

文章编号: 0253-2239(2008)12-2359-06

轴向隐失波激励的回音壁模式光纤激光器

向文丽 普小云 白 然 张远宪 江 楠

(云南大学物理科学技术学院物理系, 云南 昆明 650091)

摘要 采用轴向隐失波激励增益的方式,使激光增益区域局限在光纤回音壁模式的模场区域内,显著地降低了回音壁模式光纤激光辐射的抽运阈值,由此形成一种低阈值的回音壁模式光纤激光器。在微焦耳量级的低抽运能量条件下,用回音壁模式光纤激光器研究了激光染料的浓度效应。实验结果表明,随着激光染料浓度的增加,回音壁模式激光辐射的波长向长波方向移动,激光波长范围变宽。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。低抽运阈值的回音壁模式光纤激光器,为研究液体激光现象提供了极为便利的手段。

关键词 光纤激光器; 回音壁模式; 隐失波激励; 波长红移; 四能级激光模型

中图分类号 TN253; TN243; TN248.3⁺3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2359

Longitudinal Evanescent-Wave Pumped Whispering-Gallery-Mode Fibre Laser

Xiang Wenli Pu Xiaoyun Bai Ran Zhang Yuanxian Jiang Nan

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

Abstract A new kind of low threshold optical fiber laser has been fabricated by immersing a fused silica optical fiber into a low refractive index dye solution. Pumped by evanescent wave along the fiber axis, dye gain is confined in the evanescent field of whispering gallery mode (WGM) of the fiber, which leads to a low pumping threshold for lasing emission. The concentration effects in liquid dye lasing emission have been studied via a WGM fibre laser under the pumping energy of 50 μJ . The results show that with the increase of rhodamine 6G dye concentration in ethanol alcohol, lasing wavelength is red shifted and lasing wavelength range is widened. The experimental observations are well explained by the $\gamma(\lambda)$ curve, a ratio of molecular density for the upper and total lasing energy levels, which is deduced from the four-energy level model of dye lasing from a WGM fibre laser. The low threshold optical fiber laser provides a convenient way to study liquid dye lasing phenomenon.

Key words fibre laser; whispering gallery mode; evanescent wave pump; wavelength red shift; four-level laser model

1 引 言

隐失波增益耦合的微腔激光器^[1],由于实现了微腔腔体和增益介质的分离,近年来受到光学微腔研究人员的高度重视^[1~4]。这种微腔激光器通常采用侧向光抽运方式,腔外染料介质的增益通过微腔回音壁模式(Whispering gallery mode, WGM)的隐失场耦合进入腔内,并在 WGM 的支持下形成激光

振荡。采用侧向光抽运方式,抽运光须经过外层染料吸收后才能激发处于微腔 WGM 隐失场内的染料分子,隐失场外的染料分子徒然损耗了抽运光能量,增加了产生 WGM 激光的抽运阈值。为提高抽运效率,我们把侧向光抽运改造为沿石英毛细管管壁的近轴向隐失波光抽运^[5,6],由此,将 WGM 激光的抽运阈值从侧向光抽运方式的 200 μJ 降低到了

收稿日期: 2008-04-07; **收到修改稿日期**: 2008-06-03

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

作者简介: 向文丽(1982-),女,硕士研究生,主要从事光纤中的回音壁模式激光现象等方面的研究。

E-mail: wenlix1@126.com

导师简介: 普小云(1957-),男,教授,博士生导师,主要从事光学微腔中的线性和非线性光学现象等方面的研究。

E-mail: xypu@163.com(通信联系人)

近轴向光抽运方式的 $9.5 \mu\text{J}$ 。采用近轴向的隐失波光抽运方式,抽运光在圆柱形微腔界面外的隐失场激励产生染料增益,由于染料的增益分布和微腔 WGM 的隐失场在空间理想重叠,染料介质的增益能有效率地耦合到微腔的 WGM 中,从而显著地降低了 WGM 激光的抽运阈值。本文报道了如下两个方面的研究工作:1)用单一折射率的石英光纤代替石英毛细管^[5],采用轴向隐失波光抽运方式在光纤中产生 WGM 激光辐射,由此形成一种低阈值的 WGM 光纤激光器;2)在微焦耳量级的低抽运能量条件下,用 WGM 光纤激光器研究激光染料的浓度效应。

