

文章编号: 0258-7025(2007)07-0920-04

消逝波激励及增益耦合的柱形微腔 回音廊模激光辐射

江楠, 王东林, 普小云*

(云南大学物理系, 云南昆明 650091)

摘要 毛细管的折射率比溶液的折射率高, 石英毛细管在被插入的溶液中形成圆柱形微腔。采用近轴向消逝波抽运的方法, 使激光的染料增益局限于抽运光在染料区的消逝场范围内, 极大地提高了消逝波耦合柱形微腔的抽运效率。与侧向抽运方式比较, 柱形微腔回音廊模(WGM)激光的抽运阈值从 $200\ \mu\text{J}$ 降低到 $9.5\ \mu\text{J}$ 。实验所得到的激光谱线波长以及相邻谱线的波数间隔与回音廊模式的理论计算吻合, 说明石英毛细管能得到与石英光纤类似的柱形微腔回音廊模激光辐射。

关键词 激光技术; 光学柱形微腔; 回音廊模; 消逝波激励; 阈值抽运能量

中图分类号 TN 243; TN 248.3⁺3 **文献标识码** A

Whispering-Gallery-Mode Laser of Evanescent Wave Exciting and Coupling Dye Gain in Cylindrical Microcavity

JIANG Nan, WANG Dong-lin, PU Xiao-yun

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

Abstract A cylindrical microcavity was made by immersing a silica capillary in a solution of rhodamine 6G whose refractive index is lower than capillary's. Whispering-gallery-mode (WGM) laser was observed in the cylindrical microcavity by evanescent wave exciting and coupling dye gain. Due to dye gain was excited by a pumping evanescent wave, the gain was limited around the cylindrical microcavity closely, and the pumping efficiency was then improved greatly. The pumping threshold for laser emission was reduced to $9.5\ \mu\text{J}$ in this method compared with a value of $200\ \mu\text{J}$ in a method of only evanescent wave coupling dye gain. Wave number intervals of whispering-gallery-modes between measured and theoretic values matched very well. The calculated positions of structural resonances of whispering-gallery-modes matched the experimental results very well too. All those indicated when silica fiber was replaced by silica capillary as cylindrical microcavity, the same whispering-gallery-mode could also be obtained.

Key words laser technique; optics cylindrical microcavity; whispering-gallery-modes; evanescent wave exciting; threshold energy

1 引言

传统球形和柱形微腔激光器的腔体本身就是增益介质^[1~4]。增益介质和腔体合二为一不利于腔体的稳定性, 不利于将同一腔体应用到不同的增益介质上。增益介质和腔体的分离是解决这些问题的一条重要途径。Moon 等^[5~8]用石英纤维构成柱形微

腔, 并将此柱形微腔插入含有激光染料溶液的毛细管中实现了腔体和增益介质的分离。Moon 等采用了侧向光抽运方式, 微腔回音廊模(WGM)在消逝波区域外的染料分子徒然损耗抽运光能量, 增加了产生微腔激光的抽运阈值。为了降低抽运阈值, 采用近轴向消逝波抽运方式。由于毛细管的折射率高

收稿日期: 2006-10-09; 收到修改稿日期: 2007-02-06

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)资助项目。

作者简介: 江楠(1977—), 男, 云南昆明人, 讲师, 理学硕士, 主要从事光电子及激光光谱方面的研究。

E-mail: jiangnan@ynu.edu.cn

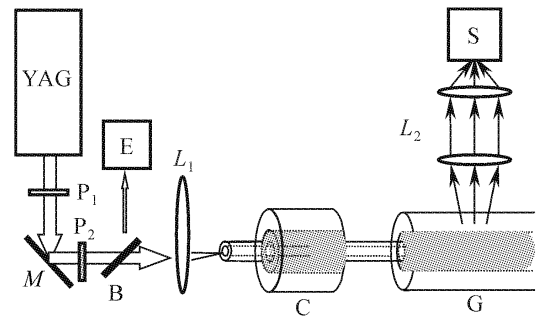
* 通信联系人。E-mail: xypu@163.com

于染料溶液的折射率,将石英毛细管浸入染料溶液中,毛细管构成柱形微腔。抽运光从近轴向以全反射方式进入石英毛细管管壁,抽运光的消逝场在染料区激发产生激光增益。激光增益以消逝波耦合方式进入毛细管管壁中,并在柱形微腔回音廊模式的支持下形成激光振荡。采用消逝波抽运方式,染料增益局限于抽运光在染料区的消逝场范围内,极大地提高了抽运效率,并显著地降低了产生微腔激光的抽运阈值。

