

基于聚二甲基硅氧烷的回音壁模式激光的产生长度及应用

张远宪 张晓晓 冯 黎 刘 春 普小云

(云南大学物理系, 云南 昆明 650091)

摘要 采用沿光纤轴向倏逝波光抽运方式,研究了基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)的回音壁模式(WGM)激光的产生长度。实验发现,以 PDMS 为包层的 WGM 激光具有较长的激光产生长度。利用这一特点,设计并制作了一块具有三个光纤沟道的 PDMS 基片。通过在沟道中段填入罗丹明 640、罗丹明 B 和罗丹明 6G 的乙醇增益溶液,在同一块 PDMS 芯片上同时获得了红(628~634 nm)、橙(590~597 nm)和黄(564~572 nm)三波段激光辐射。

关键词 激光器; 光纤激光器; 聚二甲基硅氧烷芯片; 激光产生长度; 三波段激光辐射

中图分类号 TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0702011

Produced Length and Application of Whispering Gallery Mode Lasing Based on Polydimethylsiloxane

Zhang Yuanxian Zhang Xiaoxiao Feng Li Liu Chun Pu Xiaoyun

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

Abstract The produced length of whispering-gallery-mode (WGM) lasing based on polydimethylsiloxane (PDMS) is investigated. It is found that the WGM lasing has a long lasing produced length pumped by evanescent wave along the optical fiber axis. A PDMS substrate with three fiber channels is fabricated. After injecting ethanol gain solutions of rhodamine 640, rhodamine B and rhodamine 6G separately into the three channels, three-wavelength WGM lasing emission at red (628~634 nm), orange (590~597 nm) and yellow (564~572 nm) bands is successfully observed.

Key words lasers; fiber laser; polydimethylsiloxane chip; lasing produced length; three-wavelength-range lasing emission

OCIS codes 140.3510; 140.3948; 140.3325; 140.2050; 140.5560; 140.3410

1 引 言

光学器件的微型化、集成化以及光学参数的可调化是现代光学技术的主要发展方向之一。传统光学器件具有体积大、成本高、可调性和稳定性差等缺陷,直接阻碍了光学系统的微型化与集成化进程。现代光学研究常常需要将多种功能集成在一块独立的芯片上,即“芯片上的实验室”^[1]。微流控光学^[2-3]是现代光学、光电子学和微流控技术相结合而形成的新型交叉前沿学科和技术。微流控光学系统具有快速、高效和样品取样少等优点,广泛应用于生物技术、化学分析、环境科学等领域^[4-6]。然而微

流控光学系统的两个最主要的组成部分,即光源和传感器却难于集成到芯片中,从而限制了微流控光学系统的功能集成度和便携性。为了实现光源和微流控芯片的集成,多个研究组提出和展示了不同结构和材料的微流控芯片激光器^[7-10],但这类激光器存在结构复杂或者抽运阈值能量较高等缺陷。本课题组的前期工作^[11-19]对倏逝波激励的回音壁模式(WGM)光纤激光器进行了比较系统深入的研究,这种光纤激光器将一根石英裸光纤放于有增益包层溶液的玻璃套管中,在沿光纤轴线光抽运、倏逝波激励增益的条件下实现了低阈值的 WGM 激光辐射。

收稿日期: 2013-02-06; **收到修改稿日期**: 2013-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(11164033)、云南省应用基础研究基金(2011FA006)、云南省教育厅项目(K1050667)、云南省高校科技创新团队支持计划

作者简介: 张远宪(1983-),男,博士研究生,主要从事光学及光子学等方面的研究。E-mail: zyx74635@163.com

导师简介: 普小云(1957-),男,博士,教授,主要从事光学及光子学等方面的研究。E-mail: xypu@163.com(通信联系人)

然而,这种光纤激光器存在不容易微型化和稳定性差的缺陷,妨碍了将其作为微型激光器直接集成到芯片上。

本文介绍了一种基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)基片的 WGM 光纤激光器。这种激光器将一根石英裸光纤置入一片 PDMS 基片中,采用沿光纤轴线光抽运以及倏逝波激励增益的方式可以获得较长范围的 WGM 激光输出,利用这一特点,在同一块 PDMS 基片的沟道中注入不同的激光增益介质后构成一块坚固的三波段 WGM 光纤激光器芯片。在一块激光器芯片中同时实现了红、橙和黄三个不同波长范围的 WGM 激光辐射。