2 实验安排

实验装置如图 1 所示。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 的脉冲激光作为抽运光。抽运光经一线偏振片 P_1 起偏后,再经过另一线偏振片 P_2 , P_2 的偏振方向垂直于光学平台台面(Y-Z 面)。旋转 P_1 的偏振方向,来

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。抽运光由一块焦距为 75 mm 的透镜 L 会聚在光纤端面前,并以 $\theta_1 = 7.6^\circ$ 的圆锥角沿轴线进入直径为 $280.5 \mu\text{m}$ 的单一折射率石英光纤 F_1 。光纤 F_1 插入玻璃套管 D 中,玻璃套管中盛装罗丹明 6G 激光染料的乙醇溶液。按石英光纤和乙醇溶液的折射率分别取 $n_1 = 1.458$ 和 $n_2 = 1.36$ 计算,抽运光进入光纤端面的圆锥角只需小于 $\theta_c = 31.7^\circ$,光线进入 D 后以全反射方式传播。抽运光在乙醇溶液中的隐失场 E_P 激励染料产生增益,圆柱形微腔 WGM 的隐失场 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^[1],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 X-Y 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。

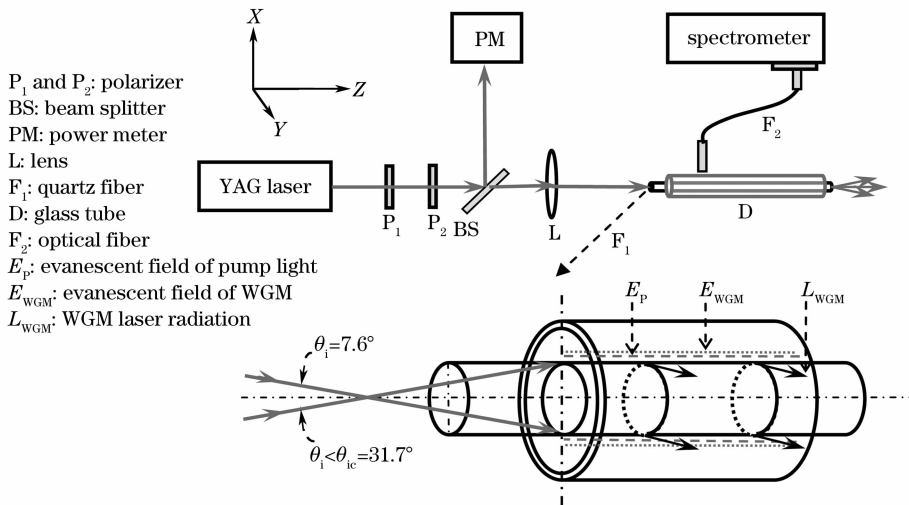


图 1 实验系统设置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

3 实验结果及其讨论

3.1 低抽运阈值的 WGM 激光辐射及模式标定

在玻璃套管 D 内装入浓度为 $8 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 的罗丹明 6G 乙醇溶液。采用隐失波轴向抽运方式,抽运能量很低时,只能在石英光纤外的染料区观察到淡黄色的荧光辐射。当抽运能量增加到一定的数值后,沿石英光纤的边沿出现炫目的橙黄光。用肉眼沿垂直于光纤轴的方向(X-Y 平面)观察,此橙黄

光的强度最大;偏离光纤轴的垂直方向,强度急剧减弱,沿光纤轴向不能观察到此橙黄光。可见,此炫目橙黄光的辐射具有圆柱形微腔 WGM 激光辐射的方向性特征。

图 2 中右上角的插图是辐射强度和抽运能量的关系曲线,由插图可见,当抽运能量超过 $5.5 \mu\text{J}$ 时,辐射强度明显地增加。 $5.5 \mu\text{J}$ 的抽运能量就是此 WGM 光纤激光器的阈值能量,对应肉眼刚刚观察到“炫目橙黄光”时的抽运能量值。此外,用检偏器

