

回音壁模式光纤激光器的激光偏振特性研究

冯 黎 张远宪 普小云

(云南大学物理科学技术学院物理系, 云南 昆明 650091)

摘要 研究了消逝波激励的回音壁模式光纤激光器的激光偏振特性。实验结果表明,在抽运光以偏斜光线方式沿光纤的近轴向抽运时,回音壁模式光纤激光辐射中既存在横电(TE)波又存在横磁(TM)波;对径向模式数和角模式数相同的回音壁模式,TE模式和TM模式之间的波长差随光纤直径的减少而单调地增加,随增益包层溶液折射率的增加而单调地减小。根据消逝波激励的回音壁模式光纤激光器的激励机制,结合圆柱型微腔中确定回音壁模式共振位置的解析渐近公式,成功地解释了观察到的实验结果。

关键词 激光器;光纤激光器;消逝波抽运;回音壁模式;激光偏振特性

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.s102009

Study on Polarization Properties of Whispering Gallery Mode Fiber Laser

Feng Li Zhang Yuanxian Pu Xiaoyun

(Department of Physics, College of Physics Science and Technology, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China)

Abstract The polarization properties of whispering gallery mode (WGM) fiber laser pumped by evanescent waves are studied. Both transverse electric (TE) wave and transverse magnetic (TM) wave exist on condition that pump beams transmit in a bared optical fiber in skew way, additionally for the same number of radial mode order and angular mode number, the wavelength difference between TE and TM waves monotonely increases with fiber diameter decreasing, and monotonely decreases with the refractive index of cladding solution increasing. The observed experimental results, on the basis of excitation mechanics of evanescent wave pumped WGM fiber laser in combination with the analytic asymptotic formula, validate the theoretical value very well.

Key words lasers; fiber laser; evanescent wave pump; whispering gallery mode; laser polarization properties

OCIS codes 140.3510; 140.3430; 140.3945; 140.3290

1 引 言

消逝波增益耦合的圆柱形微腔激光器存在两种基本的抽运方式,即沿圆柱腔侧向^[1,2]的光抽运方式和沿轴向^[3~5]的光抽运方式。对于侧向光抽运方式,抽运光须经过外层介质的吸收后才能够激励处于微腔回音壁模式(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轴向的光抽运方式,抽运光在光纤界面外的消逝场激励染料分子产生增益,处于圆柱形微腔(光纤)WGM消逝场内的激光增益能有效地耦合到腔内,并在WGM的支持下形成激光振荡。激光增益由抽运光在微腔外的消逝场激励产生,增益场与微腔

WGM的消逝场之间有空间重叠性好的特点^[6],能够提高消逝波增益耦合圆形微腔的抽运效率,并显著地增加圆柱型微腔轴向的增益场长度^[7,8]。因此,采用轴向消逝波光抽运的微腔激光器近年来受到微腔及光纤激光研究者的关注,在非线性光学、腔体量子电动力学、微米量级物体探测器(如生物病原体探测)、多波段激光辐射、超低阈值的微腔受激辐射放大过程研究等领域中得到应用^[9,10]。本文报道的偏振激光可以通过确定不同模式的间距来确定光纤的直径。在先前的实验中发现^[11],采用沿石英裸光纤轴向的光抽运方式,当抽运光以子午光线方式在光纤中传播时,WGM光纤激光辐射只存在横电(TE)波;当抽运光以偏斜光线方式沿光纤的近轴向

收稿日期: 2011-07-30; **收到修改稿日期:** 2011-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(60877037, 11164033)、云南省应用基础研究基金(2011FA006)和云南省高校科技创新团队支持计划资助课题。

作者简介: 冯黎(1987-),男,硕士研究生,主要从事光学及光子学方面的理论和实验研究。E-mail: cumtfl@126.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工作。E-mail: xypu@163.com (通信联系人)

抽运时,激光辐射既存在 TE 波又存横磁(TM)波。本文实验结果表明,TE 波和 TM 波之间的波长差随着光纤直径的减少而单调地增加,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 光纤激光器的激励机制,结合圆柱型微腔中确定 WGM 共振位置的解析渐近公式,成功地计算并解释了观察到的实验结果。

