

偏斜光线抽运下的回音壁模式 光纤激光辐射特性*

张远宪 冯永利 周 丽 普小云[†]

(云南大学物理系, 昆明 650091)

(2009 年 6 月 16 日收到; 2009 年 6 月 26 日收到修改稿)

研究了偏斜光线抽运下的回音壁模式光纤激光辐射特性. 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, 回音壁模式的光纤激光辐射中, 既存在光电矢量和光纤径向垂直的横电波 (TE), 也存在光电矢量和光纤径向平行的横磁波 (TM); 随增益包层染料溶液折射率的增加, 径向模式数和角模式数相同的 TE 波和 TM 波之间的波长差单调减小, 回音壁模式激光辐射的中心波长向短波方向移动, 辐射的波长范围变窄. 用回音壁模式激光的辐射理论结合激光染料的四能级模型, 满意地解释了实验结果.

关键词: 光纤激光器, 回音壁模式, 中心波长漂移, TE 和 TM 波的波长差

PACC: 4255N, 4255M, 4260D

1. 引 言

微米尺寸的圆形光学微腔, 通常指线度约 $5\ \mu\text{m}$ 到 $500\ \mu\text{m}$ 之间的球形^[1] 和圆柱形介质微腔^[2]. 圆形光学微腔的特性来源于其独特的回音壁模式 (whispering gallery mode, WGM): 光波在微腔内表面不断进行全反射, 从而被束缚在腔内, 绕行的光波频率满足一定频率匹配条件时发生干涉相长, 进而在微腔内形成稳定的场分布, 这种稳定的场分布模式就是回音壁模式. 在回音壁模式中, 光波电磁场的一部分以消逝波 (evanescent wave) 的形式逸出腔外, 在紧挨腔表面的近场形成消逝场. WGM 支持下的圆柱形微腔具有较高的品质因素和较小的模体积特性^[3,4], 在非线性光学、腔体量子电动力学、折射率精密测量、高灵敏度运动传感器、加速度传感器、微米量级物体探测器 (如生物病原体探测)、超低阈值的微腔受激辐射放大过程研究等领域独具优势^[5-14].

采用侧向光抽运的消逝波增益耦合方式构成的圆柱形微腔激光器^[15], 由于实现了微腔腔体与增

益介质的分离, 受到光学微腔研究人员的高度重视. 为提高抽运效率, 可以把侧向光抽运改造为沿毛细管管壁^[16] 或光纤纤轴^[17,18] 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 $200\ \mu\text{J}$ ^[15] 降低到轴向光抽运的 $12\ \mu\text{J}$ ^[17] 左右. 采用沿光纤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 WGM 光纤激光的偏振性质. 我们在先前的实验中发现^[19], 当抽运光以子午光线方式在光纤中传播时, WGM 激光只存在 TE 波; 当抽运光以偏斜光线方式沿光纤的近轴向抽运时, WGM 激光同时存在 TE 波和 TM 波的回音壁模式激光辐射. 本文报道了偏斜光线抽运条件下, WGM 光纤激光辐射的中心波长, 以及 TE 和 TM 波之间的波长差和增益包层溶液折射率的依赖关系. 实验发现: 随增益包层染料溶液折射率的增加, 回音壁模式激光辐射的中心波长向短波方向移动, 辐射的波长范围变窄; TE 波和 TM 波之间的波长间隔单调减小. 用回音壁模式激光的辐射理论结合激光染料的四能级模型, 很好地解释了如上实验结果.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60877037) 资助的课题.

[†] 通信联系人. E-mail: xyphu@163.com

2. 实验安排

图 1 所示为实验系统装置图. 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. 抽运光经焦距等于 75 mm 的透镜 L_3 会聚后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 $195 \pm 1 \mu\text{m}$ (德国蔡司 10096 型读数显微镜测量值) 和 1.458 (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^[19]沿纤轴传播. 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 $3 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 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). 以全反射方式在光纤中传播的抽运光在混合溶液(起增益包层介质作用)中的消逝场 E_p 激励染料分子产生增益, 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. 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. 偏斜光线抽运条件下的激光光谱

在图 1 所示的偏斜光线^[19]抽运下, 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基本消失; 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完全消失. 图 2 的实验结果表明, 在偏斜光线抽运条件下由消逝波激励产生的 WGM 激光辐

