

文章编号: 1001-3806(2007)06-0607-03

掺镜多模双包层光纤激光器弯曲选模研究

王凤蕊, 李明中, 林宏奂, 王建军

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 为了使大芯径多模双包层光纤激光器实现基模输出以抑制高功率双包层光纤激光器中的非线性效应, 采用将大芯径的多模双包层光纤适当弯曲进行选模使双包层光纤激光器获得单模激光输出的方法, 进行了理论分析和实验验证, 取得了大芯径多模双包层光纤内包层折射率、纤芯半径、光纤内传输信号光波长、光纤弯曲半径等因素对弯曲损耗及激光器输出光场模式影响的数据, 并采用国产掺镜多模双包层光纤进行了弯曲选模实验, 实现了多模光纤激光器的单模输出。结果表明, 激光器最大输出功率达 9W, 斜率效率达 17.3%, 输出为基模。这一结果对大芯径多模双包层光纤激光器的选模是有帮助的。

关键词: 光纤光学; 基模; 弯曲损耗; 大芯径多模双包层光纤

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Research of mode selection in a coiled Yb³⁺-doped multimode double clad fiber laser

WANG Feng-ru, LIM ing-zhong, LIN Hong-huan, WANG Jun-jun

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics in manyang 621900, China)

Abstract In order to realize the monomode output in large core multimode double clad fiber laser to suppress the nonlinear effects in high power double clad fiber lasers mode selection by bending the large core multimode double clad fiber to a suitable radius was used. Theoretical analysis and experiments about mode selection in large core multimode double clad fiber laser were demonstrated in this paper. Factors that influence the laser bending loss and output mode, such as inner clad refractive index, core radius, laser wavelength, bending radius were obtained. Monomode output was obtained from multimode double clad fiber laser by bending the homemade Yb³⁺-doped large core multimode fiber. The laser has a fundamental mode output with power of 9W, conversion efficiency of 17.3%. The research is useful in mode selection from large core multimode double clad fiber laser.

Key words fiber optics; fundamental mode; bending loss; large core multimode double clad fiber

引 言

随着双包层光纤激光器的输出功率不断增加, 由于单模双包层由于纤芯直径小, 激光器的输出容易受到受激喇曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS)、受激布里渊散射 (stimulated Brillouin diffusion, SBS)、四波混频 (four wave mixing, FWM) 等非线性效应^[1, 2]的影响, 并且光纤易发生热损伤, 限制了输出功率的进一步提高。为克服这个困难, 采用了大纤芯的多模双包层光纤^[3]作为增益介质。但是, 大纤芯的引入会使输出激光的光束质量下降, 为此, 提出了很多采用多模光纤获得基模 (LP₀₁) 输出的方法。如采用特殊腔形^[4]、合理设计光纤的掺杂分布^[3, 5, 6]等可以实现多模光纤

的单模运转。但上述方法工艺要求较高, 实施起来有一定困难。本文中采用弯曲方式对大纤芯多模双包层光纤激光器的输出进行了模式选择, 研究了弯曲损耗对大纤芯多模双包层光纤激光器输出光场的影响, 对影响弯曲损耗的各种因素进行了理论模拟, 并进行了实验研究。在国产掺镜大芯径多模双包层光纤激光器中获得了基横模输出光场, 最大输出功率 9W, 斜率效率 17.3%。该方法简单易行, 具有较好的实用价值。

1 理论模拟

光纤在实际应用中不可避免的要发生弯曲, 这种弯曲会使传输光发生一定程度的损耗^[7-14]。根据光纤的工作原理, 在正常情况下, 光在光纤里沿轴向传播常数 β_g 应满足关系式: $n_1 k_0 < \beta_g < n_2 k_0$, k_0 为真空中的波数, n_1 和 n_2 分别为双包层光纤的内包层和纤芯的折射率。当光纤弯曲时, 光电场在弯曲部分中进行传输, 如果要保持同相位的电场和同相位的磁场在一个平面

作者简介: 王凤蕊 (1979-), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤光学方面的研究工作。

Email: wfr2000@163.net

收稿日期: 2006-09-19; 收到修改稿日期: 2007-01-25

里,即保持导行的情况,那么越靠近外侧,其速度就会越大。在某一点,其相速会等于所在物质中的光速,超过这个点后,电磁波就成为辐射波,即 $\beta_g > n_2 k_0$, 光纤中的部分能量随着电磁波辐射出去,就是我们所说的弯曲损耗。实际应用中,可以利用这一点获得基模激光输出^[7-14]。