2 实 验

2.1 三波段激光器芯片制作

制作芯片前,先配置 PDMS 预聚物,再将 PDMS 预聚物在室温下放置 20 min 进行脱气处理。将已经脱气的 PDMS 预聚物浇注在一块干净、平整的玻璃基底(GS)上制成基片(PDMS 预聚物的厚度约为 400 μm ,折射率为 1.406),玻璃基底的周围用塑料边框围住,防止 PDMS 预聚物外流;将直径为 285 μm 的石英光纤(QOF, 光纤已去掉包层,折射率为 1.458)植入到 PDMS 基片中(PDMS 起光纤包层的作用),然后将已经植入光纤后的基片放于烤箱中固化(烤箱温度固定在 100 $^{\circ}\text{C}$, 固化时间 15 min)。在固化后的 PDMS 基片与光纤接触的特定位置刻出三个光纤沟道(FC)作为储液池,PDMS 基片长 4.5 cm, 宽 2 cm, 3 个 FC 的长度均为 0.5 cm, 宽度和高度均为 400 μm 。在沟道 1、2 和 3 中分别注入罗丹明 640、罗丹明 B 和罗丹明 6G 乙醇溶液(折射率为 1.362, 起光纤的增益包层作用),再用另外一块洁净平整的玻璃基片对芯片封装后,便构成基于 PDMS 的三波段激光器芯片,如图 1 所示。

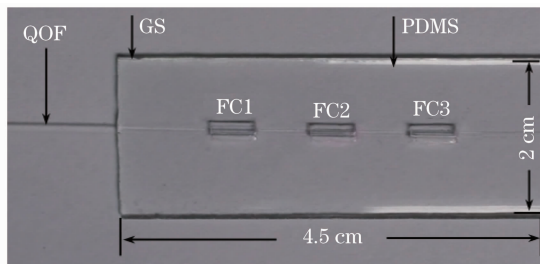


图 1 PDMS 芯片实物照片

Fig. 1 Picture of the PDMS chip

2.2 实验安排

采用 2.1 节描述的芯片制作方法,首先制作了

基于 PDMS 基片的单波段激光器芯片,用此芯片测量了 WGM 激光的基本辐射特性,并获得了 WGM 激光沿光纤轴向的产生长度和抽运能量间的一般性规律。在此基础上获得了基于 PDMS 基片的三波段激光辐射。下面以单波段 WGM 激光器为例说明激光的产生过程以及激光辐射的测量方法。

单一波段 WGM 激光器芯片的剖面如图 2 所示,沿石英裸光纤 F_1 轴向的包层由三段构成,第一段和第三段为 PDMS 包层,起固定光纤的作用;第二段为染料乙醇溶液,起增益包层的作用。当抽运光进入光纤的入射角 θ_i 小于最大入射孔径角 $\theta_c = 22.7^{\circ}$ 时,光以全反射方式在第一段中沿光纤轴向传播。抽运光进入第二段后,如果在光纤和增益包层溶液界面上的入射角 θ_i 大于临界入射角 $\theta_c = 69.2^{\circ}$, 则抽运光将以受抑全反射方式沿光纤轴向传播。抽运光(脉冲宽度为 7 ns, 波长为 532 nm 的脉冲激光)经焦距等于 20 mm 的透镜会聚后,以 $2\theta_i \approx 29^{\circ}$ ($\theta_i = 80.1^{\circ} > \theta_c$) 的圆锥角沿 F_1 轴线进入石英裸光纤,垂直于光纤轴向的任意截面都构成一个圆形微腔。抽运光在包层溶液中的抽运光倏逝场 E_p 激励染料产生增益,圆形微腔 WGM 倏逝场 E_{WGM} 中的光子在染料增益中产生受激辐射,在微腔 WGM 的支持下形成激光振荡。WGM 激光的光能沿光纤表面垂直于 Z 轴的方向辐射出来,由导光光纤送至光谱采集系统。激光沿 Z 轴的产生长度由一平行于 Z 轴的直尺进行测量。激光的抽运和光谱检测系统见文献[16-18]的详细描述。

