

文章编号: 0258-7025(2009)03-0691-04

包层介质折射率引起的回音壁模式光纤激光波长漂移

张远宪 韩德昱 祝 昆 江 楠 普小云

(云南大学物理系, 云南 昆明 650091)

摘要 将直径为 $93\ \mu\text{m}$ 的石英光纤浸入低折射率的若丹明 6G 乙醇和乙二醇混合溶液中, 采用沿光纤轴向光抽运消逝波激励染料增益的方式, 研究回音壁模式(WGM)激光辐射的波长随染料混合溶液折射率变化的特性。实验发现, 随染料混合溶液折射率的增加, 回音壁模式激光辐射的波长向短波方向移动。用回音壁模式染料激光的四能级模型得到激光上能级和所有能级上的分子数比值 $\gamma(\lambda)$ 曲线后, 很好地解释了实验结果。

关键词 光纤激光器; 波长漂移; 回音壁模式; 增益介质折射率

中图分类号 TN248.3⁺3; O433.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0691

Wavelength Shift of Whispering-Gallery-Mode Fiber Laser Caused by Fiber Cladding Refractive Index

Zhang Yuanxian Han Deyu Zhu Kun Jiang Nan Pu Xiaoyun

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

Abstract Quartz fiber with diameter of $93\ \mu\text{m}$ is immersed into a low refractive index solution, which is mixed with ethanol and ethylene glycol doped by rhodamine 6G dye molecules. Pumped by evanescent-wave along the fiber axis, the lasing wavelength of whispering gallery mode (WGM) is found blue-shifting with the refractive index of dye solution increasing. The experimental observations are well explained by the $\gamma(\lambda)$ curve, which is deduced from the four-energy level model of dye lasing from a WGM fiber laser and calculated by the ratio of molecular density for the upper and total lasing energy levels.

Key words fiber laser; wavelength shift; whispering gallery mode; refractive index of gain medium

1 引言

微米尺寸的光学微腔, 由于其极高的 Q 值(可达到 10^9)的回音壁模式(WGM)和极小的模体积特性^[1,2], 在非线性光学、腔体量子电动力学、超低阈值的微腔受激辐射放大过程研究等领域独具优势^[3~5]。采用侧向光抽运的消逝波增益耦合微腔激光^[6], 由于实现了微腔腔体和增益介质的分离, 受到光学微腔研究人员的高度重视^[6~13]。为提高抽运效率, 把侧向光抽运改造为沿毛细管管壁^[11]或光纤纤轴^[12~14]的消逝波光抽运, 由此, 将 WGM 激光的抽运阈值能量从侧向光抽运的 $200\ \mu\text{J}$ 降低到了轴

向光抽运的 $10\ \mu\text{J}$ 左右。采用沿轴向光抽运的消逝波激励增益方式, 光纤“增益包层”溶液的折射率影响着光纤内 WGM 的光子隧穿到光纤外“增益包层”中的效率, 从而决定了微腔 WGM 的品质因数。光纤“增益包层”溶液折射率的改变, 将引起微腔 WGM 的品质因数变化, 进而导致 WGM 激光辐射波长的漂移。

本文主要报道了将直径为 $93\ \mu\text{m}$ 的石英光纤分别浸入低折射率的若丹明 6G 乙醇和乙二醇混合溶液中, 从实验上研究了 WGM 光纤激光辐射波长随染料溶液折射率的变化规律; 由 WGM 染料激光

收稿日期: 2008-10-18; 收到修改稿日期: 2008-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(60877037, 10564005)和云南省应用基础研究基金(2006A0001M)资助项目。

作者简介: 张远宪(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电子学方面的实验和理论研究。

E-mail: 1200601252@mail.ynu.edu.cn

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)

的四能级模型得到激光上能级和所有能级上的分子数比值 $\gamma(\lambda)$ 曲线,用 $\gamma(\lambda)$ 曲线随“增益包层”溶液折射率的变化规律,很好地解释了实验结果。

