

文章编号: 0258-7025(2008)05-0660-04

# 影响柱形微腔回音廊模激光抽运阈值能量的因素

江楠 杜飞 白然 向文丽 普小云

(云南大学物理系, 云南 昆明 650091)

**摘要** 将石英光纤浸入染料溶液中形成圆柱形微腔, 并采用近轴向消逝场抽运的方式, 激发染料溶液的激光增益。柱形微腔回音廊模(WGM)激光抽运阈值能量的高低与抽运激光的消逝场和回音廊模消逝场的空间重叠程度有直接关系, 同时也需要考虑低阶与高阶回音廊模损耗的影响。通过改变染料溶液的折射率以及光纤直径, 来改变回音廊模的消逝场分布, 从而改变两种消逝场空间重叠的体积以及回音廊模的损耗。实验结果表明, 柱腔直径不变时, 存在一个最佳的溶液折射率值; 同时, 溶液折射率不变时, 也存在一个最佳的柱腔直径, 使得一阶回音廊模激光抽运阈值能量最低。

**关键词** 激光技术; 光学柱形微腔; 回音廊模式; 消逝场; 抽运阈值能量; 空间重叠

中图分类号 O 432.1<sup>+</sup>2 文献标识码 A

## Factor of Influencing Pumping Threshold Energy of Whispering-Gallery-Mode Laser in a Cylindrical Micro-Cavity

Jiang Nan Du Fei Bai Ran Xiang Wenli Pu Xiaoyun

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

**Abstract** A cylindrical microcavity was made by immersing a silica optical fiber in a dye solution. The pumping threshold energy of the whispering-gallery-mode (WGM) laser strongly related to the spatial overlapping between the evanescent field of the pumping laser and the WGMs, and it also was influenced by the losses of the WGMs of low and high order. The distribution of evanescent field of the WGM can be changed through changing the refractive index of dye solution and the diameter of fiber. Then the spatial overlapping and the losses of WGM are changed. The results show that there is a lowest pumping threshold value of the first order WGM laser when one of the refractive index of the solution and the diameter of fiber is changed but the other is invariable.

**Key words** laser technique; optics cylindrical micro-cavity; whispering-gallery-modes; evanescent field; pumping threshold energy; spatial overlapping

### 1 引言

对于消逝波增益耦合方法, 由于谐振腔体和增益介质的分离增加了谐振腔的稳定性, 在微腔激光的研究中受到高度重视<sup>[1~6]</sup>。将石英光纤浸入若丹明 6G 溶液中, 光纤的折射率比溶液的折射率高, 石英光纤在被插入的溶液中形成圆柱形微腔。为了提高消逝波增益耦合的耦合效率, 采用近轴向抽运方式, 有效地增加了柱形微腔回音廊模式(WGM)的消逝场和染料区增益场的空间重叠, 显著地降低了柱形微腔的激光抽运阈值<sup>[7]</sup>。在柱形微腔激光中,

一般情况下低阶径向模式首先起振, 依次再到高阶径向模式。抽运阈值与抽运激光的消逝场、微腔回音廊模式消逝场的空间重叠程度以及低阶与高阶径向模式的损耗有关。

在不改变抽运光的入射角度(抽运光与光纤轴线之间的夹角)以及光纤直径的条件下, 当改变光纤外染料溶液的折射率后, 回音廊模式的消逝场体积随之变化, 因此两种消逝场的空间重叠情况也在改变。与此同时, 在不改变抽运光的入射角度和染料溶液折射率的情况下, 通过改变光纤的直径, 柱形微

收稿日期: 2007-09-08; 收到修改稿日期: 2007-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(10564005), 云南省应用基础研究基金(2006A0001M)和云南省教育厅科学研究基金(07Z40497)资助项目。

作者简介: 江楠(1977—), 男, 云南人, 讲师, 主要从事光电子及激光光谱方面的研究。E-mail: jiangnan@ynu.edu.cn

腔中的回音廊模式消逝场的体积也相应改变,因此消逝场的空间重叠情况也在改变。而且只要回音廊模式的消逝场体积发生变化,模式的损耗也发生变化,这样,抽运阈值能量也将随之改变。

