

文章编号: 1001-3806(2009)05-0497-03

微纳光纤的导波及远场辐射特性

郑之伟,任卫红,赵楚军,文双春*,范滇元

(湖南大学 计算机与通信学院 微纳光电器件及应用教育部重点实验室,长沙 410082)

摘要: 为了研究微纳光纤的导波和远场辐射特性,采用模式理论和衍射理论分析了微纳光纤芯径与模场、 z 向能流密度、有效模面积和远场强度的关系,并通过拉锥光纤进行了实验验证。结果表明,通过合理设计,微纳光纤的大部分能量在包层中以倏逝波的形式传输,光纤的有效模面积可以超过 $1000\mu\text{m}^2$ 。拉锥光纤的实验证实了微纳光纤可以有效地传输导波并把其辐射出去。

关键词: 激光技术;微纳光纤;模式理论;远场

中图分类号: TN252 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.014

Guiding and far-field radiation characteristics of micro/nano optical fibers

ZHENG Zhi-wei, REN Wei-hong, ZHAO Chu-jun, WEN Shuang-chun, FAN Dian-yuan

(Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to study guiding and far-field radiation characteristics of micro/nano optical fibers, the relation between core diameters and the mode field, z -direction Poynting vector, effective mode area and far-field intensity was simulated. Then experimental demonstration was carried out by means of tapered fibers. The results showed that the micro/nano fibers might have a large mode area evanescent field larger than $1000\mu\text{m}^2$ for an appropriate design. Experimental results of tapered fibers verify that the micro/nano optical fiber can effectively guide the field and radiate it out.

Key words: laser technique; micro/nano fiber; modal field theory; far-field radiation

引言

高功率光纤激光器与传统的固体和气体激光器相比,具有输出光束质量高、光电转换率高、输出功率稳定性好、结构紧凑小巧、寿命长等优点。随着单根光纤功率的提高,高功率光纤激光器在工业加工等领域得到了广泛应用。

但是,功率的进一步提高受到光纤中的非线性效应(主要是受激喇曼散射、受激布里渊散射、自相位调制)及损伤阈值的限制。虽然增大芯径可以增大模面积,但往往不能满足单模运转的要求。因此,探索能够同时实现大模面积和单模运转的技术,对高功率光纤激光器发展具有重要意义。现在常规光纤可以在芯径约 $40\mu\text{m}$ 的情况下保持单模^[1-3],光子晶体光纤可以在芯径 $100\mu\text{m}$ 的情况下保持单模^[4-7],增益导引-折射率反导引光纤可以在芯径 $100\mu\text{m} \sim 400\mu\text{m}$ 情况下保持单模^[8]。但由于光纤设计及制备问题,大模场单模光

纤仍值得进一步探索^[9-15]。

受到硅基倏逝波激光^[16]的启发,作者提出了大模场倏逝波承载单模高功率激光器的方案^[17]。大模场倏逝波光纤由包层掺杂提供增益,而微纳芯径则起到导引模场和保证单模工作的作用。作为方案基础,微纳光纤能否有效导引和辐射成为研究的重点。本文中讨论了微纳光纤的导波性质,然后在此基础上分析了微纳光纤的远场辐射特性。

1 理论模型

1.1 模场理论

假定微纳光纤无损耗、无源,纤芯和包层的折射率分别为 n_1, n_2 , 其折射率分布为^[18]:

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & (0 < r < a) \\ n_2, & (a \leq r < \infty) \end{cases} \quad (1)$$

式中, a 为纤芯半径。光纤中导波满足亥姆霍兹方程:

$$\begin{cases} (\nabla^2 + n^2 k^2 - \beta^2) \vec{e} = 0 \\ (\nabla^2 + n^2 k^2 - \beta^2) \vec{h} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, k 为自由空间的波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, β 为传播常数。 \vec{e} 和 \vec{h} 分别是电场强度和磁场强度矢量。

作者简介:郑之伟(1984-),男,硕士研究生,现主要从事光纤激光器和放大器的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail:scwen@hnu.cn

收稿日期:2008-11-08;收到修改稿日期:2008-12-15

在弱导近似下,微纳光纤模场 $\Psi_0(r, \phi_0)$ 分布:

$$\begin{cases} \Psi_0(r, \phi_0) = A J_v\left(\frac{U}{a}r\right) \cos(v\phi_0), (r < a) \\ \Psi_0(r, \phi_0) = A \frac{J_v(U)}{K_v(W)} K_v\left(\frac{W}{a}r\right) \cos(v\phi_0), (r > a) \end{cases} \quad (3)$$

式中, A 表示系数, ϕ_0 表示方位角, $J_v(U)$ 表示第 1 类正态贝塞尔函数, $K_v(W)$ 表示第 2 类变型贝塞尔函数, v 表示贝塞尔函数的阶数, $U = a(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}$, $W = a(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}$.