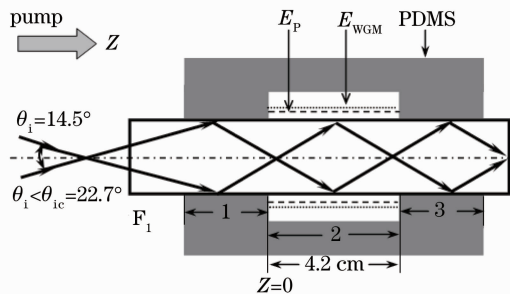


图 2 单波段 WGM 激光器芯片剖面图

Fig. 2 Sectional drawing of single-band WGM laser chip

2.3 实验结果

2.3.1 单一波段 WGM 激光的阈值

在图 2 所示的 PDMS 沟道内注入浓度为 4×10^{-3} mol/L 的罗丹明 B 乙醇溶液。采用沿石英光纤 F_1 (直径为 285 μm) 的轴向 (Z 轴) 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观察,此橙黄光的强度最大,偏离纤轴的垂向强度急剧减弱,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。用 2400 groove/mm 光栅采集到的光谱如图 3 所示,图 3 中右上角的插图是光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 10.1 μJ 时,激光辐射强度急剧增加。10.1 μJ 的抽运能量就是此 WGM 激光器的阈值能量,对应肉眼观察到“耀眼橙黄光”时的抽运能量值。

图 3 所示的 WGM 平均波长间隔为 0.272 nm,对实验使用的直径为 285 μm 的石英光纤,相邻 WGM 激光波长间隔满足近似公式 $\Delta\lambda \approx \lambda^2 / (n_1 \pi D)$,其中 D 和 n_1 分别表示光纤的直径和折射率,由该式计算出相邻 WGM 激光波长间隔为 0.277 nm,理论值略大于实验值是合理的。

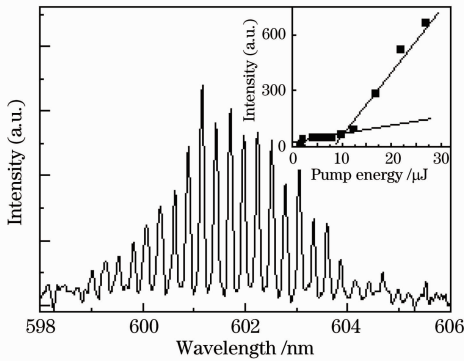


图 3 WGM 激光光谱

Fig. 3 WGM lasing spectrum

2.3.2 WGM 激光产生长度与抽运能量的关系

对于倏逝波激励的光纤 WGM 激光器,激光沿光纤轴向的产生长度随抽运能量的变化关系是三波段激光器设计的关键问题^[18]。在图 2 所示的 PDMS 沟道内注入浓度为 4×10^{-3} mol/L 的罗丹明 B 乙醇溶液,研究了本文所述芯片系统的产生长度随抽运能量的变化关系。

图 4 是在不同抽运能量下的 WGM 激光产生长度的实物图像(抽运光方向即图 2 所示的 Z 轴方向);图 5 是 WGM 激光产生长度随抽运能量的变化关系,其中 η_p 表示光纤外抽运光占抽运总强度的比例。由图 4 和图 5 可知,本文所述系统和文献^[16-18]所述系统具有相似的特点,即 WGM 激光的产生长度随抽运能量的增加并非呈线性关系,而

是在抽运能量较低时,激光的产生长度随能量的增加迅速增大,在激光产生长度达到一定值后,激光的产生长度随能量的增加而迅速增大的趋势变缓,继续增大能量并不能显著增加激光的产生长度。