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 TE 波

激光辐射(关于轴向隐失波激励条件下 WGM 激光辐射的偏振状态,我们将另文讨论)。

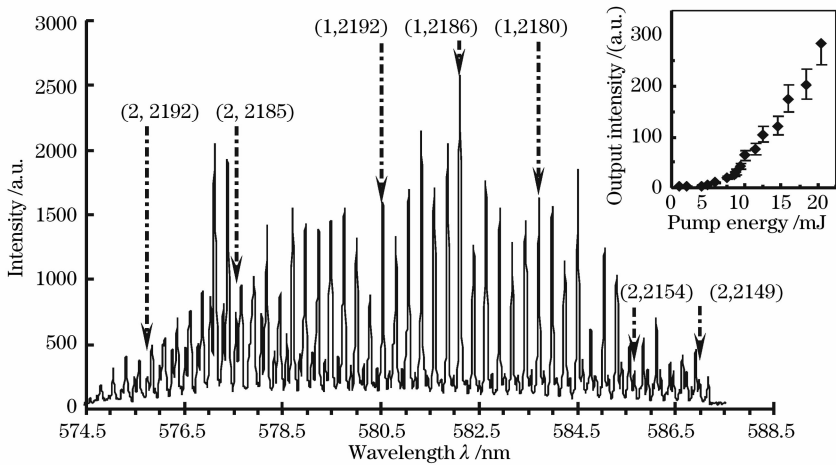


图 2 中等分辨率激光光谱图。右上角的插图是光辐射强度和抽运能量的关系曲线;括号中的数字表示标定后的激光谱线模式

Fig. 2 Lasing spectrum with medium spectral resolution, the numbers in the brackets indicate the assigned WGMs;

inset is the output intensity versus input energy

用 2400 g/mm 的光栅采集到的中等分辨率激光光谱如图 2 所示。光谱由强度不同的两组基本等间距的谱线组构成,强、弱谱线组包络线的峰值波长分别位于 ~ 581 nm 和 ~ 577 nm 位置。两组激光谱线分别对应 WGM 中径向模式数(Radial mode order)不同的一系列角模式数(Angular mode number)^[7,8]。用柱形微腔中 TE 波 WGM 的共振位置满足的解析近似公式^[9,11],对图 2 所示的每一条激光谱线作了模式标定。此解析近似公式如下:

$$\frac{2\pi a n_1}{\lambda_n^l} = n + 2^{-1/3} a_1 n^{1/3} - \frac{n_2^2}{n_1 (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}} + \frac{3}{10} 2^{-2/3} a_2^2 n^{-1/3} + o^{-2/3}. \quad (1)$$

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_1 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 $a = 280.5 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.458$, $n_2 = 1.36$,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 模式数,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 中强、弱两组激光谱线分别属于径向模式数 $l=1$ 和 2 的一系列角模式数 n 不同的 WGMs。激光谱线对应的微腔模式的精确标定,对 WGM 的场分布和品质因数(Q 值)的计算极其重要。