在纤芯与包层的界面上应用边界条件,可以得到线偏振 (linear polarized, LP) 模的特征方程为:

$$\frac{J_v(U)}{U J_{v+1}(U)} = \frac{K_v(W)}{W K_{v+1}(W)} \quad (4)$$

相应 LP_{01} 的本征方程可以简化为:

$$\frac{J_0(U)}{U J_1(U)} = \frac{K_0(W)}{W K_1(W)} \quad (5)$$

由(5)式就可以求出基模的传播常数,从而进一步求出光纤的电磁场分布。

2.2 远场辐射理论

利用 Fraunhofer 衍射积分公式,可以估算得到球面坐标系下的基模远场 $\Psi(r, \theta, \phi)$ 的分布情况:

$$\Psi(r, \theta, \phi) = \frac{ie^{-ikr}}{\lambda r} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Psi_0(r, \phi_0) \cdot \exp\{ikr \sin\theta \cos(\phi - \phi_0)\} r dr d\phi \quad (6)$$

将(3)式代入上式,则可以得到:

$$\begin{aligned} \Psi(r, \theta, \phi) = & A \frac{ie^{-ikr}}{\lambda r} \int_0^{2\pi} \int_0^a J_v\left(\frac{U}{a}r\right) \cos(v\phi_0) \cdot \\ & \exp\{ikr \sin\theta \cos(\phi - \phi_0)\} r dr d\phi + \\ & A \frac{ie^{-ikr}}{\lambda r} \int_0^{2\pi} \int_a^\infty \frac{J_v(U)}{K_v(W)} K_v\left(\frac{W}{a}r\right) \cos(v\phi_0) \cdot \\ & \exp\{ikr \sin\theta \cos(\phi - \phi_0)\} r dr d\phi \end{aligned} \quad (7)$$

式中, θ 为基模的发散角,其它物理量与前面表述相同^[19]。

2 分析与讨论

2.1 微纳光纤的导波特性

根据阶跃光纤的模式理论,数值模拟了微纳光纤的导波特性。计算中,纤芯与包层的折射率分别为 $n_1 = 1.464$ 和 $n_2 = 1.456$, 计算波长取 1064nm 。对于不同芯径的光纤,其归一化模场分布如图 1 所示。当纤芯的直径为 1600nm 时,光纤的模场变化很快,径向方向 $20\mu\text{m}$ 外的模场趋向于 0,其 z 向能流密度分布如图 2a 所示。随着纤芯直径的缩小,光纤的模场曲线变化变慢,当纤芯直径缩小到 800nm 时,模场可以弥散到 $100\mu\text{m}$ 以外。通过对比可以发现,芯径越小,光纤