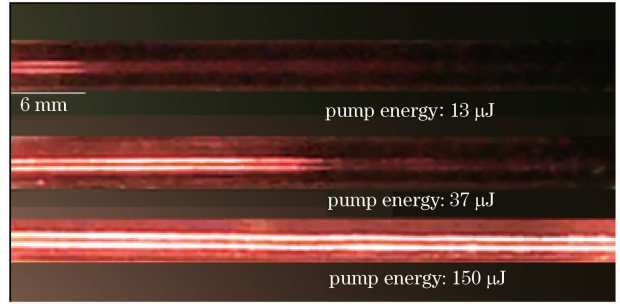


图 4 不同抽运能量下单波段 WGM 激光辐射图

Fig. 4 Single-band WGM lasing emission picture for different pumping energies

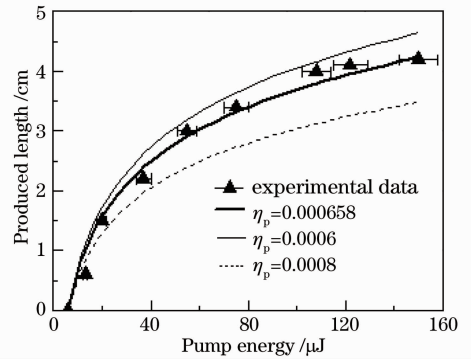


图 5 单波段 WGM 激光产生长度随抽运能量的变化

Fig. 5 Single-band WGM lasing produced length versus pump energy

2.3.3 三波段 WGM 激光辐射

在图 1 所示的光纤沟道中分段填入浓度分别为 8×10^{-3} 、 4×10^{-3} 、 1×10^{-3} mol/L 的罗丹明 640、罗丹明 B 以及罗丹明 6G 的乙醇溶液(浓度的选择与各种染料的荧光量子效率有关^[20]),采用沿光纤轴向倏逝波光抽运方式(抽运光方向为图 2 所示的 Z 轴方向),当抽运能量为 5 μJ 时,沿光纤轴向只能观察到暗黄色的荧光辐射,如图 6(a)所示;但是,当抽运能量增加到 150 μJ 时,沿光纤轴向就能观察到耀眼的红、橙、黄三色激光辐射,如图 6(b)所示。

用 150 groove/mm 的光栅采集到的低分辨率的荧光和激光光谱如图 7 所示。

为了研究三色 WGM 激光的结构,用 2400 groove/mm 的光栅采集到较高分辨率的 WGM 激光光谱,在 628~634 nm (红色)、590~597 nm (橙色)和 564~572 nm (黄色)三个波段的光谱图分别如图 8(a)~(c)所示。

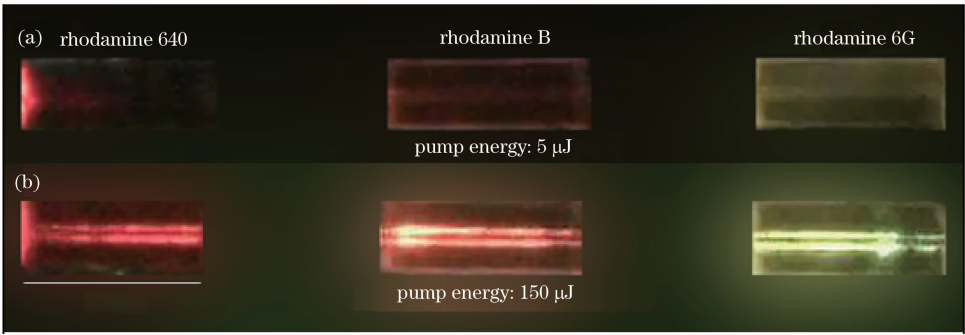


图 6 倏逝波激励的(a)WGM 荧光和(b)三色激光辐射实物图

Fig. 6 Pictures of (a) WGM fluorescence and (b) tricolor laser emission stimulated by evanescent wave

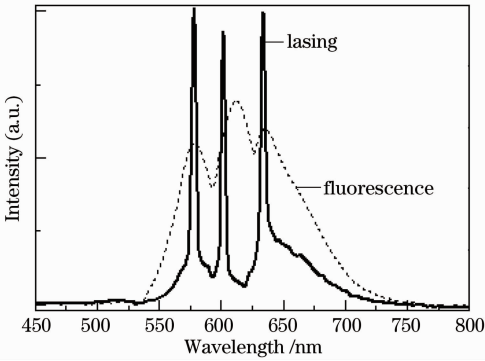


图 7 低分辨率的 WGM 荧光和三色激光辐射光谱

Fig. 7 Low-resolution WGM fluorescence and tricolor laser spectra

由图 8 可知,随着 WGM 激光波长的蓝移,相邻 WGM 间隔不断变小,图 8(a)~(c)对应的平均模式间隔分别为 0.301、0.270、0.253 nm,而由 $\Delta\lambda \approx \lambda^2 / (n_1 \pi D)$ 计算的理论结果分别为 0.305、0.277、0.256 nm,实验和理论结果基本一致。