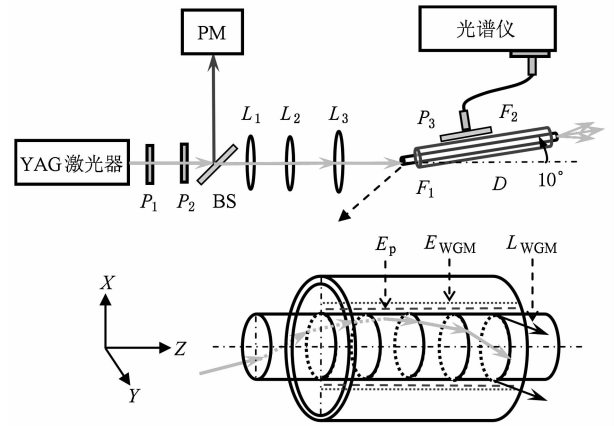


图 1 实验系统设置 (P_1 , P_2 和 P_3 : 偏振片; BS: 分束片; PM: 激光能量计; L_1 , L_2 和 L_3 : 透镜; F_1 : 石英光纤; D : 玻璃套管; F_2 : 导光光纤; E_p : 抽运光的消逝场; E_{WGM} : WGM 的消逝场; L_{WGM} : WGM 激光辐射)

射, 是一种 TE 波和 TM 波共存的混合偏振激光辐射.

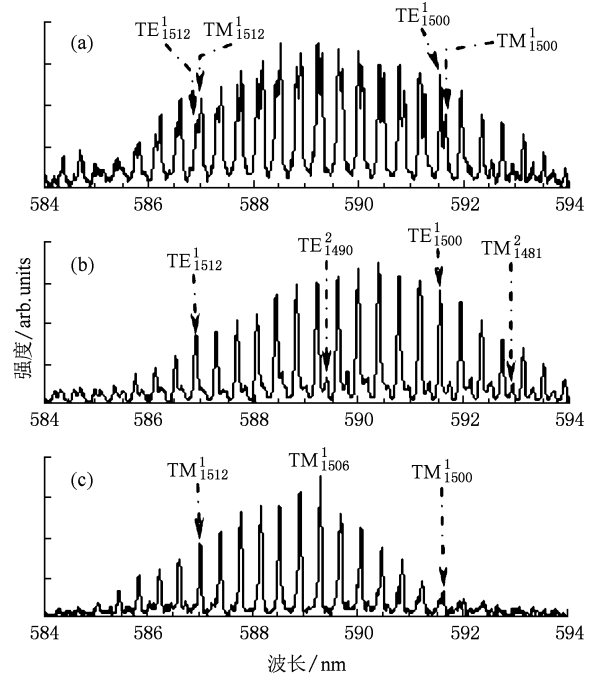


图 2 偏斜光线抽运下的 WGM 激光光谱 (a) TE 和 TM 波混合偏振激光辐射谱; (b) TE 波激光辐射谱; (c) TM 波激光辐射谱

3.1. 激光光谱的模式标定

圆柱形微腔中 WGM 的共振位置满足如下解析渐近公式^[21]:

$$\begin{aligned}
& m \frac{2\pi a n_2}{\lambda_n^l} \\
= & n + 2^{-1/3} a_1 n^{1/3} - \frac{P}{(m^2 - 1)^{1/2}} + \frac{3}{10} 2^{-2/3} a_2^2 n^{-1/3} \\
& - \frac{2^{-1/3} P (m^2 - 2P^2/3)}{(m^2 - 1)^{3/2}} a_1 n^{-2/3} \\
& + O(n^{-1}). \quad (1)
\end{aligned}$$

式中, a 为圆柱形微腔腔体半径(取 $a = 97.5 \mu\text{m}$); 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; n_1 和 n_2 分别为腔体和腔外介质的折射率(取 $n_1 = 1.458, n_2 = 1.395$); $m = n_1/n_2$; 对 TM 波, $P = n_1/n_2 = m$; 对 TE 波, $P = n_2/n_1 = 1/m$; a_1 为爱里函数(Airy function)的根, 爱里函数头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 可以由三个模式数 (P, l, n) 完全地标定. 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_n^l ; 对 TE 波, 标记为 TE_n^l . 以图 2 中的实验激光光谱波长为数据, 用(1)式对 P, l 和 n 三个 WGM 模式数作拟合分析, 得到图 2 中各条激光谱线精确的 WGM 模式数, 拟合波长和实验波长之间的偏差值小于 0.05 nm . 模式标定的结果说明: 偏斜光线抽运条件下采集到的激光光谱图 2(a), 波长较短的一组属于 TE 波, 波长较长的一组属于 TM 波, 两组谱线拥有相同的径向模式数 ($l = 1$) 和角模式数 (n).