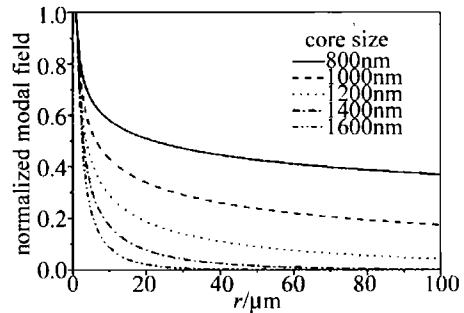


Fig. 1 Normalized modal field for micro/nano fibers in different core diameters

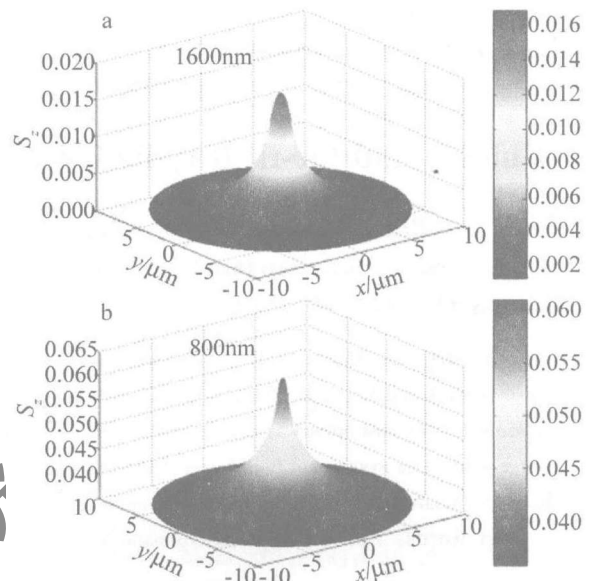


Fig. 2 z-direction Poynting vector with core diameters

对导波的束缚能力减弱,包层的倏逝波增强,模场向外弥散,且直径越小弥散的越厉害,这一点在图 2b 所示的能流密度分布曲线中可以看出。

图 3 是不同芯径微纳光纤情况下,芯径与有效面积的关系。当光纤芯径逐渐减小时,光纤的有效面积会急剧增加。当芯径小于 $1\mu\text{m}$ 时,光纤的有效面积约 $1000\mu\text{m}^2$,相当于芯径 $30\mu\text{m}$ 的普通光纤。

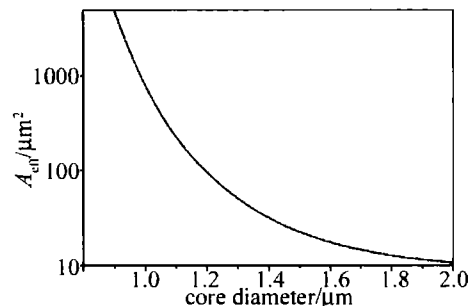


Fig. 3 Effective mode area of micro/nano fibers in different core diameters

作者提出来的新方案就是基于微纳光纤的这种大模场倏逝波,此时纤芯起导引模场和保证单模工作的作用。

2.2 远场特性

当光纤芯径减小到微纳量级时,光纤能量大部分

以倏逝波形式在包层内传输,而这种大模场倏逝波是能够有效辐射出去值得探讨。这里,通过(7)式得到了不同芯径微纳光纤的远场分布情况,如图4所示。

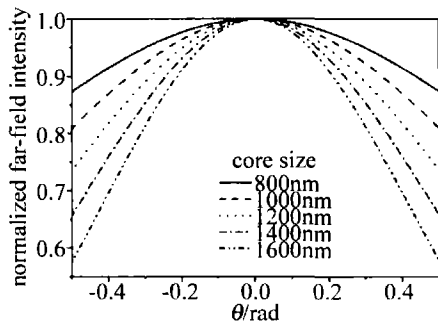


Fig. 4 Plot of far-field radiation pattern versus angle

从图中可以看出,纤芯直径为1600nm时,远场强度曲线从中心向两边下降的很快, θ 分布范围较窄,这和此时光纤倏逝波较弱紧密相关。随着纤芯直径减少,远场强度曲线从中心向两边下降的速度减慢, θ 的分布范围变宽,说明纤芯的芯径减小,倏逝波增强,基模远场强度分布的范围增大。