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 355 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 的折射率为 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° ,抽运光在光纤中以图 1 所示的偏斜光线方式传播。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 4×10^{-3} mol/L 的罗丹明 6G 水、乙醇以及乙二醇混合溶液,混合溶液的折射率低于光纤 F_1 的折射率,用作 F_1 的包层溶液。包层溶液的折射率用 2WA-J 型阿贝折射计测得(测量精度为 ± 0.0002)。抽运光在包层溶液中的消逝场 E_p 激励染料在 F_1 周围产生增益场,圆柱形微腔(由光纤 F_1 的任意横截面构成)WGM 消逝场 E_{WGM} 中的光

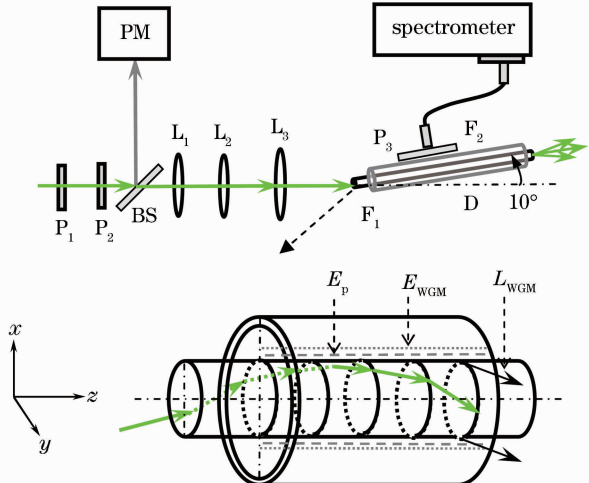


图 1 实验系统设置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

子在增益场中产生受激辐射,并在 WGM 的支持下形成激光振荡。WGM 激光的光能 L_{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 用于判断 WGM 激光辐射的偏振状态,当 P_3 的通光方向与 F_1 平行时,获得 TM 波;当 P_3 的通光方向与 F_1 垂直时,获得 TE 波。采取两种实验方法分别定量地研究了回音壁模式光纤激光辐射的偏振特性,即: 1) 固定包层溶液的折射率,改变光纤的直径;2) 固定光纤的直径,改变包层溶液的折射率。

3 实验结果及讨论

3.1 WGM 激光辐射的偏振状态检测

在图 1 所示的偏斜光线抽运条件下,取 F_1 的直径为 $92.0 \mu\text{m}$,包层溶液的折射率为 1.386。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

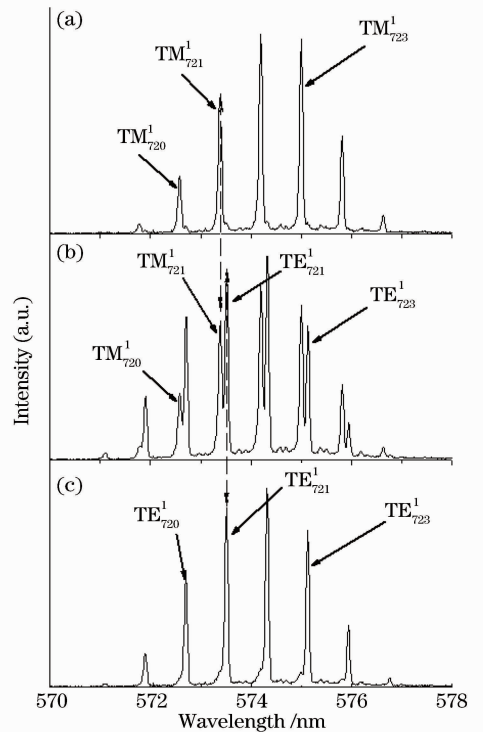


图 2 偏斜光抽运下的激光光谱图。(a) P_3 平行于 F_1 时的光谱图; (b) 移开 F_1 时的光谱图; (c) P_3 垂直于 F_1 时的光谱图

Fig. 2 Typical TE wave and TM wave spectra splitted from mixed spectrum. (a) Spectrum of P_3 parallel to F_1 ; (b) spectrum of no analyzer checked; (c) spectrum of P_3 vertical to F_1

图 2(b) 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 的通光方向旋转到平行于 F_1 的纤轴方向后, 采集到的 TE 波 WGM 激光光谱如图 2(a) 所示, 在图 2(b) 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(b) 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。为了定量地研究 TE 和 TM 模式之间的波长差值, 必需对采集到的激光光谱做模式标定。

3.2 激光光谱的模式确定

圆柱形微腔中 WGM 的共振位置满足如下解析渐近公式^[12]