## 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  $P_1$  (MELLES GRIOT 制造)起偏后,经全反镜反射,再经过另一线偏振片  $P_2$ ,  $P_2$  的偏振方向平行于光学平台。旋转  $P_1$  的偏振方向,获得需要的抽运能量。在光路中放置分束镜 B,以便由激光能量计 E (MELLES GRIOT 制造,型号为 13PEM001)测出即时抽运能量。抽运光由一块焦距为 5 cm 的透镜  $L_1$  会聚,会聚光线与石英光纤轴线方向之间的夹角约为  $5^\circ$ 。会聚后的抽运光线以此角度耦合进入端面位于  $L_1$  焦平面处的石英光纤中。在光纤外面套了内径为 3.3 mm 的玻璃细管,光纤和玻璃管之间充满了浓度为  $2 \times 10^{-3}$  mol/L 的若丹明 6G 染料溶液。溶液的折射率在 530~630 nm 的波长范围内约为 1.36~1.426,低于石英光纤的折射率 1.458。当抽运激光到达染料所处位置的管壁时,其在染料溶液中的消逝场激发产生激光的增益,光纤内波长处于该增益波长范围内的回音廊模式的消逝场再将此激光增益耦合进入光纤内,使染料荧光在回音廊模的支持下获得受激辐射放大,形成沿光纤外壁侧向辐射的回音廊模激光。辐射光经透镜组  $L_2$  (焦距分别为 8 cm, 7.5 cm) 会聚后进入增强型 ICCD 光谱采集系统 S (ICCD: PI-MAX; 光栅光谱仪: Spectrapro 500i。美国 Roper 公司生产)的进光狭缝口。实验采集到的光谱,均为单个激光脉冲激励下获得的光谱。

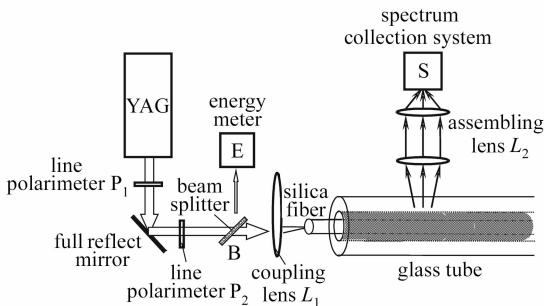


图 1 实验系统设置

Fig. 1 Schematic diagram of the evanescent-wave pumped cylindrical microcavity laser

## 3 实验结果及分析

实验中将浓度为  $2 \times 10^{-3}$  mol/L 的若丹明 6G 乙二醇溶液(折射率为 1.426)与若丹明 6G 乙醇溶液(折射率为 1.36)按照一定的体积混合,获得所需的溶液折射率。实验总共配制了六种折射率的溶液,用阿贝折射仪对折射率进行测量,分别为 1.36, 1.383, 1.395, 1.407, 1.413, 1.426。图 2 所示为直径为 308  $\mu\text{m}$  的光纤处于这六种折射率的溶液中时,光纤中一阶回音廊模式激光的阈值能量随折射率的变化情况。可以看出,回音廊模式激光的阈值能量最低时对应的染料溶液折射率为 1.407,低于或高于这一折射率值时的抽运阈值能量都变高了。

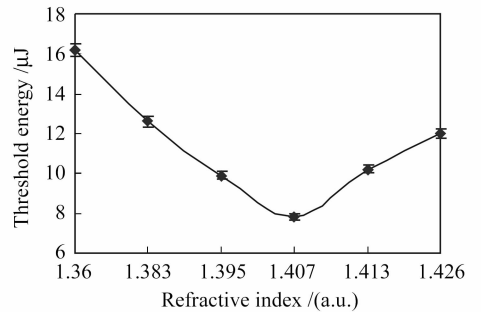


图 2 抽运阈值能量随染料溶液折射率的变化曲线

Fig. 2 Pumping threshold energy versus refractive index of solution

抽运激光在染料介质中的消逝场强度沿柱腔半径  $r$  方向的分布可描述为<sup>[8]</sup>

$$I(r) = I_0 \exp(-2k\beta r), \quad (1)$$

式中  $\beta$  为衰减因子,  $\beta = \sqrt{n_1^2 \sin^2 \alpha / n_2^2 - 1}$ , 其中  $\alpha$  为光从光纤入射到溶液时,界面处的入射角,  $n_1$  为光纤折射率,  $n_2$  为介质折射率;  $k$  为抽运激光在溶液中的波矢,  $k = 2\pi n_2 / \lambda$ 。