3.2 WGM 染料激光的浓度效应

用无水酒精(含量 99.5%)配制了浓度不同的罗

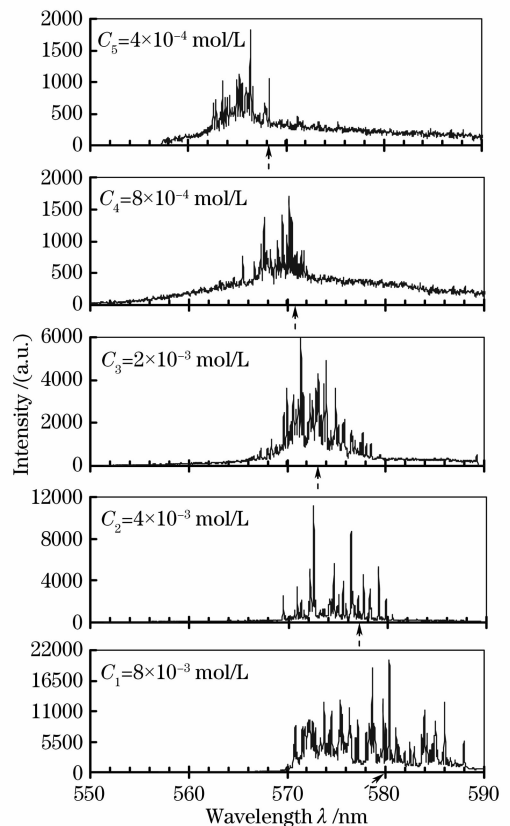


图 3 不同浓度的罗丹明 6G 激光辐射光谱

Fig. 3 Lasing spectra with various concentrations of rhodamine 6G dye in ethanol solution

丹明 6G 乙醇溶液,浓度分别是 $C = 4 \times 10^{-4}$ mol/L、 8×10^{-4} mol/L、 2×10^{-3} mol/L、 4×10^{-3} mol/L 和 8×10^{-3} mol/L。采用轴向隐失波光抽运方式,在 50 μJ 的抽运能量条件下,用 1200 g/mm 的光栅采

集到的低分辨率 WGM 激光光谱如图 3 所示。

图 3 的激光光谱表明:由轴向隐失波激励产生的液体染料 WGM 激光辐射,具有法布里-珀罗腔中液体染料激光辐射的一般特性^[12],即:随着激光染料浓度的增加,1)激光辐射的波长范围向长波方向移动;2)激光辐射的波长范围加宽;3)激光辐射的强度增加。但是,利用轴向隐失波抽运能量阈值低($\sim 5 \times 10^{-6}$ J)、抽运光的隐失场激励增益(非焦点式直接激励)和染料溶液需要量极少(测量一个浓度约需要 0.08 ml)等特性,可以在微焦耳量级的抽运能量条件下,无需循环染料溶液地实现激光振荡,这是用 WGM 光纤激光器研究液体激光染料浓度效应的一个显著优势。

3.3 染料激光浓度效应的理论解释

为了解释由吸收剂引起的微液滴中的激光光谱波长漂移现象^[13],Mazumuder 等人用染料激光的四能级模型,建立了一种确定激光最佳波长位置的计算方法。采用类似方法,我们计算了 WGM 的最佳激光波长随染料浓度变化的关系曲线,计算结果和实验测量值作了比较。

设 N_1 和 N_0 分别是染料分子第一电子激发单重态和基态的分子浓度(单位是 cm^{-3}), $N_t \approx N_1 + N_0$ 是染料分子的总浓度; $\sigma_e(\lambda)$ 和 $\sigma_a(\lambda)$ 分别是染料分子的受激辐射和吸收截面(单位是 cm^2)。在仅考虑受激吸收和光能泄漏 $\alpha_{\text{leak}}(\lambda)$ (单位是 cm^{-1})两种损耗的条件下,染料激光产生必须满足如下条件:

$$N_1 \sigma_e(\lambda) \geq N_0 \sigma_a(\lambda) + \alpha_{\text{leak}}(\lambda), \quad (2)$$

WGM 激光器的光能泄漏损耗可唯象地表示^[13]为

$$\alpha_{\text{leak}}(\lambda) = 2\pi m_r / (\lambda Q_0), \quad (3)$$

式中 m_r 和 Q_0 分别是微腔的折射率和某一 WGM 由光能泄漏对应的 Q 值。定义第一单重态上的分子浓度和总浓度的比值为 $\gamma(\lambda) = N_1 / N_t$, 由(2)式、(3)式联立可得激光阈值条件对应的 $\gamma(\lambda)$ 值满足

$$\gamma(\lambda) = \frac{2\pi m_r / (\lambda Q_0 N_t) + \sigma_a(\lambda)}{\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda)}. \quad (4)$$