同时,将现有的石英光纤拉锥。光纤具体参量为:纤芯4 μm ,包层125 μm ,数值孔径0.069,纤芯折射率1.464,包层折射率1.456。在光纤拉锥前,将

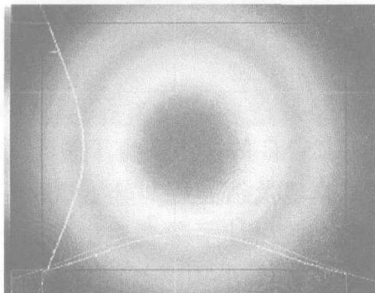


Fig. 5 Intensity distribution of the untapered fiber 6cm away from the fiber end

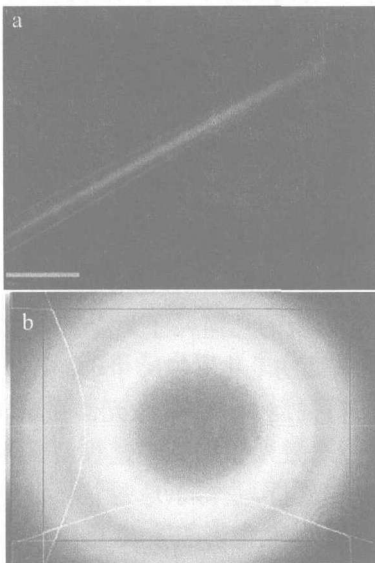


Fig. 6 a—electron micrographs of the tapered fiber b—intensity distribution of the tapered fiber 6cm away from the fiber end

975nm激光注入,在距离6cm左右处,观察到的CCD图像如图5所示,有效面积为23.29 mm^2 。

如果将光纤拉锥,光纤外径10 μm 时的显微图像如图6a所示。此时,相同激光注入情况下,距离6cm左右CCD处的光斑如图6b所示,有效面积为25.84 mm^2 。

通过实验可以发现,拉锥后的光纤跟未拉锥前的光纤一样能够有效地传输导波,并将光场辐射出去。而且拉锥光纤远场辐射的有效面积更大。

3 结论

通过阶跃光纤模式理论和衍射理论,分析了微纳光纤的导波特性及远场辐射特性。随着光纤芯径的减小,光纤模场范围愈加弥散,当光纤芯径只有800nm时,模场可以弥散到上百微米的范围,其有效面积也超过1000 μm^2 。而且,随着纤芯的减小,微纳光纤的远场分布光斑越大,有效面积越大。通过拉锥石英光纤,实验验证了微纳光纤能够有效地传输导波并将其辐射出去。这些结论对大模场倏逝波光纤的设计、制备及应用具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power [J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [2] KOPLow J P, KLINER D A, GOLDBERG L, *et al.* Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(7): 442-444.
- [3] LIMPert J, HUFER S, LIEM A, *et al.* 100W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Appl Phys*, 2002, B75(4/5): 447-479.
- [4] LIMPert J, SCHMIDT O, ROTHHARDT J, *et al.* Extended single-mode photonic crystal fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 2715-2720.
- [5] DENG Y L, YAO J Q, RUAN Sh Ch, *et al.* High power photonic crystal fiber laser and key issues [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(6): 596-598 (in Chinese).
- [6] PAN Y Zh, ZHANG J, HU G J, *et al.* Photonic crystal fiber and laser [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 48-51 (in Chinese).
- [7] BROOKS C D, TEODORO F D. Multimegawatt peak-power, single-transverse-mode operation of a 100 μm core diameter, Yb-doped rod-like photonic crystal fiber amplifier [J]. *A P L*, 2006, 89(11): 111-119.
- [8] CHEN Y, McCOMB T, SUDESH V, *et al.* Very large-core, single-mode, gain-guided, index-antiguidded fiber lasers [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(17): 2505-2507.
- [9] WANG F R, LI M Zh, LIN H H, *et al.* Research of mode selection in a coiled Yb³⁺ doped multimode double clad fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6): 607-609 (in Chinese).
- [10] WANG P, COOPER L, SAHU J, *et al.* Efficient single-mode operation of a cladding-pumped ytterbium-doped helical-core fiber amplifier [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(2): 226-228.

(下转第502页)

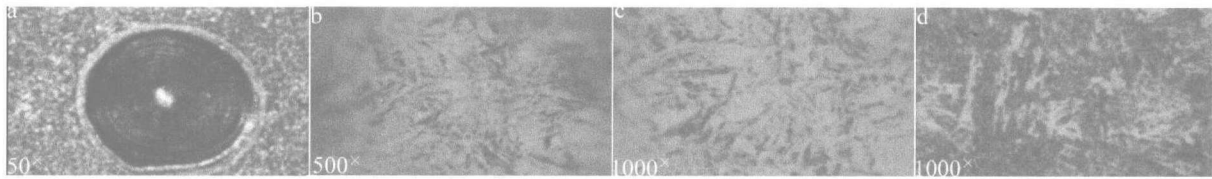


Fig. 5 a, b, c—microstructure and metallographic structure of laser texturing spot d—metallographic structure of substrate surface