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 M 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 15 cm 透镜 L_1 会聚,会聚光线与石英毛细管 C 轴线方向存在一个最佳抽运角度 ϕ , 约为 5° 。偏离此最佳抽运角度会降低激光的抽运效率。会聚后的抽运光线以此角度耦合进入端面位于 L_1 焦平面处的石英毛细管的管壁中。考虑到抽运光进入毛细管管壁中以后,光束中的某些部分并不能在毛细管外表面内侧以全反射方式向前传播,这部分光线会透射出毛细管外部。为了保证染料增益为抽运光的消逝场激发,在毛细管外面套了两段内径为 3.3 mm 的玻璃细管 G , 前面一段长度为 4 cm,后面一段长度为 12 cm。前面一段毛细管和玻璃管之间充满了分析纯乙二醇溶液,用于透射出毛细管中的非全反射抽运光。在后面一段毛细管和玻璃管之间充满了浓度为 2×10^{-3} mol/L 的诺丹明 6G 乙二醇溶液。两段溶液的折射率在 530~630 nm 的波长范围内约为 1.43, 低于石英毛细管的折射率 1.452。如图 1 设置,可确保位于染料中毛细管内的抽运激光以全反射方式沿毛细管的轴线方向向前传播,从而实现以抽运激光的消逝场来激发染料介质增益的设想。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,毛细管内波长处于该增益波长范围内的回音廊模的消逝场再将此激光增益耦合进入毛细管内,使得染料荧光在回音廊模的支持下获得受

激辐射放大,形成沿毛细管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。



P: line-polarimeter; M: full reflect mirror;
B: beam splitter; E: energy meter; L_1 : coupling lens;
C: silica capillary; G: glass tube; L_2 : assembling lens;
S: spectrum collection system

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

抽运能量较低时,只能在石英毛细管外的染料区观察到暗红色的荧光辐射。能量增加到一定的数值时,染料区的端口处沿石英毛细管的边缘出现炫目的红光。用肉眼沿垂直于毛细管轴线的方向观察,红光的强度最大;偏离毛细管的垂向后,强度急剧减弱,沿毛细管轴向不能观察到此红光。可见,炫目的红光具有柱形微腔回音廊模激光的方向性辐射特征。

为了较为准确地测量近轴向抽运条件下的激光抽运阈值,将 YAG 激光的输出固定在 0.5 mJ,保持图 1 中 P_2 的偏振方向为水平方向,改变 P_1 的偏振方向来改变两个偏振片之间的夹角,以获得不同的抽运能量。同时采用外直径为 328 μm 的毛细管作为柱形微腔。图 2 所示为波长为 593.43 nm 的回音廊模激光强度随抽运能量变化的曲线。由此曲线确定的激光抽运阈值能量为 9.5 μJ 。对比 Moon 等采用侧面抽运方式所测量到的阈值抽运能量为 200 μJ ^[5],显然,可以大大降低激光产生的阈值能量。

随着抽运能量的增加,毛细管管壁外边缘沿轴线方向出现炫目红光的长度也在不断增加。当抽运能量为 15.3 μJ 时,毛细管中炫目红光的长度 $L =$

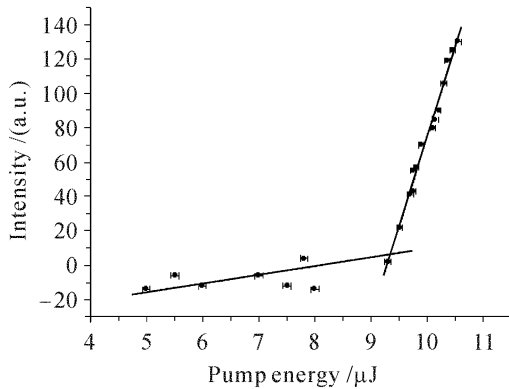


图2 波长为 593.43 nm 的回音廊模激光强度随抽运能量变化的曲线

Fig. 2 Pumping curve for a laser line of wavelength 593.43 nm

40 mm; 能量为 48.6 μJ 时, 长度 $L = 92$ mm; 能量为 119.7 μJ 时, 长度超过 120 mm。在 119.7 μJ 的能量抽运下, 采用 Moon 等的侧向抽运方式^[5], 没有看到回音廊模激光。实验结果表明, 采用近轴向抽运方式能够更有效地利用抽运光的能量, 使微腔回音廊模激光的抽运阈值能量降低。