2 实 验

图 1 所示为实验装置图, Y, Z 方向和光学平台台面重合, X 方向垂直于光学平台台面, 抽运光沿 Z 方向传播。用倍频 YAG 激光器的脉冲激光(脉宽为 7 ns, 波长为 532 nm)作为抽运光。抽运光依次经过偏振片 P_1 和 P_2 , 固定 P_2 偏振方向限制抽运光偏振方向, 旋转 P_1 获得需要的抽运能量。在光路中放置分束片 BS, 以便由激光能量计 PM(MELLES GRIOT, 13PEM001)测出即时抽运能量。透镜 L_1 和 L_2 构成光学缩束系统, 使抽运光能量更集中, 缩束后的光斑直径约为 1.5 mm。抽运光经透镜 L_3 会聚后以 $\theta_i = 1.2^\circ$ 的圆锥角沿轴线进入单一折射率石英光纤 F_1 , 焦点距石英光纤前端面约为 3 mm。在光纤外面套了一根内径相对较大(约几个毫米)的玻璃套管 D。在二者之间空隙处, 注入若丹明 6G 乙醇和乙二醇混合溶液。由折射定律可以求出, 按石英光纤及乙醇和乙二醇混合溶液的折射率分别为 1.458 和 1.41 计算, 抽运光进入光纤端面的圆锥角只需小于 $\theta_c = 31.7^\circ$, 耦合进入光纤管壁内的抽运激光在光纤管壁内以全反射方式向前传播。抽运光在染料溶液中的消逝场 E_p 激励染料产生增益, 圆柱形微腔 WGM 消逝场 E_{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_{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。偏振片 P_3 在光学平台台面方向 (YZ 面), 通过偏振片 P_3 观察发光光纤, 判断所激发出的 WGMs 是 TE 波还是 TM 波。

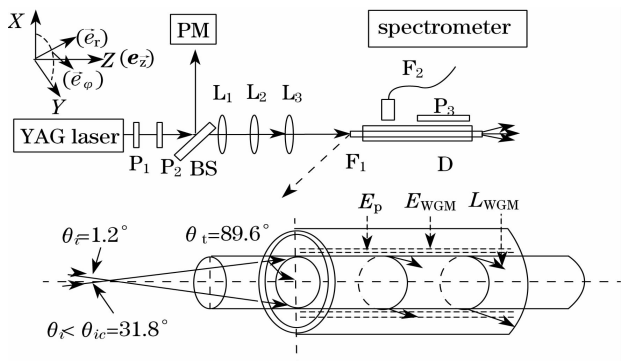


图 1 实验系统设置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

3 实验结果及讨论

3.1 WGM 激光辐射的波长漂移及光谱模式标定

在图 1 所示的玻璃套管 D 内注入浓度为 4×10^{-3} mol/L 的若丹明 6G 乙醇和乙二醇混合溶液。采用沿石英光纤 F_1 (直径为 $93 \mu\text{m}$) 轴向光抽运方式, 抽运能量较低时, 只能在光纤外的染料区观察到暗黄色的荧光辐射。当抽运能量增加到一定数值后, 沿石英光纤的边缘出现耀眼的橙黄光。用肉眼沿垂直于纤轴方向 ($X-Y$ 平面) 观察, 此橙黄光的强度最大; 偏离纤轴的垂向后, 强度急剧减弱, 沿纤轴方向不能观察到橙黄光。可见, 此耀眼橙黄光的辐射具有圆柱形微腔 WGM 激光辐射的方向性特征。此外, 用检偏器 P_3 检查 WGM 激光辐射的偏振性, 发现激光辐射的光电场矢量方向垂直于光纤轴向, 属于典型的横电波 (TE 波) 激光辐射。

用 2400 g/mm 的光栅采集到“增益包层”溶液的折射率 n_2 分别为 1.363, 1.386, 1.403 和 1.409 的 WGM 激光光谱如图 2 所示。由图可见: 随“增益包层”溶液折射率 n_2 的增加, WGM 激光辐射的波长向短波方向移动, 同时谱线不断变宽。