受激辐射截面 $\sigma_e(\lambda)$ 满足^[14]

$$\sigma_e(\lambda) = g(\lambda) \lambda^4 / (8\pi c \tau m_r^2), \quad (5)$$

式中 $g(\lambda)$ 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,对罗丹明 6G, $\tau = 4.2 \times 10^{-9}$ s。罗丹明 6G 乙醇溶液的受激辐射截面如图 4 中的细实线所示。

受激吸收截面 $\sigma_a(\lambda)$ 满足

$$\sigma_a(\lambda) = \alpha(\lambda) / N_t, \quad (6)$$

式中 $\alpha(\lambda)$ 是染料溶液的吸收系数(单位是 cm^{-1}),用

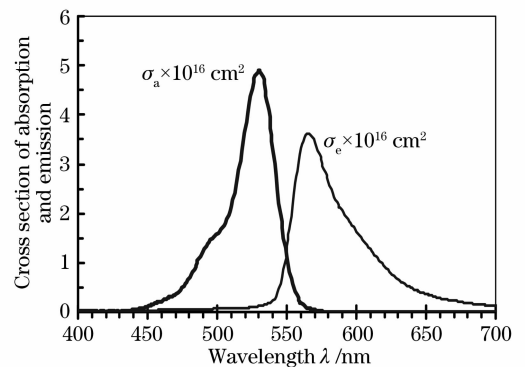


图 4 罗丹明 6G 的受激辐射和吸收截面图

Fig. 4 Cross sections of stimulated emission and absorption for rhodamine 6G dye in ethanol solution

紫外可见分光光度计(SHIMADZU, UV-2401PC)测量得到。受激吸收截面如图 4 中的粗实线所示。为计算 $\gamma(\lambda)$ 曲线,用图 2 中一阶谱线($l=1$)的波长除以半峰全宽(FWHM)估算对应 WGM 的 Q 值, $Q = \lambda / \Delta\lambda \sim 1.5 \times 10^4$ 。不同染料浓度条件下,由(4)式确定的 $\gamma(\lambda)$ 值随波长变化的曲线簇如图 5 所示。

由图 5 可见,1)不同染料浓度对应的 $\gamma(\lambda)$ 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

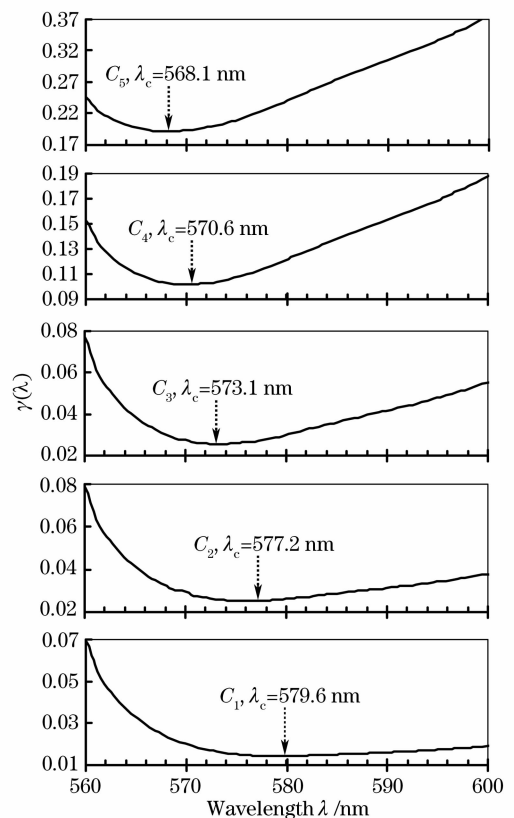


图 5 罗丹明 6G 的 $\gamma(\lambda)$ 曲线图

Fig. 5 Calculated $\gamma(\lambda)$ curves of Rhodamine 6G dye with various dye concentrations