实验中所用的毛细管原始尺寸为: 外直径 328 μm , 内直径 113 μm 。将位于染料段的毛细管浸入低浓度的 HF 溶液中, 通过腐蚀的方法将该区域的毛细管外直径尺寸不断变小, 得到了另外四种外径尺寸的毛细管。采集了五种外径尺寸的毛细管在相同波数范围 16940~16765 cm^{-1} (波长范围 590~596.5 nm) 内微腔回音廊模的光谱图 (见图 3)。图

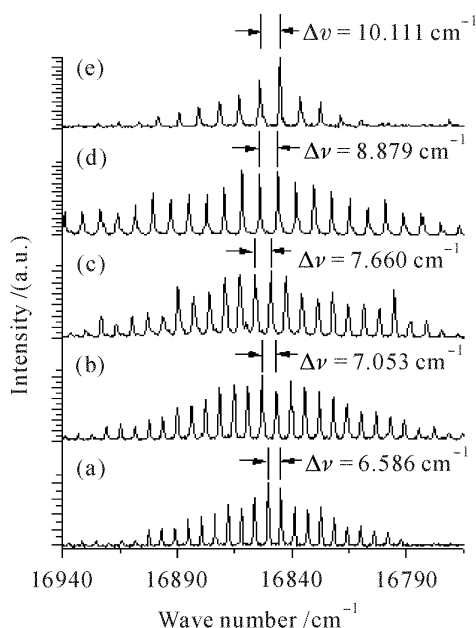


图3 回音廊模激光波数间隔随毛细管直径变化的比较
Fig. 3 Comparisons of wave number intervals of different cavity diameter

3 中的 (a), (b), (c), (d), (e) 五组谱线分别为外径尺寸为 328 μm , 308 μm , 288 μm , 246 μm , 211 μm 的五个毛细管柱形微腔中的回音廊模光谱。可以看到, 随着柱形微腔直径的变小, 同一组谱线中相邻回音廊模式的波数间隔增大。通过测量, 得到 (a), (b), (c), (d), (e) 五组谱线相邻回音廊模式的平均波数间隔分别为 6.586 cm^{-1} , 7.053 cm^{-1} , 7.660 cm^{-1} , 8.879 cm^{-1} , 10.111 cm^{-1} 。

采用回音廊模波数间隔的一级近似公式^[9]

$$\Delta\nu = \frac{1}{m_s D \pi}, \quad (1)$$

计算了柱形微腔回音廊模相邻模式的波数间距。(1) 式中 m_s 和 D 分别为柱形微腔的折射率和直径。取 $m_s = 1.452$, D 为石英毛细管的外径, 据 (1) 式计算出五种外径尺寸下回音廊模的相邻模式的波数间隔分别为 6.684 cm^{-1} , 7.118 cm^{-1} , 7.612 cm^{-1} , 8.911 cm^{-1} , 10.390 cm^{-1} , 与实验中测量出的谱线峰值的平均波数间隔值很接近。证实了在毛细管管壁外部边缘处所看到的炫目红光为柱形微腔回音廊模激光, 同时也说明, 染料的激光增益通过毛细管中沿轴线方向传播的抽运光的消逝场激发, 并通过柱形微腔回音廊模在染料区的消逝场耦合到了微腔中, 并在柱形微腔回音廊模支持下形成了受激辐射光的放大。

用石英毛细管替代石英光纤来作为柱形微腔。设 D 为毛细管的外壁直径, θ_c 为全反射临界角。当毛细管的内壁半径 $r < (D \sin \theta_c) / 2$ 时, 对于回音廊模式, 空心毛细管和实心纤维有相同的传光效果^[7]。取 $D = 328 \mu\text{m}$, $\sin \theta_c = 1.43 / 1.452 = 0.985$, 那么 r 应小于 161.5 μm 。使用的毛细管内壁半径为 56.5 μm , 满足以上条件。应用 Lam 等确定回音廊模共振峰位置的解析近似公式^[9]

$$m_s x_{n,l} = n + 2^{-1/3} a_l n^{1/3} - \frac{p}{(m^2 - 1)^{1/2}} + \frac{3}{10} 2^{-2/3} a_l^2 n^{-1/3} - \frac{2^{-1/3} p (m^2 - 2p^2/3)}{(m^2 - 1)^{3/2}} a_l n^{-2/3} + O(n^{-1}), \quad (2)$$