4 WGM 激光产生长度的理论分析

4.1 增益沿光纤的轴向分布

对于轴向倏逝波激励增益的 WGM 激光,增益沿光纤轴向的总增益可以表示为^[17-18]

$$G = \frac{CN_0 \lambda_p \epsilon_{p0}}{4\pi [(n_1^2 \sin^2 \theta_t - n_2^2)^{1/2} + \lambda_p \alpha_{abs,out}^p]}, \quad (1)$$

式中, C 是一个由抽运光的耦合效率及染料分子的荧光量子效率等共同确定的常数, N_0 是染料分子的浓度, λ_p 是抽运光在真空中的波长, ϵ_{p0} 是抽运光在 $Z=0$ 处的抽运能量, $n_1 = 1.458$ 为光纤的折射率, $n_2 = 1.362$ 为增益包层溶液的折射率, θ_t 为抽运光在光纤界面的全反射角, $\alpha_{abs,out}^p$ 是抽运光在染料溶液中的吸收系数。由于抽运光的倏逝场处于吸收介质中,抽运光以受抑全反射的方式沿光纤轴向传播,抽运能量沿光纤轴向是不断衰减的。设衰减规律满足

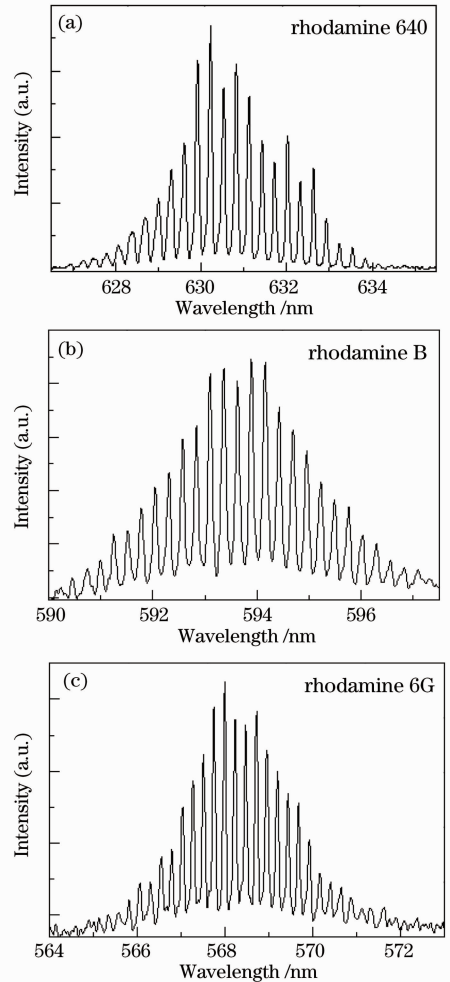


图 8 WGM 三色激光辐射光谱

Fig. 8 Tricolor WGM laser spectra

比尔定律: $\epsilon_p(Z) = \epsilon_{p0} \exp(-\alpha_{abs}^p Z)$, 其中 α_{abs}^p 为抽运光的吸收系数,由抽运光在光纤中的吸收系数 $\alpha_{abs,in}^p$ 和在染料中的吸收系数 $\alpha_{abs,out}^p$ 两部分组成。设 η_p 为抽运光在光纤外以及光纤内外的强度之比,则 $\alpha_{abs}^p = \eta_p \alpha_{abs,out}^p + (1 - \eta_p) \alpha_{abs,in}^p$, 以 $\epsilon_p(Z)$ 代替(1)式中的 ϵ_{p0} 得到增益沿光纤轴向的分布满足

$$G = \frac{CN_0 \lambda_p \epsilon_{p0}}{4\pi[(n_1^2 \overline{\sin^2 \theta_t} - n_2^2)^{1/2} + \lambda_p \alpha_{\text{abs},\text{out}}^p]} \times \exp\{-[\eta_p \alpha_{\text{abs},\text{out}}^p + (1 - \eta_p) \alpha_{\text{abs},\text{in}}^p]Z\}. \quad (2)$$