3.2. 混合偏振激光的形成

当抽运光偏离光纤的轴向时, 在光纤的进光端面建立如图 3(a) 所示的直角坐标系, 其中, xy 平面平行于光纤的进光端面, z 轴沿光纤的纤轴. 抽运光在光纤中以偏斜光线方式沿 z 轴方向传播. 任取波矢为 \mathbf{k} 的一段传播光束进行分析, 波矢 \mathbf{k} 可以分解为沿 xy 平面上的波矢 \mathbf{k}_{xy} 和沿 z 轴方向的波矢 \mathbf{k}_z . 波矢 \mathbf{k}_z 表示沿纤轴传播的光束, 波矢 \mathbf{k}_{xy} 表示被界面反射后在光纤圆截面内传播的光束, 如图 3(b) 所示. 波矢 \mathbf{k}_{xy} 与光纤界面法线的夹角为 θ , 在光纤界面上发生全反射对应的角度为 $\theta_c = \text{Asin}(n_2/n_1)$, 当 $\theta \geq \theta_c$ 时, 波矢 \mathbf{k}_{xy} 表示的光束在 xy 平面上光纤的圆截面内以全反射方式传播, 其在光纤内同时存在平行(用“ \cdot ”表示)和垂直(用“ \downarrow ”表示)于纤轴方向的光电矢量, 如图 3(b) 所示. 全反射时, \mathbf{k}_{xy} 表示的光束在光纤界面外的消逝场也同时存在平行和垂直于纤轴方向的光电矢量. 与抽运光以子午光线形式进入光纤的情况^[19](消逝场中缺乏平行于纤轴

方向的光电矢量)不同, 处于抽运光消逝场中的染料分子同时受到平行和垂直于纤轴方向的光电场激励, 必然同时产生沿 z 轴方向偏振以及沿 z 轴的垂直方向偏振的受激辐射光子. 经过 WGM 的消逝场将增益耦合到微腔中后形成的激光振荡以及激光辐射, 自然同时含有沿 z 轴偏振的光电矢量(TM 波)和沿 z 轴的垂直方向偏振的光电矢量(TE 波), 是一种 TE 和 TM 波共存的混合偏振 WGM 激光辐射.