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

式中 a 为圆柱形微腔腔体半径, $\lambda_{l,n}$ 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率(取 $n_1 = 1.458$; 对于 TM 波, $P = n_1/n_2 = m$, 对于 TE 波, $P = n_2/n_1 = 1/m$; a_l 为艾里函数的根, 艾里函数前两个根的数值分别为 $a_1 = 2.338107$, $a_2 = 4.087949$ 。由(1)式可知, 圆柱形微腔中的 WGM 可以由两个模式数(l, n)完整地标定。本文采用如下标记方式: 对径向模式数和角模式数分别为 l 和 n 的 TM 波, 标记为 $TM_{l,n}^1$; 对 TE 波, 标记为 $TE_{l,n}^1$ 。

3.3 相邻 TE 与 TM 波之间的间距变化

用(1)式对图 2(b) 所示的激光光谱进行模式标定, 发现最相邻的一对 TE 与 TM 模式拥有共同的模式数(l, n) = (1, 721)。模式标定的结果如图 2(b) 中的数字对所示, 可以看出, 谱线左侧为 TM 模, 右侧为 TE 模。为了定量地研究 TE 和 TM 模式之间波长间距的变化规律, 设计了如下两个实验。

3.3.1 波长间距和光纤直径的关系

实验中, 分别配制了浓度为 4×10^{-3} mol/L 的罗丹明 6G 乙醇以及乙二醇母液, 通过改变两种母液的体积比的方法获得所需的包层溶液折射率, 其准确数值由阿贝折射仪测得。实验选用包层溶液的折射率

为 $n_2 = 1.386$, 石英裸光纤的直径分别为 92.0、110.1、147.2、192.6 和 252.0 μm , 所采集的激光光谱如图 3 所示。用(1)式对图 3 的激光光谱作了模式标定, 标定结果已经表示在图 3 中。从图 3(a) 可见, 当光纤的直径为 250 μm 时 TE 与 TM 模之间模式间距小于 0.05 nm, 所用光谱仪无法分辨; 图 3(b)~(e) 分别对应光纤的直径为 192.6、147.2、110.1 和 92.0 μm , 其相应的 TE 与 TM 模式间的波长平均间距 $\Delta\lambda$ 分别为 0.084、0.135、0.150 和 0.162 nm(对应的波数差值 $\delta\nu$ 分别为 3.019、4.085、4.655 和 4.932 cm^{-1})。上述数据表明, 相同模式数的 TE 与 TM 模之间的波长间距随着光纤直径的减小而单调增加。

3.3.2 波长间距和包层溶液折射率的关系

固定光纤的直径为 97.3 μm , 配制了浓度为 4×10^{-3} mol/L 的罗丹明 6G 水溶液, 结合相同染料浓度的乙醇以及乙二醇母液, 获得折射率分别为 1.354、1.364、1.376、1.386 和 1.395 的混合染料溶液。

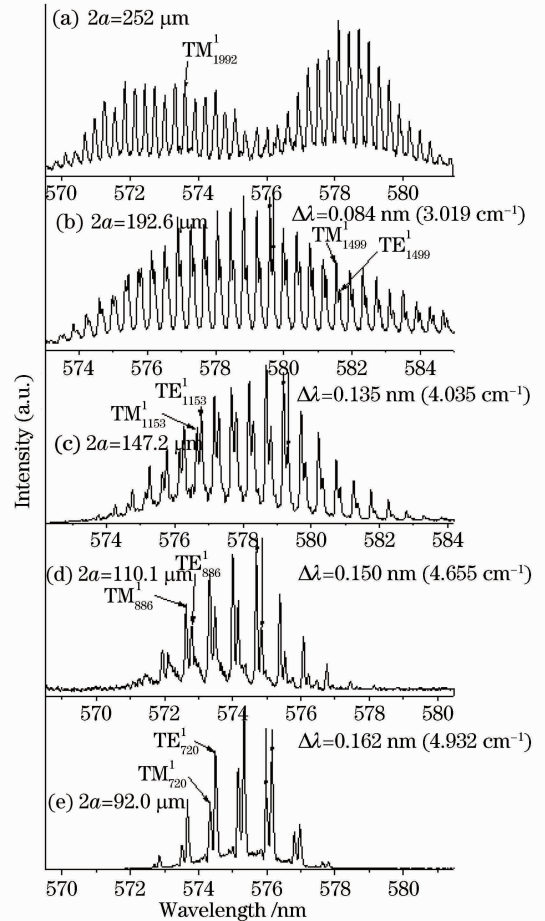


图 3 TE 与 TM 模式波长间距随光纤直径变化的光谱图。包层溶液的折射率 $n_2 = 1.386$

Fig. 3 Typical interval behavior for varying fiber diameter, where the refractive index of cladding solution is 1.386