其中

$$p = \begin{cases} m & \text{TM wave} \\ 1/m & \text{TE wave} \end{cases}$$

标定了激光谱线的模式归属。 m_s 和 m 分别为圆柱腔的绝对和与液体介质的相对折射率, a_l 为艾里函数的根, 共振峰由 p (偏振态), n (角模式数) 和 l (径向模式数) 三个指数共同标定。(2) 式中, $x_{n,l} =$

$\pi D/\lambda_{n,l}$ 为回音廊模共振峰位置, $\lambda_{n,l}$ 为共振波长。图 4 是外直径为 $328 \mu\text{m}$ 的毛细管中的回音廊模光谱。实验确定, 当抽运光为水平偏振方向的线偏振光时, 在如图 1 所示的近轴向抽运方式下, 柱形微腔回音廊模激光为 TM 光波, 即光矢量振动方向沿腔轴线方向。对于 $l=1$ 的一阶回音廊模的共振峰位置, $x_{n,l}$ 的实验值与(2)式计算的理论值标准偏差^[10] 仅为 0.03377。而对于 $l=2$ 和 3 的回音廊模共振峰位置, 实验值与理论值的标准偏差都要比 $l=1$ 的大一个数量级。结果表明, 所采集到的光谱为一阶回音廊模激光光谱。谱线标定结果如图 4 所示。

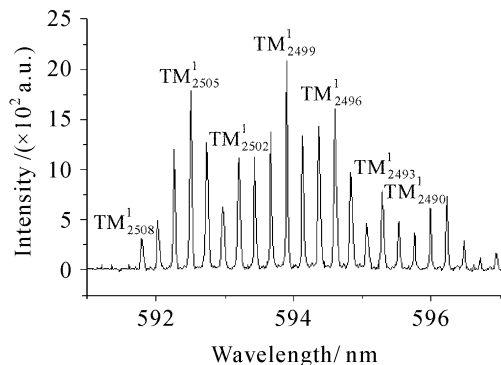


图 4 直径为 $328 \mu\text{m}$ 的石英毛细管中回音廊模模式的标定

Fig. 4 Mode identification of WGM for a silica capillary of diameter $328 \mu\text{m}$

4 结 论

采用近轴向消逝波抽运方式, 可以使染料增益局限于抽运光在染料区的消逝场范围内, 极大地提高了抽运效率, 显著地降低了消逝波增益耦合柱形微腔中产生回音廊模激光的抽运阈值。测量了五种不同直径的毛细管中回音廊模相邻模式的波数间

隔, 与回音廊模的理论计算值吻合。根据柱形微腔回音廊模共振峰位置公式, 对采集的光谱进行了成功的模式标定。

参 考 文 献

- 1 Kerry J. Vahala. Optical microcavities [J]. *Nature*, 2003, **424**:839~846
- 2 Claire Gmachl, Federico Capasso, E. E. Narimanov *et al.*. High-power directional emission from microlasers with chaotic resonators [J]. *Science*, 1998, **280**:1556~1560
- 3 Lan Yang, K. J. Vahala. Gain functionalization of silica microresonators [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(8):592~594
- 4 Huang Rao, Liu Zhijing, Wang Keyi *et al.*. Recent research development of microsphere laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(8):957~961
黄 晓, 刘之景, 王克逸 等. 微球激光的最新研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(8):957~961
- 5 Hee-Jong Moon, Young-Tak Chough, Kyungwon An. Cylindrical microcavity laser based on the evanescent-wave-coupled gain [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(15):3161~3164
- 6 Hee-Jong Moon, Young-Tak Chough, Jung Bo 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
- 7 Hee-Jong Moon, Cun-Woo Park, Sang-Bum 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
- 8 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
黄惠杰, 翟俊辉, 赵永凯 等. 多探头光纤倏逝波生物传感器及其性能研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):718~722
- 9 C. C. Lam, P. T. Leung, K. Young. Explicit asymptotic formulas for the positions, widths, and strengths of resonances in Mie scattering [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1992, **9**(9):1585~1592
- 10 Chen Hongtao, Li Yinmei, Lou Liren *et al.*. Detection of nanometer displacement in optical-tweezers and its related measuring errors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):729~734
陈洪涛, 李银妹, 楼立人 等. 光镊技术中的纳米位移探测及其测量误差讨论[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):729~734