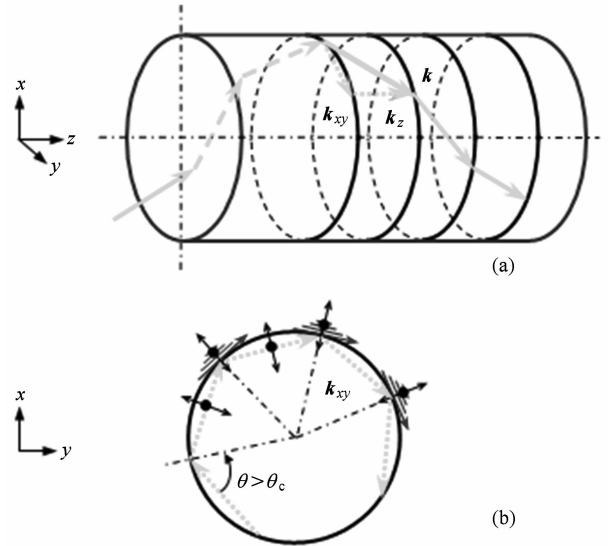


图3 径向和轴向混合偏振激光产生的示意图 (a) 近轴向抽运条件下, 偏斜光线在光纤中的传播图示; (b) 抽运光在光纤圆截面 (xy 平面) 上的偏振状态图示

4. WGM 激光谱线随包层溶液折射率的变化

4.1. 实验结果

分别配制了浓度为 $3 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 的罗丹明 6 G 乙醇和乙二醇染料母液, 用改变两种母液体积比的方法获得一系列染料浓度一定, 折射率不同的增益包层混合溶液, 溶液的折射率 n_2 用阿贝折射计测量得出. 在图 1 所示的玻璃套管 D 内注入混合溶液, 插入直径为 $195 \mu\text{m}$ 的石英裸光纤, 除去检偏片 P_3 后用 2400 g/mm 的光栅采集激光光谱. 采用沿光纤近轴向抽运消逝波激励增益的方式, 当混合溶液的折射率 n_2 分别为 $1.383, 1.395, 1.403, 1.419$ 和 1.430 时采集到的 WGM 激光光谱如图 4(局部) 和图 5(整体) 所示.

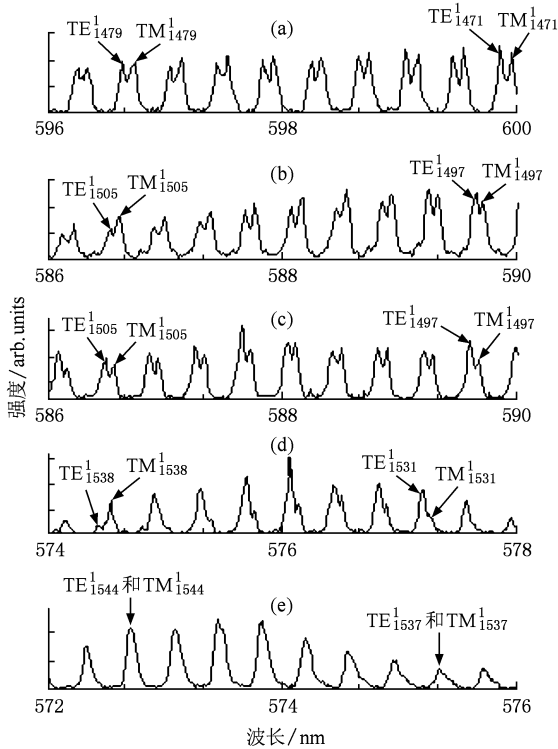


图4 TE和TM模式之间的波长差随增益包层溶液折射率变化的光谱图 (a)–(e)对应包层溶液的折射率分别为1.383, 1.395, 1.403, 1.419和1.430时的WGM激光光谱)

波之间的波长差单调减小,回音壁模式激光辐射的中心波长向短波方向移动,激光辐射的波长范围变窄.

4.2. 波长差随溶液折射率变化的理论解释

为了解释由 n_2 的变化引起的TE和TM波之间的波长差发生改变的现象,由(1)式得到 l 和 n 值相同的TE波和TM波之间的波长差 $\delta\lambda(n_2)$ 满足如下近似关系:

$$\begin{aligned} \delta\lambda(n_2) &= \lambda_n^{l=1}(\text{TM}) - \lambda_n^{l=1}(\text{TE}) \\ &\approx \frac{\lambda^2}{2\pi a n_1^2} \left[\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2^{-1/3} a_1 n^{-2/3} (n_1^6 - 3n_1^4 n_2^2 + 2n_2^6)}{3(n_1^2 - n_2^2)^{3/2} n_1^2} \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

取 $a = 97.5 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.458$.由(2)式计算出图4所示的WGM激光谱线中TE和TM波之间在572—600 nm内的理论平均波长差.理论计算平均波长差、实验测量在572—600 nm内的平均波长差和二者的相对偏差分别列于表1中的第二、第三和第四列.

表1 TE和TM波之间的理论计算和实验测量波长差

包层溶液 折射率 n_2	理论平均 值/nm	实验平均 值/nm	相对偏差 /%
1.430	0.047	不可分辨	
1.419	0.065	0.071	9.2
1.403	0.090	0.082	8.8
1.395	0.097	0.090	7.2
1.383	0.114	0.103	9.6

由表1可见,随包层溶液折射率的增加,径向模式数和角模式数相同的TE和TM波之间的理论波长差单调地减小,波长差的理论计算值和实验测量值之间相对误差小于10%,理论计算值和实验测量值基本符合.对 $n_2 = 1.430$, $\delta\lambda$ (计算值) = 0.047 nm,小于所用光谱仪的波长分辨极限值(0.05 nm),故图4和图5中的TE和TM模式不能够被分辨.