由于采用的抽运光是聚焦后的高斯光束,界面全反射角 θ_t 并非单一角度,而是一个由入射光束的强度分布决定的函数,所以,在(2)式的合理计算中,应该用 $\sin^2 \theta_t$ 的统计平均值 $\overline{\sin^2 \theta_t}$ 代替 $\sin^2 \theta_t$,即

$$\overline{\sin^2 \theta_t} = \int_{\theta_t^{\min}}^{\pi/2} f(\theta_t) \sin^2 \theta_t d\theta_t,$$

$f(\theta_t)$ 表示光束在光纤内的角度分布函数,可用下式计算^[17]:

$$f(\theta_t) = f_0 \exp\left(-\frac{\cos^2 \theta_t}{\cos^2 \theta_t^{\min}} \cdot \frac{1 - n_1^2 \cos^2 \theta_t^{\min}}{1 - n_1^2 \cos^2 \theta_t}\right), \quad (3)$$

式中 f_0 为归一化常数,可由 $\int_{\theta_t^{\min}}^{\pi/2} f(\theta_t) d\theta_t = 1$ 确定。图

9 为 $f(\theta_t)$ 随 θ_t 的变化关系曲线,其中 $\theta_t^{\min} = 87.4^\circ$ 、 83.2° 、 80.1° 分别对应 $\theta_i = 3.8^\circ$ 、 10° 、 14.5° 。

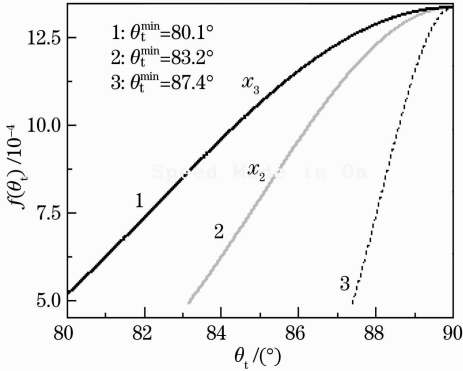


图 9 $f(\theta_t)$ 随 θ_t 的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of $f(\theta_t)$ with θ_t

由图 9 可知: 1) 抽运光为高斯光束,则抽运光在光纤内随 θ_t 的分布同样也满足高斯分布,分布函数的最大值位于 $\theta_t = \pi/2$ 位置,表示大部分抽运光都不能对倏逝场产生有效贡献; 2) 抽运光在光纤端面的入射角 (θ_i) 越大(即 θ_t^{\min} 越小),分布函数曲线越向 θ_t 的小角度方向移动,表示 θ_t 的大角度入射有利于抽运光的倏逝场穿透到包层染料溶液中。上述结果可用于指导实验选择适当的入射角度,以便获得实验所需的激光增益。

4.2 激光的损耗

倏逝波激励的 WGM 激光器,总损耗主要由三部分组成^[18],即 $\alpha_{\text{total}} = \alpha_{\text{abs}} + \alpha_{\text{leak}} + \alpha_{\text{sca}}$,其中 α_{abs} 、 α_{leak} 和 α_{sca} 分别是吸收损耗、由 WGM 激光辐射引起的泄漏和散射损耗。微腔的损耗可以用微腔品质因素 Q 表示为: $Q_{\text{total}}^{-1} = Q_{\text{abs}}^{-1} + Q_{\text{leak}}^{-1} + Q_{\text{sca}}^{-1}$,其中 Q_{abs} 、 Q_{leak} 和 Q_{sca} 分别是损耗 α_{abs} 、 α_{leak} 和 α_{sca} 所对应的 Q 值。由于实验中使用的光纤直径为 $285 \mu\text{m}$,增益包层溶液折射率为 1.362,由文献^[18]的计算结果知, Q_{leak} 和 Q_{sca} 均大于 10^{10} ,而 $Q_{\text{abs}} \approx 10^6$,所以,对于本文所述的光学系统,微腔的损耗可近似为 $\alpha_{\text{total}} \approx \alpha_{\text{abs}}$ 。

和抽运光的强度由两部分组成类似,WGM 激光的模场也由微腔内场 ($r \leq a$) 和微腔外场 ($r \geq a$,倏逝场) 两部分组成。设倏逝场与总模场的体积之比为 η_{WGM} ,则微腔总损耗可表示为

$$\alpha_{\text{total}} \approx \eta_{\text{WGM}} \alpha_{\text{abs}}^{\text{out}} + (1 - \eta_{\text{WGM}}) \alpha_{\text{abs}}^{\text{in}}, \quad (4)$$

