

文章编号: 0258-7025(2010)03-0627-04

# 偏斜光线抽运下回音壁模式光纤激光辐射的偏振特性

冯永利 韩德昱 普小云 祝 昆 江 楠

(云南大学物理系, 云南 昆明 650091)

**摘要** 研究了消逝波激励的回音壁模式(WGM)光纤激光器的偏振特性。实验发现,在抽运光以偏斜光线方式沿光纤的近轴向抽运时,回音壁模式激光既存在横电(TE)波又存在横磁(TM)波;对径向模式数( $l$ )和角模式数( $n$ )相同的回音壁模式,TE波和TM波之间的波数差随增益包层溶液折射率的增加而单调地减小。根据消逝波激励的WGM光纤激光的激励机制,结合圆柱型微腔中确定WGM共振位置的解析渐近公式,合理地解释了观察到的实验结果。

**关键词** 光纤激光器;回音壁模式;消逝波激励;横电波和横磁波

中图分类号 TN248.3<sup>+</sup>3;O433.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0627

## Polarization Properties of a Whispering-Gallery-Mode Fiber Laser Pumped by the Evanescent Wave of Skew Beam

Feng Yongli Han Deyu Pu Xiaoyun Zhu Kun Jiang Nan

(Department of Physics, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China)

**Abstract** The polarization properties of a whispering-gallery-mode (WGM) fiber laser pumped by the evanescent wave of skew beam are studied. It is found from the experiments that when pump beam transmits in a bared optical fiber in skew way, both transverse electric (TE) wave and transverse magnetic (TM) wave exist in the laser emission, and the wave-number difference between TE and TM waves decreases monotonely with the increase of the refractive index of cladding solution. Based on the excitation mechanics of evanescent-wave pumped WGM fiber laser and the analytic asymptotic formula to determine the resonant positions of a WGM, the observed experimental results are well explained.

**Key words** fiber laser; whispering-gallery-mode; evanescent-wave pump; transverse electric and transverse magnetic waves

### 1 引 言

消逝波增益耦合的圆形微腔激光器,由于其腔的高品质因数以及增益介质处于微腔的腔体外围,在微腔激光的研究中受到高度重视<sup>[1~10]</sup>。这种微腔激光器通常采用侧向光抽运方式<sup>[1~6]</sup>,腔外介质的激光增益通过圆形微腔回音壁模式(WGM)的消逝场耦合进入腔内,并在WGM的支持下形成激光振荡。采用侧向光抽运方式,抽运光必须经过外层介质的吸收后才能够激励处于微腔WGM消逝场内的增益介质,消逝场外的介质徒然损耗了抽运光

能量,降低了微腔的抽运效率。把侧向光抽运改造为沿圆柱型微腔近轴向<sup>[7,8]</sup>或轴向<sup>[9~12]</sup>的消逝波光抽运,能够显著地提高消逝波增益耦合圆形微腔的抽运效率,增加增益的轴向长度。因此,轴向消逝波光抽运的微腔激光器在近年来受到微腔研究者的关注。对于轴向光抽运的消逝波激励增益方式,增益由抽运光在微腔界面外的消逝场激励产生,消逝场的偏振状态决定了受激分子的振动状态,进而决定了消逝波激励的WGM光纤激光器激光辐射的偏振性质。在先前的实验中发现<sup>[13]</sup>,当抽运光以子午

收稿日期: 2009-05-09; 收到修改稿日期: 2009-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(60877037,10564005)资助课题。

作者简介: 冯永利(1983—),女,硕士研究生,主要从事光电子学实验和理论方面的研究。E-mail: forever5370@163.com

导师简介: 普小云(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事光学与光电子学的科研与教学方面的研究。

E-mail: xyphu@163.com(通信联系人,中国光学学会会员号:190146)

光线方式在光纤中传播时, WGM 激光只存在横电 (TE) 波; 当抽运光以偏斜光线方式沿光纤的近轴向抽运时, WGM 激光既存在 TE 波又存在横磁 (TM) 波。而最新的实验表明, 在偏斜光线抽运条件下, TE 波和 TM 波之间的波数差随增益包层溶液折射率的增加而单调地减小。本文报道了如上实验以及对实验结果的分析 and 解释。