4.3. 辐射波长随溶液折射率漂移的理论解释

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: cm^{-3}), $N_t = N_1 + N_0$ 是染料分子的总浓度; $\sigma_a(\lambda)$ 和 $\sigma_e(\lambda)$ 分别是罗丹明6G染料分子的受激吸收和受激辐射截面(单位是: cm^2),其值由文献[22]的实验值确定.对于圆柱

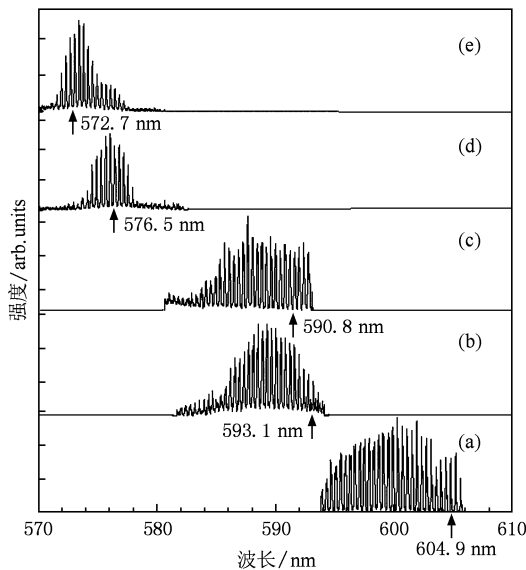


图5 WGM激光波长随增益包层溶液折射率变化的光谱图 (a)–(e)分别对应包层溶液折射率为1.383, 1.395, 1.403, 1.419和1.430的WGM激光光谱)

由图4和图5可见,随增益包层溶液折射率 n_2 的增加,径向模式数和角模式数相同的TE波和TM

形微腔, WGM 的损耗由三部分组成^[17], 即 $\alpha_{\text{total}} = \alpha_{\text{abs}} + \alpha_{\text{leak}} + \alpha_{\text{scat}}$. 其中, α_{abs} , α_{leak} 和 α_{scat} 分别表示吸收损耗、由 WGM 的激光辐射引起的泄露损耗和散射损耗.

吸收损耗由两部分组成, 即 WGM 在腔体内部石英光纤中的吸收损耗 ($\alpha_{\text{abs}}^{\text{in}}$) 和在腔体外部染料包层溶液中的吸收损耗 ($\alpha_{\text{abs}}^{\text{out}}$). 对实验所用的石英光纤 (南京春晖科技实业有限公司生产), 在可见光范围内每米透过率为 98%, 对应的吸收损耗系数 $\alpha_1 = 0.0002 \text{ cm}^{-1}$. 染料溶液中的吸收损耗系数可以表示为 $\alpha_2 = N_0 \sigma_a(\lambda)$. 对于场强处于不同吸收介质中的圆形腔内的 WGM, $\alpha_1 \neq \alpha_{\text{abs}}^{\text{in}}$, $\alpha_2 \neq \alpha_{\text{abs}}^{\text{out}}$. 为求解 $\alpha_{\text{abs}}^{\text{in}}$ 和 $\alpha_{\text{abs}}^{\text{out}}$, 引入一个 WGM 的模场体积比系数 η ^[15], η 定义为此 WGM 的消逝场体积和整个模式的总场体积之比. 对 TM_{1500}^1 表示的模式, 用文献 [18, 23] 介绍的方法可以计算其径向强度分布, 计算结果如图 6 所示. 由图 6 可以直接计算出 η 随增益包层溶液折射率变化的关系曲线如图 7 中的点划线所示.