根据 MARCUSE 的理论,光纤弯曲损耗表达式为^[6]:

$$2\alpha = \frac{\sqrt{\pi} k^2 \exp\left[-\frac{2}{3}(r^3/\beta_g^2)R\right]}{e_v r^{3/2} V^2 \sqrt{R} K_{v-1}(ra) K_{v+1}(ra)} \quad (1)$$

式中, α 和 R 分别为光纤半径和光纤的弯曲半径, k 为波数, K 为第二类变形贝塞尔函数。

$$e_v = \begin{cases} 2 & v = 0 \\ 1 & v \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$V^2 = k^2 a^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (3)$$

v 即对应 LP_{mn} 中的 m 值。因此 $v = 0$ 时, $e_v = 2$ 表示输出为混合波(HE 或 EH)的形式。

式中, r 由以下方程得到:

$$r = (\beta_g^2 - n_2^2 k^2)^{1/2} \quad (4)$$

每个模式对应的传播常数 β_g 可以通过以下方程求得:

$$\begin{aligned} \beta_g &= nk(1 + \Delta - \Delta b) \\ \Delta &= (n_c - n) / n \end{aligned} \quad (5)$$

式中, n 为光纤平均折射率, n_c 为纤芯折射率, b 为归一化传播常数。

实验使用大芯径多模双包层光纤为天津 46 所提供,光纤内包层参数: D 形,尺寸 $350\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$, 折射率 1.458, 数值孔径 0.47。光纤纤芯参数: 半径 $14.3\mu\text{m}$, 折射率 1.462。根据上述条件计算,光纤中可传输的模式共有 12 个,它们分别是: LP_{01} , LP_{11} , LP_{02} , LP_{21} , LP_{31} , LP_{12} , LP_{41} , LP_{03} , LP_{22} , LP_{51} , LP_{32} , LP_{13} 。

以 LP_{01} 和 LP_{11} 模为例计算了弯曲对模式损耗的影响,见图 1。从图中可以看出,阶数不同对弯曲半径的

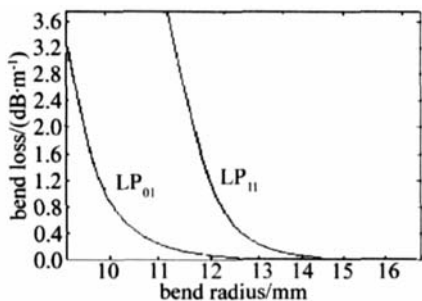


Fig 1 Bending loss versus bend radius

敏感程度也不相同。在同一弯曲半径下, LP_{11} 模的损耗大于 LP_{01} 模。理论计算表明,低阶模的弯曲损耗较高阶模低。由于弯曲损耗会减小模式在光纤中的传输功率,并且弯曲到一定程度时,高阶模式被全部辐射

掉,因此,利用这种方法可以将多模光纤中的高阶模滤掉,从而达到基模输出的目的。

由图 1 可知,当弯曲半径为 11.5mm 时,基模损耗近乎为 0, LP_{11} 模损耗约 2dB/m,如果光纤长度为 10m,则 LP_{11} 模的能量只剩下原来的 1% 了,因此,可以通过选择合适的弯曲半径和光纤长度获得基模输出。

为了在得到基模激光输出的同时,应尽量减少基模的弯曲损耗,应用 Dietrich Marcuse 的理论,对光纤参数与弯曲损耗的关系进行了模拟。

下面讨论弯曲损耗随内包层折射率的变化情况,计算中取纤芯折射率、光纤半径同上,改变内包层折射率,结果见图 2。在光纤数值孔径较小的情况下,高阶

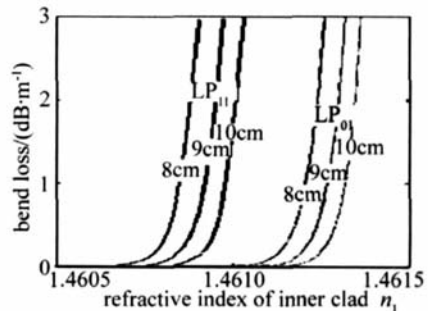


Fig 2 Bending loss versus refractive index of inner clad in different bend radius