式中, $\alpha_{\text{abs}}^{\text{out}}$ 和 $\alpha_{\text{abs}}^{\text{in}}$ 分别表示 WGM 模式的共振波长在增益包层溶液和在光纤中的吸收系数。

4.3 激光的阈值条件及产生长度

WGM 激光沿光纤轴向的终极长度点 (Z_{max}) 对应的阈值条件: $G(Z_{\text{max}}) = \alpha_{\text{total}}$,联立(2)、(4)两式得到抽运能量 $[\epsilon_{p0}^{\text{th}}(Z_{\text{max}})]$ 的表达式:

$$\epsilon_{p0}^{\text{th}}(Z_{\text{max}}) = \frac{4\pi[(n_1^2 \overline{\sin^2 \theta_t} - n_2^2)^{1/2} + \lambda_p \alpha_{\text{abs},\text{out}}^p][\eta_{\text{WGM}} \alpha_{\text{abs}}^{\text{out}} + (1 - \eta_{\text{WGM}}) \alpha_{\text{abs}}^{\text{in}}]}{CN_0 \lambda_p \exp\{-[\eta_p \alpha_{\text{abs},\text{out}}^p + \alpha_{\text{abs},\text{in}}^p(1 - \eta_p)]Z_{\text{max}}\}} = \epsilon_{p0}^{\text{th}}(0) \exp\{[\eta_p \alpha_{\text{abs},\text{out}}^p + \alpha_{\text{abs},\text{in}}^p(1 - \eta_p)]Z_{\text{max}}\}. \quad (5)$$

由(5)式可得 WGM 激光的产生长度 Z_{max} 为

$$Z_{\text{max}} = \frac{\ln[\epsilon_{p0}^{\text{th}}(Z_{\text{max}})] - \ln[\epsilon_{p0}^{\text{th}}(0)]}{\eta_p \alpha_{\text{abs},\text{out}}^p + \alpha_{\text{abs},\text{in}}^p(1 - \eta_p)}. \quad (6)$$

对实验所用的石英光纤,在可见光范围内每米透射率为 $97\% \sim 99\%$,由比尔定律计算出 $\alpha_{\text{abs},\text{in}}^p \approx 0.0002 \text{ cm}^{-1}$, $\alpha_{\text{abs},\text{out}}^p = N_0 \sigma_{\text{abs}}$, $N_0 = 4 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 为染料分子的浓度, σ_{abs} 为罗丹明 B 的受激吸收截面,由文献^[20]可知, $\sigma_{\text{abs}} = 0.385 \times 10^{-20} \epsilon$, ϵ 为罗丹

明 B 的消光系数,由文献^[20]查表知罗丹明 B 在 532 nm 处的消光系数 $\epsilon = 43000 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$,通过计算得 $\alpha_{\text{abs},\text{out}}^p = 398.524 \text{ cm}^{-1}$ 。对实验所需的多模光纤,目前还不能精确得到 η_p 的解析值,通过拟合的方法对 η_p 进行求解,即取一系列 η_p 值代入(6)式,得到 Z_{max} 随 $\epsilon_{p0}^{\text{th}}(Z_{\text{max}})$ 变化的曲线族,与实验数据吻合最好的曲线对应的 η_p 即为 η_p 的真实值。如图 5 所示,0.00192 即为本文中 η_p 的真实值。由图 5

可以看出,理论计算与实验数据基本吻合,说明对本文所述光学系统物理机制的理解是正确的。

5 结 论

介绍了一种以 PDMS 基片为基底,倏逝波激励及增益耦合的 WGM 光纤激光器。这类激光器容易实现微型化,稳定性好且沿光纤轴向具有较长的激光产生长度。利用上述特点,在同一块 PDMS 芯片上同时实现了红、橙、黄三色激光辐射。本文所述实验系统可为“芯片上的实验室”提供一种低阈值的激光光源。所得实验结果在光流控装置中的激光或荧光辐射源方面具有重要的潜在应用价值。