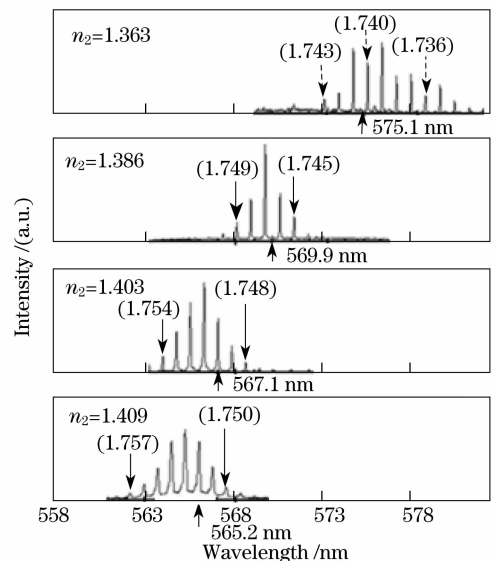


图 2 WGM 激光波长随增益包层溶液折射率变化的光谱图

Fig. 2 WGM spectra varied with refractive index of mixed solution

图 2 中激光谱线分别对应 WGM 中径向模式 (radial mode order) 数相同的一系列角模式 (angular mode number) 数^[15,16]。用圆柱形微腔中 TE 波 WGM 的共振位置满足的解析近似公式^[16], 对图 2 所示的每一条激光谱线做了模式标定。此解析近似公式为

$$\frac{2\pi a n_1}{\lambda_n^l} = n + 2^{-1/3} a_l n^{1/3} - \frac{n_2^2}{n_1(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}} + \frac{3}{10} 2^{-2/3} a_l^2 n^{-1/3} + 0^{-2/3}, \quad (1)$$

式中 λ_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; a_l 为艾里函数的根, 艾里函数头两个根的数值分别为: $a_1 = 2.338107$, $a_2 = 4.087949$ 。取柱腔直径 $2a = 93 \mu\text{m}$, 柱腔折射率 $n_1 = 1.458$, 包层溶液折射率 n_2 分别为 1.363, 1.386, 1.403 和 1.409, 以图 2 中的实验激光光谱波长为数据, 用(1)式对 l 和 n 两个模式数作拟合分析, 得到图 2 中各条激光波长的准确 WGM 数, 拟合波长和实验波长之间的差值小于 0.03 nm。图 2 中括号内的两个数字分别表示 l 和 n 的数值, 并记为 (l, n) 。标定结果说明, 图 2 中的激光谱线属于径向模式数 $l = 1$ 的一系列角模式数 n 不相同的 WGM 激光光谱。激光谱线对应的微腔模式精确标定, 对 WGM 的品质因素 Q_{leak} 值计算极其重要。

3.2 微腔品质因素 Q_{leak} 值的计算

对于圆柱形微腔, Q_{leak} 是由光子隧穿 (photon tunneling)^[17] 造成的光能泄露对应的 Q 值, 圆柱形微腔 TE 模式的 Q_{leak} 可由解析近似公式^[18] 表示为

$$Q_{\text{leak}}(\text{TE}) = \frac{1}{4} \pi (n_1^2 - n_2^2) x_{l,n}^2 |H_n^{(1)}(n_2 x_{l,n})|^2 \cdot \left\{ \left(\frac{n}{n_1 x_{l,n}} \right)^2 + \left[\frac{Y_n'(n_2 x_{l,n})}{Y_n(n_2 x_{l,n})} \right]^2 \right\}, \quad (2)$$

式中 $x_{l,n} = 2\pi a / \lambda_{l,n}$ 为微腔的尺寸参数 (size parameter); $\lambda_{l,n}$ 为 WGM 的共振波长; $H_n^{(1)}(n_2 x_{l,n})$ 和 $Y_n(n_2 x_{l,n})$ 分别为第二类 and 第三类 Bessel 函数。对直径为 $2a = 93 \mu\text{m}$ 的圆柱形微腔, 由 (l, n) 取 $(1, 750)$ 计算出的 $Q_{\text{leak}}(\text{TE})$ 如图 3 所示。