模的弯曲损耗远远大于基模,因此选择具有小数值孔径纤芯的光纤,可以使我们在弯曲半径较大的情况下,获得衍射极限的光斑输出,大大降低了弯曲对基模造成的损耗。

观察图中弯曲半径为 10cm 的曲线,对于 10m 的多模双包层光纤, LP_{11} 模损耗接近 100% 时,基模损耗为 0,对应内包层折射率 1.461,纤芯数值孔径为 $(n_2^2 - n_1^2)^{1/2} = 0.0539$ 。与前面结果比较,弯曲半径增加了 9cm,而基模损耗降低到 0。

除数值孔径对弯曲损耗的影响比较大以外,光纤中传输的信号光波长和光纤半径对各阶模式的弯曲损耗也有影响,根据上面的结果,对基模损耗为 0 内包层折射率取 1.461 的情况进行了计算。结果分别如图 3 图 4 所示。从图 3 可以看出,弯曲半径一定的情况

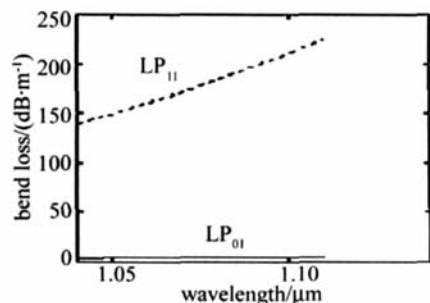


Fig 3 Bending loss of LP_{01} and LP_{11} versus laser wavelength (refractive index of inner clad is 1.461)

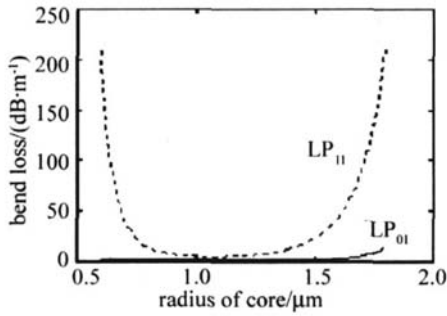


Fig 4 Bending loss of LP₀₁ and LP₁₁ versus radius of the core (refractive index of inner clad is 1.461)

下,随着光纤中信号光波长的增加,基模损耗几乎不变,而高阶模则随之增加;图 4 曲线的趋势与图 3 相似,即纤芯半径越大,基模与高阶模的损耗相差越大。这说明信号光波长越长、纤芯半径越大,能够获得基模输出的弯曲半径也就越大,需要的光纤长度也越短,同时保持了激光器较高的效率,这与文献 [2] 中的结论相一致。图中 LP₁₁ 模的曲线为 U 形,这是因为在纤芯半径较小时,光纤中模式为单模。

2 实验研究

实验中采用天津 46 所生产的掺 Yb³⁺ 大芯径多模双包层光纤,内包层及纤芯参数如前所述,光纤对 976nm 抽运光的吸收系数为 3dB/m,光纤长度 25m。实验装置如图 5 所示,LD 输出抽运光经耦合系统和双

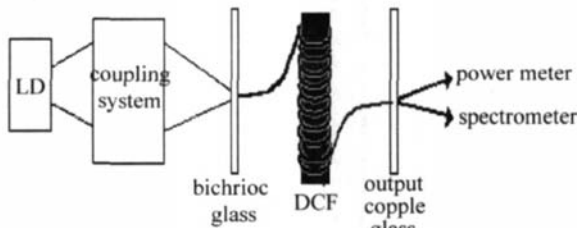


Fig 5 Setup of mode selection in acclad double clad fiber laser

色镜后进入双包层光纤,实验中除双包层光纤两端用于抽运激光注入和信号激光输出的一小段光纤外,其余全部紧密缠绕在一个直径为 19mm 的圆柱体上,光纤输出端面紧贴一块输出耦合镜,对信号光的反射率为 10%,对抽运光全反。

逐渐增加 LD 电流,用 Gentec 光功率计监测激光器输出功率。采用截断法预先测得耦合系统耦合效率为 70%,图 6 为抽运功率与激光器输出激光功率得关系。实线为弯曲前入纤功率与激光器输出功率的关系,虚线为弯曲后入纤功率与激光器输出功率的关系。

实验中测得弯曲后激光器最大输出功率为 9W,此时对应的入纤功率为 52W。由图可得激光器阈值及转换效率分别为 5W 和 17.3%,与未弯曲时激光器的阈值及转换效率 3W 和 50.8% 相比,阈值有所增