## 2 实 验

图 1 是实验系统设置图。用倍频 YAG 激光器 (北京镭宝公司生产, 脉宽为 7 ns) 波长为 532 nm 的激光脉冲作为抽运光。抽运光依次经过偏振片  $P_1$  和  $P_2$ , 用  $P_2$  确定抽运光的偏振方向, 旋转  $P_1$  获得需要的抽运能量。透镜  $L_1$  和  $L_2$  构成光学缩束系统, 缩束后的光斑直径约为 1.5 mm。抽运光经焦距为 75 mm 的透镜  $L_3$  会聚后, 以  $\theta_i = 1.2^\circ$  的圆锥角进入单一折射率的石英裸光纤  $F_1$ ,  $F_1$  的直径和折射率分别为  $(196 \pm 1) \mu\text{m}$  和 1.458 (光纤直径用德国蔡司 10096 型读数显微镜测量, 折射率取熔融石英在 593 nm 时的数值)。调整  $F_1$ , 使其轴线与  $z$  轴方向的夹角约等于  $10^\circ$ , 抽运光在光纤中以图 1 所示的偏斜光线方式传播<sup>[11]</sup>。将  $F_1$  插入内径等于 2 mm 的玻璃套管  $D$  内, 在  $F_1$  和  $D$  的空隙处注入浓度为  $3 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$  的罗丹明 6 G 乙醇和乙二醇混合溶液, 混合溶液的折射率为 1.395 (2WA-J 型阿贝折射计测量值, 测量精度为  $\pm 0.0002$ )。抽运光在混合溶液中的消逝场  $E_p$  激励染料产生增益, 圆柱形微腔 WGM 消逝场  $E_{\text{WGM}}$  中的光子在染料增益中产生受激辐射, 并将受激辐射光耦合进入微腔, 在 WGM 的支持下形成激光振荡。WGM 激光的光能  $L_{\text{WGM}}$  从光纤表面沿  $xy$  平面辐射出来, 由导光光纤  $F_2$  送至光谱采集系统 (ICCD; PI-MAX; Spectrometer;

Spectrapro 500i) 的进光狭缝口。检偏片  $P_3$  平行于  $F_1$  的轴向, 转动  $P_3$  判断 WGM 激光辐射的偏振状态。

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 偏斜光线抽运条件下的激光光谱

在图 1 所示的偏斜光线抽运条件下, 移开检偏片  $P_3$  后用 2400 g/mm 的光栅光谱仪 (光谱分辨率为 0.05 nm) 直接采集到的 WGM 激光光谱如图 2(a) 所示, 光谱由两组基本等波长间距的相邻谱线构成。加入检偏片  $P_3$ , 将  $P_3$  的通光方向旋转到垂直于  $F_1$  的纤轴方向后, 采集到的 TE 波 WGM 激光光谱如图 2(b) 所示, 在图 2(a) 的两组相邻谱线中波长较长的一组完全消失; 将  $P_3$  的通光方向旋转到  $F_1$  的纤轴方向后, 采集到的 TM 波 WGM 激光光谱如图 2(c) 所示, 在图 2(a) 的两组相邻谱线中波长较短的一组基本消失。图 2 的结果表明, 在偏斜光线抽运条件下由消逝波激励产生的 WGM 激光辐射, 既存在 TE 波又存在 TM 波, 是一种横电波和横磁波同时存在的混合偏振激光辐射。

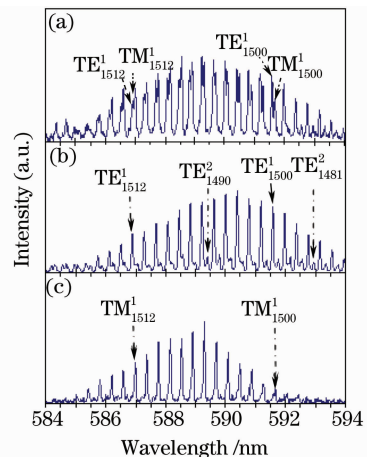


图 2 偏斜光线抽运下的混合偏振 WGM 激光光谱  
Fig. 2 WGM lasing spectrum of TE and TM mixed waves pumped by the skew beams

### 3.2 激光光谱的模式标定

圆柱形微腔中 WGM 的共振位置满足解析渐近公式<sup>[14,15]</sup>

$$m \frac{2\pi a n_2}{\lambda_n^l} = n + 2^{-1/3} a_l n^{1/3} - \frac{P}{(m^2 - 1)^{1/2}} + \frac{3}{10} 2^{-2/3} a_l^2 n^{-1/3} - \frac{2^{-1/3} P(m^2 - 2P^2/3)}{(m^2 - 1)^{3/2}} a m^{-2/3} + O(n^{-1}), \quad (1)$$