对于光纤中存在的回音廊模式为 TM 模式<sup>[7]</sup>, 即回音廊模式沿柱腔轴线  $z$  方向只有  $E$  分量, 根据米氏 (Mie) 散射理论<sup>[9]</sup> 及电磁场边界条件, 可以得到回音廊模式的  $E_z$  分量沿径向的场分布

$$E_z(r) = \frac{B}{J_m(n_1 k_m^l a)} J_m(n_1 k_m^l r), \quad (0 \leq r \leq a), \quad (2)$$

$$E_z(r) = \frac{B}{H_m(n_2 k_m^l a)} H_m^{(1)}(n_2 k_m^l r), \quad (r \geq a) \quad (3)$$

式中  $a$  为柱腔的半径,  $J_m$  为  $m$  阶贝塞耳函数,  $H_m^{(1)}$  为  $m$  阶第一类汉克 (Hankel) 函数,  $k_m^l$  是角模式数为  $m$ , 径向模式数为  $l$  的回音廊模式的波矢。

根据 (1), (3) 式以及 P. W. Barber 等的程序计算理论<sup>[10,11]</sup>, 获得了直径为 308  $\mu\text{m}$  的光纤在折射率

为1.36, 1.407, 1.426的染料溶液中时, 抽运激光消逝场与回音廊模式消逝场的强度分布, 如图3所示。从图3(a)可以看到, 当光纤处于折射率为1.36的溶液中时, 抽运激光的消逝场与1, 2, 3阶径向回音廊模式的消逝场基本上都重叠在一起, 而且三种阶次回音廊模式的损耗都较小。虽然空间重叠得很好, 但是三种阶次回音廊模式的阈值增益几乎相同。在相同抽运条件下, 三种回音廊模式激光会同时起振, 这样反而使回音廊模式激光的抽运阈值增大。从图3(b), (c)中看到, 由于高阶回音廊模式的损耗较大, 那么高阶回音廊模式的起振阈值增益就高于1阶回音廊模式, 这样就只有1阶径向回音廊模式激光首先起振。同时可以看出, 图3(b)中1阶径向回音廊模式的消逝场与抽运激光的消逝场重叠很好, 而图3(c)中的重叠情况相对差一些。所以当光纤处于折射率为1.407的溶液中时, 回音廊模式激光的抽运阈值能量比光纤处于折射率为1.426的溶液中时低。对比图2的结论可以看出, 理论分析与实验结论很好地吻合。

同时, 还研究了柱形微腔的直径对回音廊模式

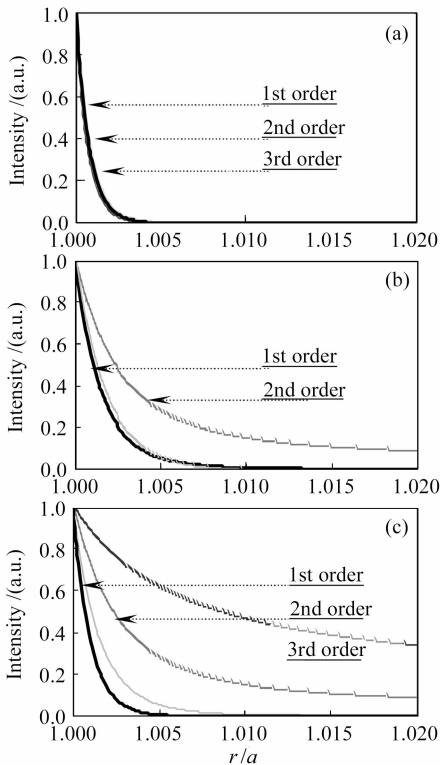


图3 光纤处于不同折射率溶液中时抽运激光消逝场与回音廊模式消逝场的分布

Fig. 3 Evanescent field of pumping laser and WGM in the fiber immersed in the different solutions indexes of (a) 1.36, (b) 1.407, (c) 1.426

抽运阈值能量的影响。实验中所用的光纤的直径为 $308\ \mu\text{m}$ , 将位于染料段的光纤浸入低浓度的HF溶液中, 通过腐蚀的方法将该区域的光纤直径尺寸不断变小, 得到了另外两种外径尺寸的光纤, 直径分别为 $246\ \mu\text{m}$ ,  $215\ \mu\text{m}$ 。将这三种直径的光纤浸入浓度为 $2 \times 10^{-3}\ \text{mol/L}$ 的若丹明6G乙二醇溶液中, 测得的阈值能量随光纤直径变化的结果如图4所示。可以看出, 随着光纤直径变大, 即柱形微腔尺寸变大, 腔内回音廊模式激光的抽运阈值能量在不断变小。