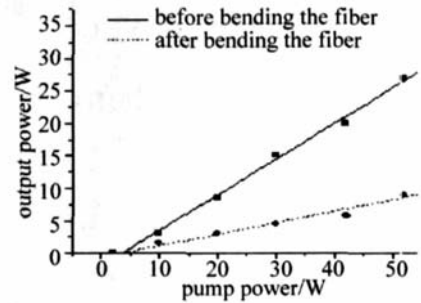


Fig 6 Output power versus pump power

加,转换效率只有弯曲前的 1/3 左右,正是弯曲损耗造成了激光器阈值的升高和转换效率的下降。

用 CCD 结合衰减片,观察对光纤进行弯曲前后激光器输出光场的变化,图 7 是光纤弯曲前后的光场图

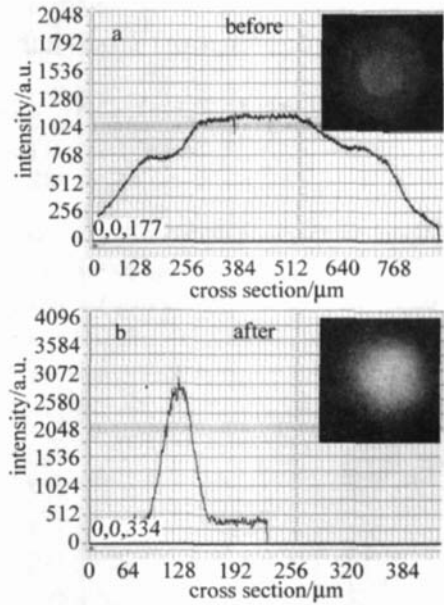


Fig 7 Output intensity distribution

强度曲线。很明显,弯曲前光场是很多个模式叠加输出的结果;弯曲选模后激光器的输出光场近似为高斯型分布,可以认为输出光场为基模,与未弯曲情况相比,有了非常大的改善。实验证明弯曲选模可以获得基模输出。

3 总结

研究了弯曲损耗对多模光纤激光器输出光场的影响,对影响光纤弯曲损耗的各种因素:弯曲半径、纤芯半径、纤芯数值孔径、信号光波长等进行理论计算,计算表明选取纤芯数值孔径较小、纤芯半径较大的光纤可以在较大的弯曲半径下获得衍射极限激光输出。通过弯曲选模实验获得了大芯径多模双包层光纤激光器的基模输出,激光器光光转换效率为 17.3%,该方法简单易行,具有较好的实用价值。

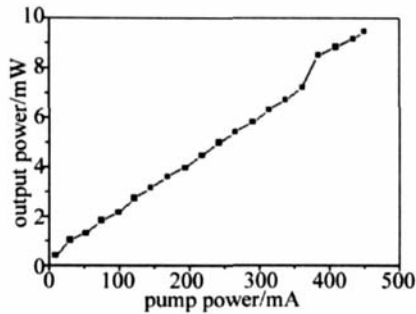


Fig 4 Relationship of output power vs pump power of locked mode laser

运功率为 385mW 时, 实验观测到脉冲的稳定性发生变化, 锁模状态的脉冲顶部发虚。抽运功率附近输出功率曲线的斜率变化, 主要是由于随着抽运功率的增加, 非线性偏振旋转这种类饱和吸收体的吸收特性发生了变化引起的。

3 结论

基于非线性偏振旋转锁模技术, 采用掺镱光纤与偏振相关光隔离器, 光纤偏振控制器等构成锁模光纤激光器, 实现稳定的, 自起振被动锁模运转, 通过调节偏振控制器实现了锁模脉冲的波长调谐, 获得了波长 1053nm、重复频率 23.7MHz、脉冲宽度为 126ps 的超短光脉冲。实验产生的超短脉冲已用于在中国工程物理研究院激光聚变研究中心进行了 4 路超短脉冲的堆积实验。由于在 1 μ m 附近石英光纤呈现很强的正色散, 故所得脉冲啁啾较大。若通过色散补偿, 将可获得

脉冲特性更好的超短脉冲。实验还研究了激光器输出功率与抽运功率的关系。当抽运功率为 450mW 时, 激光器的输出功率可达 9.5mW, 且未达饱和状态, 通过提高抽运功率, 激光器的输出功率可以进一步提高。