图 4(a)~(e)对应包层溶液的折射率分别为 1.354、1.364、1.376、1.386 和 1.395 时的 WGM 激光光谱图,用(1)式对图 4 的激光光谱作了模式标定,标定结果已经表示在图 4 中。图 4(a)~(e)相应的 TE 与 TM 模式间的波长平均间距 $\Delta\lambda$ 分别为 0.231,0.213,0.191,0.176 和 0.143 nm(对应的平均波数差值 $\delta\nu$ 分别为 7.203,6.239,5.954,5.269 和 4.404 cm^{-1})。上述数据表明,相同模式数的 TE 与 TM 模之间的波长

间距随着包层溶液折射率的增加而单调减少。

3.4 相邻 TE 与 TM 模模式间距的理论分析

由(1)式,选取相同的角模式数 n ,可得 TE 与 TM 模间距 $\delta\nu$ 是圆柱腔半径 a 和包层溶液折射率 n_2 的函数,并满足

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

式中 λ_n^{TE} 、 λ_n^{TM} 分别表示角模式数为 n 时 TE 与 TM 模式的波长值。由(2)式可以看出,当包层溶液的折射率固定时,(2)式中 n_1 、 n_2 均为常数,(2)式可以简化为

$$\delta\nu(a) = K_1 \frac{1}{a} + K_2 \frac{n^{-2/3}}{a}, \quad (3)$$

其中

$$K_1 = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{2\pi n_1^2},$$

$$K_2 = \frac{2^{-1/3} a_l (n_1^6 - 3n_1^4 n_2^2 + 2n_2^6)}{6\pi (n_1^2 - n_2^2)^{3/2} n_1^4}$$

均为已知常数,根据所采得的谱线可知模式数 n 是一个比较大的数,故 $n^{-2/3}$ 的计算值与 K_2 值相比便是一个很小的数值,现给出 3 组数据作为参考:当 $n=500$ 时, $n^{-2/3}=0.012448$;当 $n=1000$ 时, $n^{-2/3}=0.01$;当 $n=1500$ 时, $n^{-2/3}=0.007631$ 。由以上分析可以看出 TE 与 TM 模间的模间距主要由光纤直径决定。表 1 给出了不同直径所对应的实验平均间距与理论计算间距的对比数据,从表中可以看出,除光纤直径为 92.0 μm 的相对误差稍大(10.8%)外,其余数据都吻合得较好。用(3)式成功地解释了实验结果。但当光纤的直径为 252.0 μm 时,由于光栅光谱仪的光谱分辨率为 0.05 nm,而经过计算得出的 TE 与 TM 的模间间距为 0.023 nm,故无法区分 TE 与 TM 模。由于(1)式给出的是圆柱形微腔中 WGM 的共振位置的解析渐近公式,其有限项截断必然导致实验结果与理论结果的偏差。

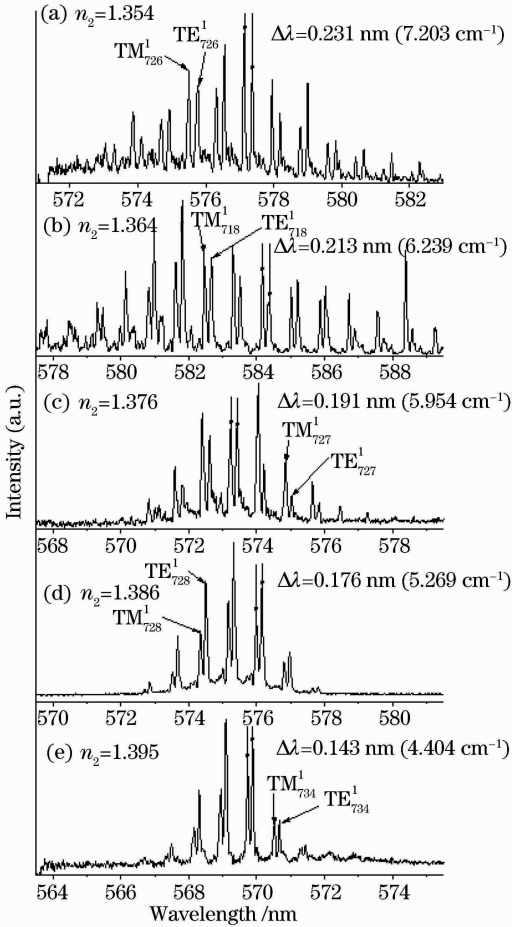


图 4 TE 与 TM 模的波长间距随包层溶液折射率变化的光谱图。光纤直径 $D=97.3 \mu\text{m}$

Fig. 4 Typical interval behavior for varying cladding refractive index, where the fiber diameter is 97.3 μm