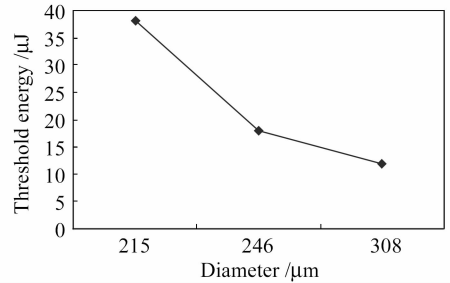


图4 抽运阈值能量随光纤直径的变化曲线  
Fig. 4 Pumping threshold energy of WGM in the different diameter fibers

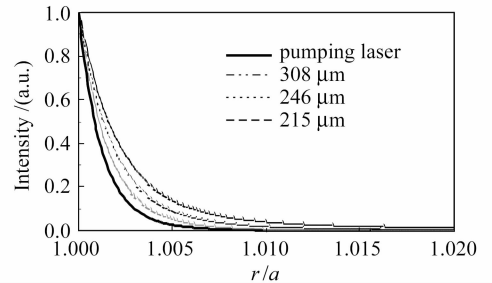


图5 不同直径的光纤中抽运激光消逝场与回音廊模式消逝场分布

Fig. 5 Evanescent field of pumping laser and WGM in the different fibers of  $308\ \mu\text{m}$ ,  $246\ \mu\text{m}$ , and  $215\ \mu\text{m}$

根据(1)和(3)式获得了直径为 $308\ \mu\text{m}$ ,  $246\ \mu\text{m}$ ,  $215\ \mu\text{m}$ 的光纤处于若丹明6G乙二醇溶液中时, 抽运激光消逝场与1阶径向回音廊模式消逝场强度分布曲线, 如图5所示。图中没有给出高阶径向回音廊模式的消逝场强度分布, 是因为当光纤处于若丹明6G乙二醇溶液中时, 高阶回音廊模式的损耗比一阶回音廊模式的损耗大得多, 不容易起振, 所以可以不用考虑。可以看出, 三种直径的光纤中1阶径向回音廊模式消逝场与抽运激光消逝场的重叠程度最好的光纤直径依次是 $308\ \mu\text{m}$ ,  $246\ \mu\text{m}$ 和 $215\ \mu\text{m}$ 。随着光纤直径变小, 重叠程度越差, 意味着抽运阈值能量越高。与图4对照, 理论分析与实验结论吻合。

## 4 结 论

近轴向消逝波抽运方式下,当改变柱形微腔周围染料溶液的折射率及微腔尺寸时,抽运激光与微腔内回音廊模式处于溶液中的消逝场重叠程度随之发生改变,同时也会使回音廊模式的损耗发生改变,这些改变将直接影响回音廊模式激光的抽运阈值能量。以上两种改变结合起来,能够有效地降低抽运阈值能量。

## 参 考 文 献

- 1 Hee-Jong Moon, Young-Tak Chough, Kyung Won An. Cylindrical microcavity laser based on the evanescent-wave-coupled gain [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(15):3161~3164
- 2 Hee-Jong Moon, Young-Tak Chough, Jung Bag 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 Hee-Jong Moon, Gun-Woo Park, Sang-Burn 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
- 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**:349~353
- 5 Huang Huijie, Zhai Junhui, Zhao Yongkai *et al.*. Multi-probe fiber-optic evanescent wave biosensor and its characterization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):718~722
- 6 Huang Huijie, Zhai Junhui, Ren Bingqiang *et al.*. Fiber-optic evanescent wave biosensor and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):451~454
- 7 Jiang Nan, Wang Donglin, Pu Xiaoyun. Whispering-gallery-mode laser of evanescent wave exciting and coupling dye gain in a cylindrical micro-cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):920~923
- 8 Wang Zhijiang, Chen Xingpu, Lu Hanmin *et al.*. Optical Technology Manual[M]. Beijing: China Machine Press, 1987. 241~243
- 9 C. F. Bohren, D. R. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles [M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1998. 3~129
- 10 Jiang Liqun, Wang Donglin, Jia Zhanguo *et al.*. Two methods of locating resonant positions of whispering gallery modes in cylindrical micro-cavity [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2007, **19**(2):151~157
- 11 P. W. Barber, S. C. Hill. Light Scattering by Particle: Computational Methods [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1990. 25~77