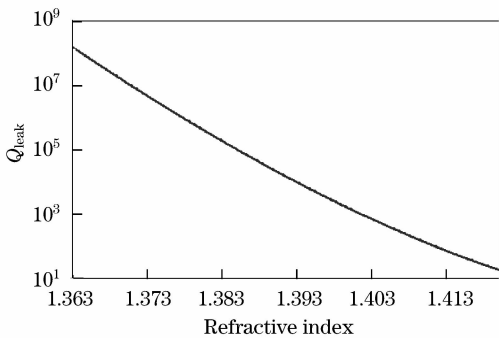


图 3 Q_{leak} 随增益包层折射率的变化曲线

Fig. 3 Q_{leak} varied with cladding refractive index

由图 3 可见, $Q_{\text{leak}}(\text{TE})$ 随“增益包层”溶液的折

射率 n_2 的增加而急剧地减小, 表示由光子隧穿造成的光能损耗随 n_2 的增加而显著地增大。

3.3 WGM 激光辐射波长漂移的理论解释

为了解释由“增益包层”溶液折射率 n_2 的变化引起的激光光谱波长漂移现象, 引入激光阈值条件对应的 $\gamma(\lambda)$ 曲线, $\gamma(\lambda)$ 定义为染料激光上能级和所有能级上的分子数之比, 其值满足^[13]

$$\gamma(\lambda) = \frac{2\pi n_1}{\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda)} + \sigma_a(\lambda), \quad (3)$$

式中 N_l 表示溶液的激光染料浓度, $n_1 = 1.458$ 表示腔体折射率, $\sigma_e(\lambda)$ 表示染料分子的受激辐射截面, $\sigma_a(\lambda)$ 表示染料分子的受激吸收截面。 $\sigma_e(\lambda)$ 满足^[18]

$$\sigma_e(\lambda) = \frac{g(\lambda)\lambda^4}{8\pi c \tau n_1^2}, \quad (4)$$

其中 $g(\lambda)$ 为线型函数, 由染料的荧光辐射曲线归一化后得到; c 为真空中的光速; τ 为染料分子的自发辐射寿命, 对若丹明 6 G, $\tau = 4.2 \times 10^{-9}$ s。 $\sigma_a(\lambda)$ 满足^[19]

$$\sigma_a(\lambda) = \alpha(\lambda) / N_l, \quad (5)$$

式中 $\alpha(\lambda)$ 为染料溶液的吸收系数 (单位是 cm^{-1}), 用紫外可见分光光度计 (SHIMADZU, UV-2401PC) 测量得到。

在(3)式中, 只有 Q_{leak} 与 n_2 的变化有关, 将 $\sigma_e(\lambda)$ 和 $\sigma_a(\lambda)$ 的实验数据以及按(2)式计算的 Q 值代入(3)式, 得到“增益包层”溶液的折射率为 1.363, 1.386, 1.403 和 1.409 所对应的 $\gamma(\lambda)$ 曲线族如图 4 所示。

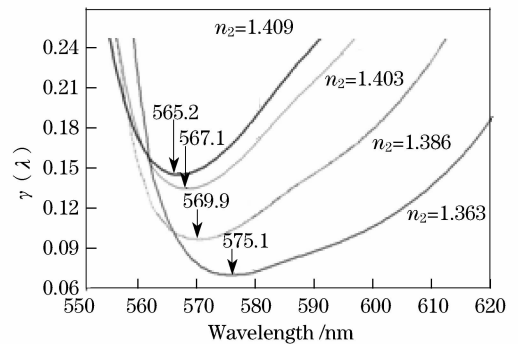


图 4 不同包层溶液折射率所对应的 $\gamma(\lambda)$ 曲线

Fig. 4 $\gamma(\lambda)$ curve varied with different refractive index

由图 4 可见不同“增益包层”溶液折射率对应的 $\gamma(\lambda)$ 曲线都存在一个最小值 $\gamma_{\text{min}}(\lambda_c)$, 与此 $\gamma_{\text{min}}(\lambda_c)$ 值对应的波长就是产生 WGM 激光振荡的最佳波长, 记为 λ_c 。对 $n_2 = 1.363, 1.386, 1.403$ 和 1.409 ,