2.4.2 表面硬度测量分析 首先在试样基体表面进行硬度测量, 然后对微凸体表面进行硬度测量。测量过程中, 对各不同的表面分别取 3 个点测出 3 个硬度值, 然后取其平均值。测量结果见表 1。

Table 1 The hardness of slight protuberance and the matrix

laser texturing spot	surface hardness of protuberance/HV			
	first spot	second spot	third spot	average
a	463.6	366.3	541.3	457.07
b	566	482.7	559.8	536.17
c	487.7	487.7	612.5	529.3
d	463.3	541.8	547.7	517.6
e	463.6	428.6	513.7	468.63

结果表明: 在模具试样表面激光毛化形成的微凸体表面硬度比基体的表面硬度提高了 30% ~ 40%。

总之, 通过对毛化点和基体材料表面金相组织和硬度的分析可知, 经激光毛化处理后, 可显著提高模具表面的硬度, 有利于提高模具表面的耐磨损性能, 延长模具的使用寿命。

3 结论

通过激光毛化参量控制试验, 成功获得了预期的毛

化形貌。毛化形貌表面硬度高于基体材料表面硬度, 有利于提高模具表面的耐磨损性能, 延长模具的寿命。

参考文献

- [1] JIANG J F, HE Y H, YAN Y G, *et al.* Research on laser texturing process and surface quality control [J]. Proc SPIE, 2000, 4088: 240-243.
- [2] DU D, HE Y F, SUI B, *et al.* Laser texturing of rollers by pulsed Nd:YAG laser [J]. Materials Processing Technology, 2004, 161(3): 456-461.
- [3] HE Y F, DU D, LIU Y, *et al.* Parametric analysis of pulsed Nd:YAG laser texturing process [J]. Laser Technology, 2003, 27(1): 8-10 (in Chinese).
- [4] HE Y F, DU D, SUI B, *et al.* Laser texturing of spherical cap slight protuberance profile on roll surface [J]. Applied Laser, 2002, 22(3): 327-330 (in Chinese).
- [5] LIU Y, CHEN D R, YANG W Y. Experimental investigation of laser-textured on roller with micro-convex topography [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 107-110 (in Chinese).
- [6] ZHU M Zh. Technology and experimental study on roll surface texturing with pulse RF CO₂ laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006: 41-47 (in Chinese).
- [7] XUE Y, CHEN P F, ZHU M Zh. Experimental research on RF used in roller texturing [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2007, 5(4): 16-19 (in Chinese).
- [8] POTERASU M, DASCALU T, MARIAN A, *et al.* Nd:YAG laser surface texturing [J]. Proc SPIE, 1999, 3045: 233-240.

(上接第 499 页)

- [11] YUAN Y Y, GONG M L. Analysis and design of refractive-index and dopant distributions for large-mode-area fibers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(9): 1355-1359 (in Chinese).
- [12] GONG M L, YUAN Y Y, LI Ch, *et al.* Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers [J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3236-3246.
- [13] FERMAN M E. Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulses [J]. Opt Lett, 1998, 23(1): 52-54.
- [14] ALVAREZ-CHAVEZ J A, GRUDININ A B, NILSSON J, *et al.* Mode selection in high power cladding pumped fiber lasers with tapered section [C]//Proceedings of the Lasers and Electro-Optics, 1999. Baltimore: CLEO99 Conference Publication, 1999: 247-248.
- [15] LI L B, LOU Q H, ZHOU J, *et al.* Mode selection of a tapered large-

mode-area fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(12): 1625-1628 (in Chinese).

- [16] PARK H, FANG A W, KODAMA S, *et al.* Hybrid silicon evanescent laser fabricated with a silicon waveguide and III-V offset quantum wells [J]. Optics Express, 2005, 13(23): 9460-9464.
- [17] ZHAO Ch J, QIAN L J, YUAN P, *et al.* Fiber amplifier based on evanescent-coupled gain [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 848 (in Chinese).
- [18] TONG L M, LOU J Y, MAZUR E, *et al.* Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides [J]. Optics Express, 2004, 12(6): 1025-1035.
- [19] BONCEK R K, RODE D L. Far-field radiation and modal dispersion of 1310nm dispersion-optimized fiber at 850nm [J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(1): 18-21.