波长就是产生 WGM 激光振荡的最佳波长, 记为 λ_c 。对 $C = 8 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、 $4 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、 $2 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、 $8 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 和 $4 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$, 计算得出 $\lambda_c = 579.6 \text{ nm}$ 、 577.2 nm 、 573.1 nm 、 570.6 nm 和 568.1 nm 。各个计算出的 λ_c 值已用箭头“↑”标志于实验激光光谱曲线图 3 中, 由图 3 可见, 各 λ_c 值基本对应激光光谱范围的中央位置。2) 随着染料浓度的增加, $\gamma(\lambda)$ 曲线在 λ_c 邻域的变化趋于平缓, 表示除波长 λ_c 外, λ_c 邻域的其他波长也可能产生激光辐射, 激光辐射的波长范围变宽。3) 随着染料浓度的增加, $\gamma(\lambda)$ 曲线在 λ_c 邻域的数值逐渐减小, 表示在相同的抽运能量条件下, 较大的染料浓度对应于较强的激光辐射强度。 $\gamma(\lambda)$ 曲线随染料浓度变化的如上三个特点, 分别圆满地解释了实验激光光谱(图 3)的三个辐射特性。

3.4 圆柱形微腔 WGM 的 Q 值判断

从(4)式可以看出, 在染料浓度 N_i 取定值条件下改变 Q 值等效于在 Q 取定值条件下改变 N_i 值, 二者都会使染料 WGM 激光辐射的最佳波长 λ_c 产生移动。由此性质结合实验光谱图可以判断微腔 WGM 的 Q 值。取 N_i 对应的染料分子浓度 $C = 8 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ (同图 2 的实验条件), 当柱形微腔取不同的 Q 值时得到一组对应的 $\gamma(\lambda)$ 曲线簇, 每一条 $\gamma(\lambda)$ 曲线都存在一个最小值 $\gamma_{\min}(\lambda_c)$, 由此获得的 $Q \sim \lambda_c$ 曲线如图 6 所示。

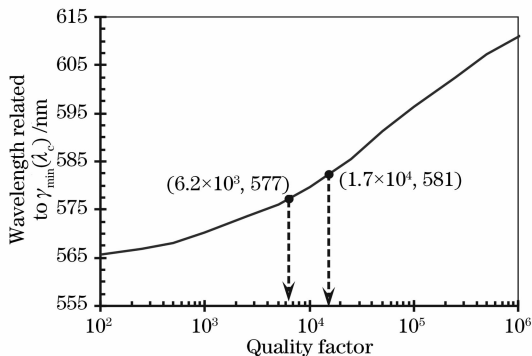


图 6 罗丹明 6G 的最佳激光波长 $\lambda_c \sim Q$ 曲线图

Fig. 6 Calculated optimum wavelength $\lambda_c \sim Q$ curves of rhodamine 6G dye for a fixed dye concentration and various Q values

由图 6 可以看出, 和图 2 中强谱线组包络线的峰值波长(即最佳激光波长) $\lambda_c = 581 \text{ nm}$ 对应的一阶 WGM 的品质因素 $Q_{l=1} = 1.7 \times 10^4$, 此值和由 $Q = \lambda / \Delta\lambda$ 估算的数值 1.5×10^4 非常接近, 说明用 $\gamma(\lambda)$ 曲线判断微腔 WGM Q 值的方法是可行的。由于图 2 中的二阶弱谱线紧邻一阶谱线, 不方便

$Q = \lambda / \Delta\lambda$ 的方法估算二阶 WGM 的 Q 值。采用 $\gamma(\lambda)$ 曲线判断方法, 得出和图 2 中弱谱线组包络线的峰值波长 $\lambda_c = 577 \text{ nm}$ 对应的二阶 WGM 的品质因素 $Q_{l=2} = 6.2 \times 10^3$ 。对球形和圆柱形光学微腔, 高阶径向模式中的光子在微腔界面外的隧穿深度大于低阶径向模式^[15], 由此造成的光能损耗使得二阶径向模式的 Q 值必然低于一阶径向模式。可见, 用 $\gamma(\lambda)$ 曲线判断微腔 Q 值得到的结果是完全合理的。