计算得出 $\lambda_c = 575.1 \text{ nm}, 569.9 \text{ nm}, 567.1 \text{ nm}$ 和 565.2 nm 。各个计算出的 λ_c 值已用箭头“ \uparrow ”标志于实验激光光谱曲线图 2 中。由图 2 可见,各 λ_c 值基本对应激光光谱范围的中央位置;随着“增益包层”溶液折射率的增加, $\gamma(\lambda)$ 曲线中 λ_c 数值不断变小,表示产生 WGM 激光振荡的最佳波长向短波方向移动。 $\gamma(\lambda)$ 曲线随“增益包层”溶液折射率变化的两个特点,圆满地解释了实验激光光谱(图 2)的辐射特性。

4 结 论

消逝波激励的 WGM 激光器波长随“增益包层”溶液折射率变化的实验结果表明:随“增益包层”溶液折射率的增加,由光子隧穿造成的光能损耗随 n_2 的增加而显著地增大,导致产生 WGM 激光振荡的波长向短波方向移动。引入激光阈值条件对应的 $\gamma(\lambda)$ 曲线后,很好地解释了实验结果。以上发现为消逝波激励增益的 WGM 光纤激光器的深入研究提供了很好的实验和理论基础。

参 考 文 献

- 1 D. W. Verbooy, A. Furusawa, N. Ph. Georgiades *et al.*. Cavity QED with high-Q whispering gallery modes[J]. *Phys. Rev. A.*, 1998, **57**(4): 2293~2296
- 2 Yang Yuede, Huang Yongzhen, Chen Qin. Whispering-gallery modes in three-dimensional microcylinders[J]. *Phys. Rev. A.*, 2007, **75**(1): 013817
- 3 Władysław Z. Aakowicz. Whispering-gallery-mode resonances: A new way to accelerate charged particles[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(11): 114801
- 4 J. R. Buck, H. J. Kimble. Optimal sizes of dielectric microspheres for cavity QED with strong coupling[J]. *Phys. Rev. A.*, 2003, **67**(3): 033806
- 5 Kartik Srinivasan, Oskar Painter. Mode coupling and cavity-quantum-dot interactions in a fiber-coupled microdisk cavity[J]. *Phys. Rev. A.*, 2007, **75**(2): 023814
- 6 HeeJong Moon, YoungTak Chough, Kyungwon An. Cylindrical microcavity laser based on the evanescent-wave-coupled gain[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(15): 3161~3164
- 7 HeeJong Moon, YoungTak Chough, 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
- 8 HeeJong Moon, CunWoo Park, SangBum Lee *et al.*. Waveguide mode lasing via evanescent-wave-coupled gain from a thin cylindrical shell resonator[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(22): 4547~4550
- 9 A. Shevchenko, K. Lindfors, S. C. Buchter *et al.*. Evanescent-wave pumped cylindrical microcavity laser with intense output radiation[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **245**: 349~353
- 10 S. I. Shopova, H. Y. Zhou, X. D. Fan. Optofluidic ring resonator dye laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**: 221101
- 11 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廊模激光辐射[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 920~923
- 12 Pu Xiaoyun, Bai Ran, Xiang Wenli *et al.*. Two-wavelength-range whispering-gallery mode fibre laser with gain pumped by evanescent wave[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, to be published
普小云,白然,向文丽等.消逝波激励的双波段光纤回音壁模式激光辐射[J]. *物理学报*, 2009, 已录用
- 13 Xiang Wenli, Pu Xiaoyun, Bai Ran *et al.*. Evanescent wave pumped whispering-gallery-mode fibre laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2359~2364
向文丽,普小云,白然等.轴向隐失波激励的回音壁模式光纤激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2359~2364
- 14 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.影响柱形微腔回音廊模激光抽运阈值能量的因素[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 660~663
- 15 P. W. Barber, S. C. Hill. Light Scattering by Particles: Computational Methods[M]. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1990
- 16 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
- 17 R. R. Johnson. Theory of morphology-dependent resonance: shape resonance and width formulas[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1993, **10**(2): 343~352
- 18 C. C. Lam, P. T. Leung, K. Yang. Explicit asymptotic formulas for the positions, widths, and its characterization[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1992, **9**(9): 1585~1592
- 19 Li Fuli. Advanced Laser Physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 8~11
李福利. 高等激光物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006, 8~11