参考文献

- [1] MATSAS V J, NEWSON T P, RICHARDSON D J *et al*. Self starting passively mode locked fibre ring soliton laser exploiting non linear polarization rotation [J]. *Electron Lett* 1992, 28(15): 1391~ 1393
- [2] LI Sh P, CHEN X, KUKSENKO V D *et al*. Wavelength tunable stretched-pulse mode locked all fiber erbium ring laser with single polarization fiber [J]. *Optics Express* 2006, 14(13): 6098~ 6102
- [3] LEFORT L, PRICE J H V, RICHARDSON D J *et al*. Practical low-noise stretched-pulse Yb³⁺-doped fiber laser [J]. *Opt Lett* 2002, 27(5): 291~ 293
- [4] NIELSEN C K, JESPERSEN K G, KEIDING S R A. 158fs 5.3nJ fiber laser system at 1 μ m using photonic bandgap fibers for dispersion control and pulse compression [J]. *Optics Express* 2006, 14(13): 6063~ 6068
- [5] LIM H, ILDAY F O, WISE F W. Generation of 2-nJ pulsed from a femtosecond ytterbium fiber laser [J]. *Opt Lett* 2003, 28(8): 660~ 662
- [6] PASK H M, CARMAN R J, HANNA D C *et al*. Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1.2 μ m region [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 1995, 1(1): 2~ 3
- [7] MA H Q, ZHAO W, ZHANG W *et al*. Wavelength-tunable passively mode locked fiber lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(6): 289~ 291 (in Chinese).
- [8] CHEN B, CHEN L R, LIN Z Q *et al*. Selecting lasing wavelength by varying fiber length [J]. *Chinese Journal of Lasers* 1999, 26(12): 1061~ 1065 (in Chinese).
- [9] NELSON L E, JONES D J, HAUSH A *et al*. Ultrashort pulse fiber ring lasers [J]. *Appl Phys* 1997, B65(2): 277~ 294

(上接第 609 页)

参考文献

- [1] ORTAC B, HIEUR A, CHARTIER T. Influence of cavity losses on stimulated Brillouin scattering in a self-pulsing side-pumped ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Optics Commun* 2003, 215(6): 389~ 395.
- [2] HIEUR A, CHARTIER T, SANCHEZ F. Yb-doped double-clad fiber laser in a unidirectional ring cavity [J]. *SPE*, 1998, 4216: 15~ 21.
- [3] SHEN H, DING G L, WANG Y Sh *et al*. Simulation and experimental study of double-cladding Er-doped fiber lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, 31(1): 70~ 72 (in Chinese).
- [4] OFFERHAUS H L, BRODERICK N G, RICHARDSON D J. High energy single-transverse mode Q-switched fiber laser based on a multimode large-mode-area erbium-doped fiber [J]. *Opt Lett* 1998, 23(21): 1683~ 1685
- [5] GRIEBNER U, KOCH R, SCHÖNAGEL H *et al*. Efficient laser operation with nearly diffraction-limited output from a diode-pumped heavily Nd-doped multimode fiber [J]. *Opt Lett* 1996, 21(4): 266~ 268.
- [6] SHI L, ZHAO Sh H, ZHOU W Y *et al*. Double-pass forward pumping broadband Er³⁺/Yb³⁺-codoped superfluorescent fiber source [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 148~ 151 (in Chinese).
- [7] WEAKLY D G. Guiding fibers [J]. *Appl Opt* 1971, 10(10): 2252~ 2257.
- [8] MARCUSE D. Curvature loss formula for optical fibers [J]. *J O S A*, 1976, 66(3): 216~ 220
- [9] MARCUSE D. Field deformation and loss caused by curvature of optical fibers [J]. *J O S A*, 1976, 66(4): 311~ 320.
- [10] HE G Y, JIANG J X, LU P. Theory of losses in bending of multimode fibers [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology* 1997, 2(5): 91~ 96 (in Chinese).
- [11] LU Y X, YANG X Y, CHEN X Q *et al*. Analysis of multimode fiber bending loss [J]. *Journal of Zhongshan University*, 2002, 41(5): 25~ 27 (in Chinese).
- [12] LIU J, FERDINAND P. Theoretical analysis of multimode fiber microbend attenuation and its application [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications* 1994, 17(1): 56~ 60 (in Chinese).
- [13] DUES A L, SUNAK R D. Design consideration for minimization macrobending loss in erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* 1991, 3(1): 50~ 52.
- [14] IJONMAA S. Beam-propagation analysis of loss in bent optical waveguides and fibers [J]. *J O S A*, 1983, 73(12): 1785~ 1791.