式中  $a$  为圆柱形微腔腔体半径 (取  $a = 98 \mu\text{m}$ ),  $\lambda_n^l$  表示径向模式数和角模式数分别是  $l$  和  $n$  的真空中的波长;  $m = n_1/n_2$ ,  $n_1$  和  $n_2$  分别为腔体和腔外介质的折射

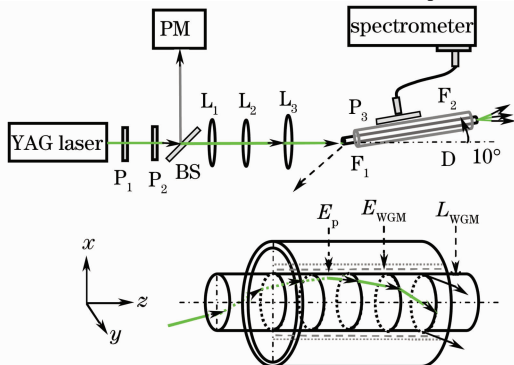


图 1 实验系统设置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

率(取  $n_1 = 1.458, n_2 = 1.395$ ); 对 TM 波,  $P = n_1/n_2 = m$ ; 对 TE 波,  $P = n_2/n_1 = 1/m$ ;  $a_l$  为艾里函数(Airy function)的根, 艾里函数前两个根的数值分别为  $a_1 = 2.338107, a_2 = 4.087949$ 。(1)式表明, 圆柱形微腔中的 WGM 可以由二个模式数( $l, n$ )完整地标定。本文采用的标记方式: 对径向模式数(radial mode order)和角模式数(angular mode number)分别为  $l$  和  $n$  的 TM 波<sup>[16]</sup>, 标记为  $TM_l^n$ ; 对 TE 波, 标记为  $TE_l^n$ 。

以图 2 和图 3 中的实验激光光谱波长为数据, 用(1)式对  $l$  和  $n$  两个 WGM 模式数做拟合分析, 得到图 2 和图 3 中各条激光波长精确的 WGM 模式数(见图 2 和图 3 中的标定符号), 拟合波长和实验波长能很好地吻合。模式标定的结果也说明, 偏斜光线抽运条件下采集到的激光光谱图 2(a), 谱线左侧的一组属于 TE 波, 谱线右侧的一组属于 TM 波, 两组谱线拥有相同的径向模式数( $l=1$ )和角模式数( $n$ )。

### 3.3 TE 和 TM 波之间的波数差随包层溶液折射率的变化

分别配制了浓度为  $3 \times 10^{-3}$  mol/L 的罗丹明乙醇和乙二醇母液, 用改变两种母液体积比的方法获取不同折射率的染料混合溶液(增益包层溶液), 用阿贝折射计测量染料混合溶液的折射率( $n_2$ )。当  $n_2$  分别为 1.430, 1.419, 1.403, 1.395 和 1.383 时, 采集到的 WGM 激光光谱如图 3(a)~(e)所示(以波数为横坐标)。定义相邻 TE(或 TM)模式的间隔为  $\delta\nu^{\text{TE(TM)}} = 1/\lambda_n^{\text{TE(TM)}} - 1/\lambda_{n-1}^{\text{TE(TM)}}$ ; 相同的径向模式数( $l=1$ )和角模式数( $n$ ), TE 和 TM 模式的间隔是  $\delta\nu = 1/\lambda_n^{\text{TE}} - 1/\lambda_n^{\text{TM}}$ 。从图 3 可见, 1)在实验光谱范围内, TE 波或 TM 波之间的波数差都基本保持不变,  $\delta\nu^{\text{TE}} = \delta\nu^{\text{TM}} = 11.24 \text{ cm}^{-1}$ 。2)  $\delta\nu = \delta\nu(n_2)$  是  $n_2$  的单调减函数。当  $n_2 = 1.430$ (纯乙二醇染料溶液)时[图 3(a)],  $\delta\nu$  不能够被所用的光谱仪分辨, TE 和 TM 波并合成为半峰全宽为  $3.2 \text{ cm}^{-1}$  的宽峰;  $n_2$  取 1.419, 1.403, 1.395, 1.383 时,  $\delta\nu$  的平均值分别为  $2.18 \text{ cm}^{-1}$ [图 3(b)],  $2.32 \text{ cm}^{-1}$ [图 3(c)],  $2.55 \text{ cm}^{-1}$ [图 3(d)],  $2.85 \text{ cm}^{-1}$ [图 3(e)]; 当  $n_2 = 1.362$ (纯乙醇染料溶液)时, 高阶径向模式数( $l > 1$ )的产生严重干扰了谱线的辨识, 激光光谱未列在图 3 中。