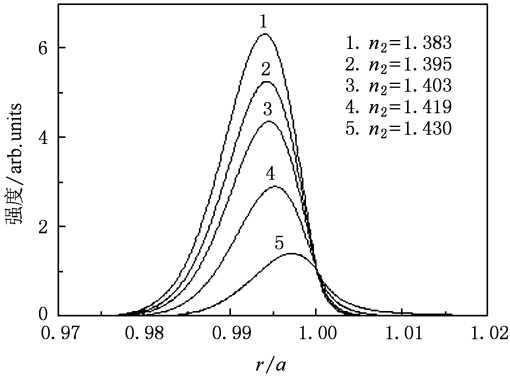


图 6 圆柱形微腔中 TM_{1500}^1 模式的径向场分布图 (1, 2, 3, 4 和 5 分别对应包层溶液折射率为 1.383, 1.395, 1.403, 1.419 和 1.430)

在引入模场体积比系数 η 后, 内部和外部吸收损耗可以分别表示为 $\alpha_{\text{abs}}^{\text{in}} = (1 - \eta) \alpha_1$ 和 $\alpha_{\text{abs}}^{\text{out}} = \eta \alpha_2 = \eta N_0 \sigma_a(\lambda)$, 对共振波长为 λ 的一个 WGM, $\alpha_{\text{abs}}^{\text{in}}$ 也可用其对应的品质因数表示为 $Q_{\text{abs}}^{\text{in}} = 2\pi n_1 / \lambda \alpha_{\text{abs}}^{\text{in}} = 2\pi n_1 / (1 - \eta) \lambda \alpha_1$, $Q_{\text{abs}}^{\text{in}}$ 随增益包层溶液折射率变化的关系曲线如图 7 中的虚线所示. 总的吸收损耗表示为

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{abs}} &= \alpha_{\text{abs}}^{\text{in}} + \alpha_{\text{abs}}^{\text{out}} \\ &= \frac{2\pi n_1}{\lambda Q_{\text{abs}}^{\text{in}}} + \eta N_0 \sigma_a(\lambda). \end{aligned} \quad (3)$$

泄露损耗是由光子隧穿 (photon tunneling)^[24]

造成的光能泄露. 圆柱形微腔 TM 模式的泄露损耗系数 α_{leak} , 可用其对应的品质因数 Q_{leak} 表示为 $\alpha_{\text{leak}} = 2\pi m / \lambda Q_{\text{leak}}$, $m = n_1 / n_2$. 用类似于推导球腔 Q_{leak} 的方法^[25], 可得圆柱形微腔中 TM 模式的 Q_{leak} 满足如下解析近似公式:

$$Q_{\text{leak}}(\text{TM}) = \frac{1}{4} \pi (n_1^2 - n_2^2) x_{l,n}^2 |H_n^{(1)}(n_2 x_{l,n})|^2, \quad (4)$$

式中, $x_{l,n} = 2\pi a / \lambda_n^l$ 是微腔的尺寸参数 (size parameter); λ_n^l 是 WGM 的共振波长; $Y_n(n_2 x_{l,n})$ 和 $H_n^{(1)}(n_2 x_{l,n})$ 分别是第二类 and 第三类 Bessel 函数. 对 TM_{1500}^1 模式, Q_{leak} 随增益包层溶液折射率变化的关系曲线如图 7 中的细实线所示. 对表面光滑的光纤, 散射损耗所对应的品质因数 Q_{scat} ^[26] 大于 10^{12} , 与之对应的散射损耗 $\alpha_{\text{scat}} \sim 2 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$, 在计算中可以忽略.

用对 TM_{1500}^1 模式的计算结果表示消逝波激励的圆柱形微腔的特征参数 η , $Q_{\text{abs}}^{\text{in}}$ 和 Q_{leak} , 微腔中的总损耗 $\alpha_{\text{total}} = \alpha_{\text{abs}} + \alpha_{\text{leak}}$, 总增益 $G_{\text{total}} = \eta N_1 \sigma_e(\lambda)$. 激光的阈值条件可以表示为

$$\begin{aligned} \eta N_1 \sigma_e(\lambda) &\geq \eta (N_i - N_1) \sigma_a(\lambda) \\ &+ \frac{2\pi n_1}{\lambda Q_{\text{abs}}^{\text{in}}} + \frac{2\pi m}{\lambda Q_{\text{leak}}}. \end{aligned} \quad (5)$$

为了解释由“增益包层”溶液折射率 n_2 变化引起的激光波长漂移现象, 引入激光阈值条件对应的 $\gamma(\lambda)$ 曲线^[15], $\gamma(\lambda)$ 值定义为染料激光上能级和所有能级上的分子数之比. 由 (5) 式得到 $\gamma(\lambda)$ 值满足

$$\gamma(\lambda) = \frac{N_1}{N_i} = \frac{\sigma_a(\lambda) + 2\pi n_1 / \lambda N_1 \eta Q'}{\sigma_a(\lambda) + \sigma_e(\lambda)}, \quad (6)$$

式中, $N_i = 3 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$, $1/Q' = 1/(n_2 Q_{\text{leak}}) + 1/Q_{\text{abs}}^{\text{in}}$. Q' 随 n_2 的变化曲线如图 7 中粗实线所示.

