导体激光器耦合效果的测量提供了新的思路。

参 考 文 献

- 1 V. Gapontsev, W. Krupke. Fiber lasers grow in power [J]. *Laser Focus World*, 2002, **8**: 83-89
- 2 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 [P]. CLEO 2003, Baltimore, USA, paper CThPDB9
- 3 A. Galvanauskas, High power fiber lasers [J]. *Opt. Photon. News*, 2004, **15**(7): 42~47
- 4 Xue Yuhao, Zhou Jun, Lei Siyuan *et al.*. The research development of fiber-based high average power ultrashort pulse amplification [J]. *Laser & Optoelectronics 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
- 5 M. Faucher, B. Sevigny, R. Perreault *et al.*. All-fiber 32×1 pump combiner with high isolation for high power fiber laser [P]. OSA / CLEO/QELS 2008, CMA5
- 6 Ping Yan, Shupeng Yin, Mali Gong. 175-W continuous-wave master oscillator power amplifier structure ytterbium-doped all-fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 580~582
- 7 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大型掺镱脉冲光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1861~1865
- 8 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
- 9 V. Gapontsev, N. Moshegov, P. Trubenko, A. High-brightness fiber coupled pumps [C]. *SPIE*, 2009, **7198**: 7198O1
- 10 V. Gapontsev, I. Berishev, V. Chuyanov *et al.*. 8××~10×× nm highly efficient single emitter pumps [C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 687601
- 11 P. Yalamanchili, V. Rossin, J. Skidmore *et al.*. High-power, high-efficiency fiber-coupled multimode laser-diode pump module (9×× nm) with high-reliability [C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 687612-1
- 12 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
- 13 He Guangyu, Jiang Jiuxing, Liu Peng. Theory of losses in bending of multi-mode fibers [J]. *Journal of Harbin University of Science & Technology*, 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
- 14 Liu Yexin, Yang Xiaoyun, Chen Xueqin *et al.*. Analysis of multimode fiber bending loss [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis 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