在(1)式中仅取右边的第一项, 得到和偏振状况无关的相邻 WGM 间隔满足近似关系

$$\delta\nu^{\text{TE(TM)}} = \frac{1}{\lambda_{l=1}^{n-1}} - \frac{1}{\lambda_{l=1}^n} = \frac{1}{2\pi a n_1}. \quad (2)$$

取  $a = 97.5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1.458$  代入(2)式计算, 得

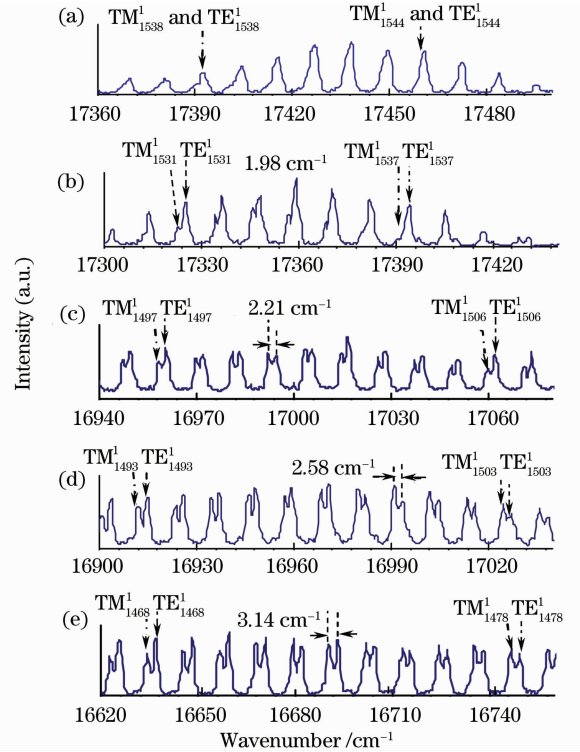


图 3 TE 和 TM 模式之间的波数差随增益包层溶液折射率( $n_2$ )变化的激光光谱。(a)  $n_2 = 1.430$ ; (b)  $n_2 = 1.419$ ; (c)  $n_2 = 1.403$ ; (d)  $n_2 = 1.395$ ; (e)  $n_2 = 1.383$

Fig. 3 Lasing spectrum of the wavenumber difference between TE and TM waves varied with cladding refractive index. (a)  $n_2 = 1.430$ ; (b)  $n_2 = 1.419$ ; (c)  $n_2 = 1.403$ ; (d)  $n_2 = 1.395$ ; (e)  $n_2 = 1.383$

到  $\delta\nu^{\text{TE(TM)}} = 11.20 \text{ cm}^{-1}$ , 和实验结果  $\delta\nu^{\text{TE}} = \delta\nu^{\text{TM}} = 11.24 \text{ cm}^{-1}$  吻合得很好。

为了解释由  $n_2$  的变化引起的 TE 和 TM 波之间的波数差发生改变的现象, 由(1)式得到  $l$  和  $n$  值相同的 TE 波和 TM 波之间的波数差满足近似关系

$$\delta\nu(n_2) = \frac{1}{\lambda_n^{\text{TE}}} - \frac{1}{\lambda_n^{\text{TM}}} = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{2\pi a n_1^2} + \frac{2^{-1/3} a_1 n^{-2/3} (n_1^6 - 3n_1^4 n_2^2 + 2n_2^6)}{6\pi a (n_1^2 - n_2^2)^{3/2} n_1^4}. \quad (3)$$

取  $a = 97.5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $a_1 = 2.338107$  (一阶径向模式数),  $n_1 = 1.458, n_2 = 1.419, 1.403, 1.395, 1.383$ , 由(3)式计算出的值列于表 1 中的第 3 列。和表 1 中第 2 列的实验数值比较, 二者基本吻合。由于(1)式是圆柱形微腔 WGM 共振位置的解析渐近公式, 实验和理论计算值之间存在近 10% 的误差, 误差很可能是由(1)式的有限项截断所造成的。

表 1 WGM 激光实验波数差与理论波数差的偏差值

Table 1 Experimental and theoretical wavenumber difference of WGM lasing emission and their deviation

Refractive index	Experimental values / $\text{cm}^{-1}$	Theoretical values / $\text{cm}^{-1}$	Deviation / $\text{cm}^{-1}$	Relative error /%
1.419	2.18	1.96	-0.22	10.1
1.403	2.32	2.54	0.22	9.50
1.395	2.55	2.79	0.24	9.20
1.383	2.85	3.12	0.27	9.50