4 结 论

采用轴向隐失波激励增益的方式, 可以使激光增益区域局限在光纤回音壁模式的模场区域内, 由此显著地降低了回音壁模式光纤激光辐射的抽运阈值, 并形成一种低阈值的回音壁模式光纤激光器。在 $50 \mu\text{J}$ 的低抽运能量条件下, 用回音壁模式光纤激光器研究了激光染料的浓度效应, 实验结果表明, 随激光染料浓度的增加, 回音壁模式激光辐射的波长向长波方向移动; 波长范围变宽; 激光辐射的强度增加。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阈值分子数比值 $\gamma(\lambda)$ 曲线后, 很好地解释了实验结果。 $\gamma(\lambda)$ 曲线的引入也为判断微腔 WGM 的 Q 值提供了一种有效的方法。

参 考 文 献

- 1 H. J. Moon, Y. T. Chough, K. W. An. Cylindrical microcavity laser based on the evanescent-wave-coupled gain[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(15): 3161~3164
- 2 H. J. Moon, Y. T. Chough, J. 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
- 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 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
- 5 Jiang Nan, Wang Donglin, Pu Xiaoyun. Whispering-gallery-mode laser of evanescent wave exciting and coupling dye gain in a cylindrical micro-cavity [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(7): 920~923
- 江楠, 王东林, 普小云. 隐失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 Jiang Nan, Du Fei, Bei Ran *et al.*. Factor of influencing pumping threshold energy of whispering-gallery-mode laser in a cylindrical micro-cavity[J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, **35**(5): 660~663
- 江楠, 杜飞, 白然等. 影响柱形微腔口哨模激光抽运阈值能量的因素研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 660~663
- 7 P. W. Barber, S. C. Hill. *Light Scattering by Particle: Computational Methods* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1990. 25~77
- 8 Dong Chunhua, Xiao Yunfeng, Yang Yong *et al.*. Directly mapping whispering gallery modes in a microsphere through

- modal coupling and directional emission[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 300~302
- 9 C. C. Lam, P. Y. Leung, K. Yang. Explicit asymptotic formulas for the positions, widths, and strengths of resonances in Mie scattering[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(9): 1585~1592
- 10 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, 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
- 11 Zhang Lei, Lin Guopin, Cai Zhipin *et al.*. Structural resonances in absorption spectrum of quartz microsphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 94~97 张磊,林国平,蔡志平等. 石英玻璃微球吸收光谱上的结构共振[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 94~97
- 12 F. P. Schöfer. *Dye Lasers* [M]. edited by F. P. Schöfer, Springer-Verlag Berlin, 1973. 1~85
- 13 M. M. Mazumder, G. Chen, K. R. Chang. Wavelength shifts of dye lasing in microdroplets; Effect of absorption change[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **15**(8): 878~880
- 14 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
- 15 S. Arnold. Microspheres, photonic atoms, and the physics of nothing[J]. *American Scientist*, 2001, **89**(2): 214~221

2008 年度“大珩杯”《中国激光》优秀论文名单

论 文 题 名	作 者	发表时间
光子晶体光纤非线性光学研究新进展	王清月; 胡明列; 柴路	2006
短脉冲在色散平坦光纤中传输前后波形、相位和啁啾测量的实验研究	刘山亮; 郑宏军	2006
毫米波副载波光纤通信技术的研究进展	方祖捷; 叶青; 刘峰等	2006
两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出	何兵; 楼祺洪; 周军等	2006
激光推进自由飞行实验	郑义军; 谭荣清; 张阔海等	2006
基于等效相移光栅的光码分多址编/解码实验	燕萌; 姚敏玉; 张洪明等	2006
用于激光核聚变的玻璃	姜中宏	2006
超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)	彭翰生	2006
车载直接探测多普勒测风激光雷达光学鉴频器	刘继桥; 卜令兵; 周军等	2006
激光二极管双端面抽运 Tm:Ho:GdVO ₄ 2 μm 激光器	王月珠; 贺万骏; 姚宝权等	2006