参 考 文 献

- 1 D Psaltis, S R Quake, C Yang. Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics[J]. *Nature*, 2006, 442(7101): 381-386.
- 2 C Monat, P Domachuk, B J Eggleton. Integrated optofluidics: A new river of light [J]. *Nature Photon*, 2007, 1(2): 106-114.
- 3 H Schmidt, A R Hankins. The photonic integration of non-solid media using optofluidics [J]. *Nature Photon*, 2011, 5(10): 598-604.
- 4 Y Z Sun, S I Shopova, C S Wu, *et al.*. Bioinspired optofluidic FRET lasers via DNA scaffolds[J]. *PNAS*, 2010, 107(37): 16039-16042.
- 5 X D Fan, I M White. Optofluidic microsystems for chemical and biological analysis[J]. *Nature Photon*, 2011, 5(10): 591-597.
- 6 L He, S K Özdemir, J Zhu, *et al.*. Detecting single viruses and nanoparticles using whispering gallery microlasers[J]. *Nature Nanotechnol*, 2011, 6(7): 428-432.
- 7 B Helbo, A Kristensen. A micro-cavity fluidic dye laser[J]. *J Micromech Microeng*, 2003, 13(3): 307-311.
- 8 D V Vezonov, B T Mayers, R S Conroy, *et al.*. A low-threshold, high-efficiency microfluidic waveguide laser[J]. *J Am Chem Soc*, 2005, 127(25): 8952-8953.
- 9 S Balelev, A Kristensen. Microfluidic single-mode laser using high-order bragg grating and antiguiding segments[J]. *Opt Express*, 2005, 13(1): 344-351.
- 10 J C Galas, J Torres, M Belotti, *et al.*. Microfluidic tunable dye laser with integrated mixer and ring resonator[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(26): 264101.
- 11 Xiang Wenli, Pu Xiaoyun, Bai Ran, *et al.*. Longitudinal evanescent-wave pumped whispering gallery mode fiber 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.
- 12 Zhang Yuanxian, Pu Xiaoyun, Zhu Kun, *et al.*. Threshold characteristics of evanescent-wave pumped whispering-gallery-mode fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(5): 3179-3184.
张远宪,普小云,祝 昆,等. 回音壁模式光纤激光器的阈值特性研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(5): 3179-3184.
- 13 Zhang Yuanxian, Feng Yongli, Zhou Li, *et al.*. Radiation properties of a whispering-gallery-mode fiber laser based on skew light pumping[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 1806-1813.
张远宪,冯永利,周 丽,等. 偏斜光线抽运下的回音壁模式光纤激光辐射特性[J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 1806-1813.
- 14 Zhang Yuanxian, Han Deyu, Zhu Kun, *et al.*. Wavelength shift of whispering gallery mode fiber laser caused by fiber cladding refractive index[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 36(3): 691-694.
张远宪,韩德昱,祝 昆,等. 包层介质引起的回音壁模式光纤激光波长漂移[J]. *中国激光*, 2010, 36(3): 691-694.
- 15 L Zhou, H H You, X Y Pu. Broadening free spectral range of an evanescent-wave pumped whispering-gallery-mode fibre laser by vernier effect[J]. *Opt Commun*, 2011, 284(13): 3387-3390.
- 16 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. 影响柱形微腔回音壁模激光抽运阈值能量的因素[J]. *中国激光*, 2008, 35(5): 660-663.
- 17 Zhang Yuanxian, Feng Li, Liu Chun, *et al.*. Gain calculation of a fiber whispering gallery mode laser pumped by evanescent waves[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0214001.
张远宪,冯 黎,刘 春,等. 倏逝波抽运的回音壁模式激光增益计算[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0214001.
- 18 Y. X. Zhang, X. Y. Pu, K. Zhu, *et al.*. Threshold property of whispering-gallery-mode fiber lasers pumped by evanescent-wave [J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(8): 2048-2056.
- 19 Pu Xiaoyun, Jiang Nan, Bai Ran, *et al.*. A Novel Micro-Cavity Diber Laser with Multi-Wavelength WGM Lasing Emission in a Single Optical Fiber; Chinese Patent No. ZL200810058304[P]. 30 Sep. 2009.
普小云,江 楠,白 然,等. 倏逝波激励及增益耦合的多波段回音壁模式光纤激光器; 中国专利,专利号:ZL200810058304[P]. 2009年9月30日.
- 20 U Brackmann. *Lambda Chrome Laser Dyes* [M]. Gottinger: Lambda Physik, 1986.

栏目编辑: 张 腾