## 4 结 论

对消逝波激励及增益耦合的回音壁模式光纤激光器,当抽运光以偏斜光线方式沿光纤的近轴向抽运时,激光辐射中既存在光电矢量与光纤径向垂直的横电波,也存在光电矢量与光纤径向平行的横磁波。随增益包层溶液折射率的增加,径向模式数和角模式数相同的横电波和横磁波模式之间的波数差单调地减小,根据消逝波激励的 WGM 光纤激光的激励机制,结合圆柱型微腔中确定 WGM 共振位置的解析渐近公式,很好地解释了实验结果。

## 参 考 文 献

- 1 H. J. Moon, Y. T. Choung, K. An. Cylindrical microcavity laser based on the evanescent-wave-coupled gain[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(15): 3161~3167
- 2 M. Kazes, D. Y. Lewis, Y. Ebenstein *et al.*. Lasing from semiconductor quantum rods in a cylindrical microcavity[J]. *Adv. Mater.*, 2002, **14**(2): 317~323
- 3 H. J. Moon, C. W. Park, S. B. Lee *et al.*. Waveguide mode lasing via evanescent-wave-coupled gain from a thin cylindrical shell resonator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(22): 4547~4549
- 4 H. J. Moon, Y. T. Choung, Jung B. Kim *et al.*. Cavity-Q-driven spectral shift in a cylindrical whispering-gallery-mode microcavity laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(25): 3679~3681
- 5 H. Fujiwarra, Sasaki. Lasing of a microsphere in dye solution [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(9A): 5101~5106

- 6 Y. S. Choi, H. J. Moon, K. Y. An *et al.*. Ultrahigh-Q microsphere dye laser based on evanescent-wave-coupling[J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2001, **39**(5): 928~932
- 7 A. Shevchenko, K. Lindfors, S. C. Buchter *et al.*. Evanescent-wave pumped cylindrical microcavity laser with intense output radiation[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **245**(2): 349~353
- 8 Jiang Nan, Wang Donglin, Pu Xiaoyun. Whispering-gallery-mode laser of evanescent wave exciting and coupling dye gain in cylindrical microcavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 920~923
- 江 楠, 王东林, 普小云. 消逝波激励及增益耦合的柱形微腔回音壁模激光辐射[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 920~923
- 9 X. Jiang, Q. Song, L. Xu *et al.*. Microfiber knot dye laser based on the evanescent-wave coupled gain[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(4): 233501
- 10 Zhang Yuanxian, Han Deyu, Zhu Kun *et al.*. Wavelength shift of whispering-gallery-mode fiber laser caused by fiber cladding refractive index [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 691~694
- 张远宪, 韩德昱, 祝 昆等. 包层介质折射率引起的回音壁模式光纤激光波长漂移[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 691~694
- 11 Xiang Wenli, Pu Xiaoyun, Bai Ran *et al.*. Longitudinal evanescent-wave pumped whispering-gallery-mode fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2359~2364
- 向文丽, 普小云, 白 然等. 轴向消逝波激励的回音壁模式光纤激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2359~2364
- 12 Jiang Nan, Du Fei, Bai Ran *et al.*. Factor of influencing pumping threshold energy of whispering-gallery-mode laser in a cylindrical micro-cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 660~663
- 江 楠, 杜 飞, 白 然等. 影响柱形微腔回音壁模式激光抽运阈值能量的因素 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 660~663
- 13 Han Deyu, Pu Xiaoyun, Jiang Nan *et al.*. Polarization properties of an evanescent-wave pumped whispering gallery mode fibre laser [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(21): 3259~3264
- 韩德昱, 普小云, 江 楠等. 消逝波激励的 WGM 光纤激光偏振特性研究[J]. *科学通报*, 2009, **54**(21): 3259~3264
- 14 C. C. Lam, P. T. Leung, K. Yang. Explicit asymptotic formulas for the positions, widths, and its characterization [J]. *J. Opt. Soc. of Am. B*, 1992, **9**(9): 1585~1592
- 15 Wang Donglin, Jiang Nan, Jiang Liqun *et al.*. The precise assignment of whispering gallery modes for lasing spectra emitting from cylindrical micro-cavities [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(12): 2749~2753
- 王东林, 江 楠, 姜利群等. 柱形微腔回音壁激光光谱模式的精确标定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(12): 2749~2753
- 16 P. W. Barber, S. C. Hill. Light Scattering by Particles Computational Methods [M]. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1990