表 1 不同直径时的计算模间距与实验平均模间距

Table 1 Calculated and theoretical mean model interval with different diameters

Fiber diameter / μm	Theoretical interval / cm^{-1}	Experimental mean interval / cm^{-1}	Relative error / %
252.0	2.18	<2.00	null
192.6	2.99	2.96	1.00
147.2	3.78	4.10	8.47
110.0	4.64	4.82	3.88
92.0	5.55	4.95	10.81

当光纤的直径固定时,TE 模与 TM 模的模间距公式可以简化为

$$\delta\nu(n_2) = K_3 (n_1 - n_2)^{1/2}, \quad (4)$$

其中 $K_3=1/(2\pi a n_1^2)$ 为已知常数, $n_1=1.458$ 为光

纤的折射率。(4)式表明,当包层溶液的折射率增大时,TE与TM模之间的模间距随包层溶液的折射率的增大而变小。表2给出了不同包层溶液所对应的实验平均模间距与理论模间距的对比数据,从表

中可以看出,除包层溶液折射率 $n_2 = 1.364$ 的相对误差稍大(10.32%)外,其余数据都能较好地吻合。用(4)式成功地解释了实验结果。

表2 不同包层溶液折射率时计算的模间距与实验平均模间距

Table 2 Calculated and theoretical mean model interval with the refractive index of cladding solution

Refractive index of cladding solution n_2	Calculated mean model interval / cm^{-1}	Experimental mean model interval / cm^{-1}	Relative error / %
1.354	7.07	6.88	2.69
1.364	6.59	5.91	10.32
1.376	5.92	6.14	3.72
1.386	5.31	4.94	6.97
1.395	4.73	4.39	7.22

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;随着光纤直径的增加,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光纤激光器的激励机制,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. Chough, K. An. Cylindrical microcavity laser based on the evanescent-wave-coupled gain[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(15): 3161~3164
- 2 J. D. Suter, W. Lee, D. J. Howard *et al.*. Demonstration of the coupling of optofluidic ring resonator lasers with liquid waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(17): 2997~2999
- 3 A. Shevchenko, K. Lindfors, S. C. Buchter *et al.*. Evanescent-wave pumped cylindrical microcavity laser with intense output radiation[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **245**(1): 349~353
- 4 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**(23): 233501

- 5 Jiang Nan, Wang Dongling, 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
- 6 X. Y. Pu, N. Jiang, D. Y. Han *et al.*. Linearly polarized three-colour lasing emission from an evanescent wave pumped and gain coupled fiber laser[J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19**(5): 054207
- 7 Zhu Kun, Zhou Li, You Honghai *et al.*. The study on the produced length of whispering-gallery-mode fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(5): 054205
- 祝昆,周丽,尤洪海等. 光纤回音壁模式激光产生长度的实验与理论研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(5): 054205
- 8 Jiang Nan, Pu Xiaoyun, You Honghai *et al.*. Tricolor lasing emission from an evanescent wave pumped and gain coupled fiber laser[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2011, **41**(8): 924~931
- 江楠,普小云,尤洪海等. 消逝波激励及增益耦合光纤三色激光辐射[J]. *中国科学:物理学,力学,天文学*, 2011, **41**(8): 924~931
- 9 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): 928~931
- 10 Y. Wu, X. Yang. Quantum theory for micro-cavity enhancement of second harmonic generation[J]. *J. Phys. B*, 2001, **34**(11): 2281~2288
- 11 D. Y. Han, X. Y. Pu, N. Jiang *et al.*. Polarization properties of an evanescent-wave pumped whispering gallery mode fiber laser[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(7): 567~572
- 12 C. C. Lam, P. T. Leung, K. Young. Explicit asymptotic for the position, widths, and strengths of resonances in Mie scattering[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(9): 1585~1592

栏目编辑:宋梅梅