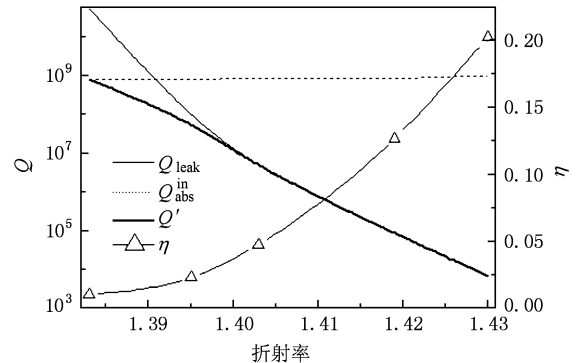


图 7 圆柱形微腔中 WGM 的 Q 值和 η 值随增益包层溶液折射率的变化曲线

(6) 式中, 除了 Q' 和 η 外, 其余都是与增益包层

溶液折射率无关的量. 将图 7 所确定的 Q' 和 η 代入 (6) 式, 就可得到不同增益包层溶液折射率所对应的 $\gamma(\lambda)$ 值随 λ 变化的曲线族, 如图 8 所示.

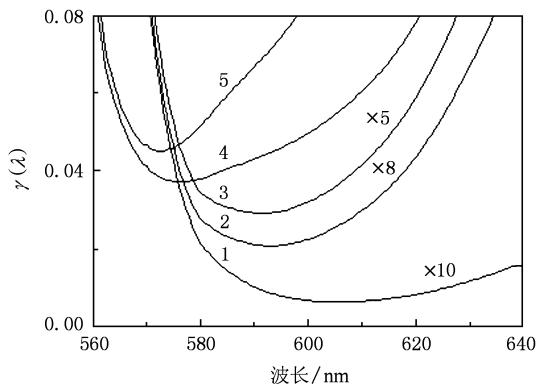


图 8 不同增益包层溶液折射率所对应的 $\gamma(\lambda)$ 曲线(1, 2, 3, 4 和 5 分别对应包层溶液折射率 1.383, 1.395, 1.403, 1.419 和 1.430)

从图 8 可见, 1) 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 $\gamma_{\min}(\lambda_c)$, 与此 $\gamma_{\min}(\lambda_c)$ 值对应的波长就是产生 WGM 激光振荡的最佳波长, 记为 λ_c . 随着“增益包层”溶液折射率的增加, $\gamma(\lambda)$ 曲线中 λ_c 数值向短波方向移动, 对 $n_2 = 1.383, 1.395, 1.403, 1.419$ 和 1.430 , 计算得出 $\lambda_c =$

604.9, 593.1, 590.8, 576.5 和 572.7 nm. 各个计算出的 λ_c 值已用箭头“ \uparrow ”标志于实验激光光谱图 5 中, 由图 5 可见, 各 λ_c 值基本对应实验激光光谱的中心波长位置; 2) 随着“增益包层”溶液折射率的减小, $\gamma(\lambda)$ 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. $\gamma(\lambda)$ 曲线随“增益包层”溶液折射率变化的规律, 较好地解释了实验激光光谱(图 5)的辐射特性.

5. 结 论

对消逝波激励及增益耦合的回音壁模式光纤激光器, 在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和光纤径向垂直的横电波, 也存在光电矢量和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长差单调地减小, 同时回音壁模式激光辐射的波长向短波方向移动, 辐射的波长范围变窄. 如上实验现象可以通过 WGM 激光的辐射理论结合激光染料的四能级模型得到很好地解释.

- [1] Wu Y, Yang X, Leung P T 1999 *Opt. Lett.* **24** 345
- [2] Li Y M, Liu Q, Tian X T, Zhang K S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2324
- [3] Yang Y D, Huang Y Z, Chen Q 2007 *Phys. Rev. A* **75** 013817-1
- [4] Verwooy D W, Furusawa A, Georgiades N Ph, Hchenko V S, Kimble H J 1998 *Phys. Rev. A* **57** R2293
- [5] Gmachal C, Capasso F, Narimanov E E 1998 *Science* **280** 1556
- [6] Spillane S M, Kippenberg T J, Vahala K J 2002 *Nature* **415** 621
- [7] Vahala K J 2003 *Nature* **424** 839
- [8] Vollmer F, Braun D, Libchaber A 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 4057
- [9] Cole R M, Sugawara Y, Baumberg J J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 137401-1
- [10] Pu X Y, Lee W K 2000 *Opt. Lett.* **25** 466
- [11] Wu Y, Leung P T 1999 *Phys. Rev. A* **60** 630
- [12] Wu Y 2000 *Phys. Rev. A* **61** 0338034
- [13] Wu Y, Yang X 2001 *J. Phys. B* **34** 2281
- [14] Feng X, Liu Y, Liu X M, Zhang W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2971 (in Chinese) [冯雪、刘越、刘小明、张巍 2009 物理学报 **58** 2971]
- [15] Moon H J, Chough Y T, An K 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3161
- [16] Shevchenko A, Lindfors K, Buchter S C, Kaivola M 2005 *Opt. Commun.* **245** 349
- [17] Zhang Y X, Pu X Y, Zhu K, Han D Y, Jiang N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3179 (in Chinese) [张远宪、普小云、祝昆、韩德昱、江楠 2009 物理学报 **58** 3179]
- [18] Pu X Y, Bai R, Xiang W L, Du F, Jiang N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3923 (in Chinese) [普小云、白然、向文丽、杜飞、江楠 2009 物理学报 **58** 3923]
- [19] Han D Y, Pu X Y, Jiang N, Feng Y L, Zhu K, Zhang Y X 2009 *Chin. Sci. Bull.* **54** 3259 (in Chinese) [韩德昱、普小云、江楠、冯永利、祝昆、张远宏 2009 科学通报 **54** 3259]
- [20] Djafar K M, Lowell L S 2002 *Fiber-Optic Communications Technology* (Beijing: Science Press, 2002)
- [21] Wang D L, Jiang N, Jiang L Q, Pu X Y 2008 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **28** 2749 (in Chinese) [王东林、江楠、姜利群、普小云 2008 光谱学与光谱分析 **28** 2749]
- [22] Xiang W L, Pu X Y, Bai R, Zhang Y X, Jiang N 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 2359 (in Chinese) [向文丽、普小云、白然、张远宪、江楠 2008 光学学报 **28** 2359]
- [23] Bohren C F, Huffman D R 1998 *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (Wiley 1998)

[24] Chang S, Rex N B, Chang R K 1999 *J. Opt. Soc. of Am. B* **16** 1
224

[25] Lam C C, Leung P T, Yang K 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 1585

[26] Chio Y S, Moon H J, An K 2001 *J. Phys. Soc. Korean* **39** 928

Radiation properties of a whispering-gallery-mode fibre laser based on skew light pumping^{*}

Zhang Yuan-Xian Feng Yong-Li Zhou Li Pu Xiao-Yun[†]

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

(Received 16 June 2009; revised manuscript received 26 June 2009)

Abstract

The radiation properties of a whispering-gallery-mode (WGM) fibre laser based on skew beam pumping have been studied. It is found from experiment that when pumped by skew light along the fibre's axis, both transverse electric wave (TE) and transverse magnetic wave (TM) exist in WGM lasing emission simultaneously. With the increase of refractive index of cladding dye solution, the wavelength spacing between TE and TM waves of which the radial mode number and angular mode number are the same value decreases, and the central lasing wavelength of WGM blue shifts to short wavelength direction. Based on radiation theory of WGM fibre laser and a model of four-energy levels of dye laser, the obtained experimental results are well explained.

Keywords: fibre laser, whispering-gallery-mode, wavelength shift, wavelength spacing between TE & TM waves

PACC: 4255N, 4255M, 4260D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60877037).

[†] Corresponding author. E-mail: xypu@163.com