

基于光微流单模激光的液体折射率测量

韩超*, 邱诚玉, 侯梦迪, 张婷婷, 王文杰

太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西, 太原 030024

摘要 制备了高品质因子的法布里-珀罗(F-P)光学微腔,采用溶于液体的有机染料罗丹明6G(R6G)作为增益介质,实现了单模光微流激光的产生,激光的半峰全宽为0.260 nm。在水的摩尔分数分别为1.09%,5.98%,11.91%,20.42%,30.75%,45.27%,51.89%的不同混合物溶剂(无水乙醇和去离子水)中实现了单模激光的产生,发现随着含水量的增加,中心波长向长波长方向移动,而当水的摩尔分数超过45.27%后,单模激光的中心波长开始向短波长方向移动。并根据单模激光波长的移动实现了混合溶液折射率的测量。测量结果及分析表明:最小可测量的折射率差值为 6.31×10^{-4} ,测量灵敏度为411 nm/RIU(RIU为单位折射率),并对测量的结果及误差进行了分析。

关键词 激光器;单模激光;折射率测量;法布里-珀罗微腔;光微流激光

中图分类号 TN248.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081401

Measurement of Liquid Refractive Index Based on Optofluidic Single Mode Laser

Han Chao*, Qiu Chenyu, Hou Mengdi, Zhang Tingting, Wang Wenjie

Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract To achieve single-mode optical microfluidic laser, we prepare Fabry-Perot(F-P) optical microcavity with high quality factor and use the organic dye Rhodamine 6G (R6G) dissolved in liquid as gain medium. The full width at half maximum of laser output is 0.260 nm. In the following experiments, the generation of single-mode lasers in different mixed solutions (absolute ethanol and deionized water) with water molar fractions of 1.09%, 5.98%, 11.91%, 20.42%, 30.75%, 45.27%, 51.89% is achieved, respectively. It is found that the center wavelength of the single-mode laser moves toward long wavelength as water contents increasing. However, when the water molar fraction exceeds 45.27%, the center wavelength of the single-mode laser starts to move toward the short wavelength. Measurement of mixed solution refractive index is realized by single-mode laser wavelength movement. It is found that with the increase of water content, the measurement and analysis of the refractive index of the mixed solution show that the minimum measurable difference of refraction indexes is 6.31×10^{-4} and the measurement sensitivity is 411 nm/RIU, in which RIU is refractive index unit. The measured refractive index results and errors are analyzed.

Key words lasers; single-mode laser; refractive index measurement; Fabry-Perot microcavity; optical microfluidic laser

OCIS codes 140.2050; 140.3570; 140.3945

1 引言

折射率传感器在各个方面有广泛的应用,其中光学折射率传感器具有较高的检测灵敏度和较低的检测极限^[1]。典型的光学折射率传感器包括等离子体

传感器、二维光子晶体传感器、长周期光纤光栅传感器和各种形式的环形传感器^[2-3]。这类光学传感器通过光学本征模式的偏移实现对折射率的测量^[4],当周围折射率发生改变时,器件本征模的波长或频率发生偏移。这类传感器一般被称为无源传感器,需通过外

收稿日期: 2018-02-11; 修回日期: 2018-03-25; 录用日期: 2018-03-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61471254)、山西省自然科学基金(201601D011010)

* E-mail: 15735654936@163.com

界抽运源激发器件的振荡模式。受限于其庞大的抽运源、复杂的耦合输入和耦合输出结构,研究者们开始进行有源光学折射率传感器的研究^[5]。这类器件的传感信号由器件本身的增益介质产生,相比无源传感器,它无需外界庞大的抽运源及复杂的信号耦合系统,如基于荧光的折射率传感器^[6-8]。但是在这类器件中,由于增益介质的存在,器件往往具有较低的品质因子和较大的模式宽度,一定程度上限制了器件的检测灵敏度^[9]和检测极限。

相比于荧光^[10],激光具有更窄的模式宽度、更高的信号强度和信噪比^[11],因此基于激光的折射率传感器具有较显著的优势。其中,光微流激光(optofluidic laser)是近几年发展起来的一种芯片式传感器,它是采用有机染料作为增益介质、光学微腔作为激光谐振腔,同时结合微流控技术,在集成化相干光源^[12]及基于激光信号的生物化学检测等方面有广泛应用,具有样品用量少、检测灵敏度高等特点^[13-16]。基于光微流激光的折射率传感器采用多模激光信号作为传感信号时,存在模式串扰、模式竞争等缺点^[17]。

本文主要设计研究了一种单模光微流激光器,通过单模激光波长的移动实现对不同液体折射率的测量。实验中采用高品质因子的平凹型法布里-珀罗(F-P)微腔作为激光谐振腔和微流体通道,腔长为

$3.5 \mu\text{m}$;有机染料罗丹明 6G(R6G)作为增益介质,去离子水和无水乙醇的混合物作为溶剂;采用单脉冲抽运方式,实现了半峰全宽(FWHM)约为 0.260 nm 的单模激光出射。并根据不同混合溶剂中单模激光中心波长的移动,实现了对混合溶剂的液体折射率测量,最小可测量的折射率差值为 6.31×10^{-4} 。

2 实验部分

实验中,采用 F-P 微腔作为光微流激光谐振腔,腔镜由两片镀有高反射率介质膜的镜片组成,介质膜由 15 对 SiO_2 和 Ta_2O_5 介质层交替组成,中心波长 570 nm 附近的反射率大于等于 99.9% 。采用旋涂仪制备的 $3.5 \mu\text{m}$ 厚的聚二甲基硅氧烷(PDMS)有机物薄膜作为两个腔镜的隔垫,使得 F-P 微腔的几何腔长 $L = 3.5 \mu\text{m}$,同时利用夹具从外部固定 F-P 微腔,具体结构如图 1(a)所示。微流通道的长和宽分别为 10 mm 和 1 mm ,在两个反射镜的周围分别制备微流通道中液体样品的入口和出口,利用注射泵把溶于液体溶剂中的 R6G 增益介质注入微流通道及 F-P 激光腔内,并保持液体流速为 6 mm/s 。微流腔内液体样品的总体积 $V = 10 \times 1 \times 3.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 = 35 \text{ nL}$ 。采用溶于溶剂(无水乙醇与去离子水的混合液)的有机染料 R6G 作为激光增益介质,染料的浓度为 1 mmol/L 。

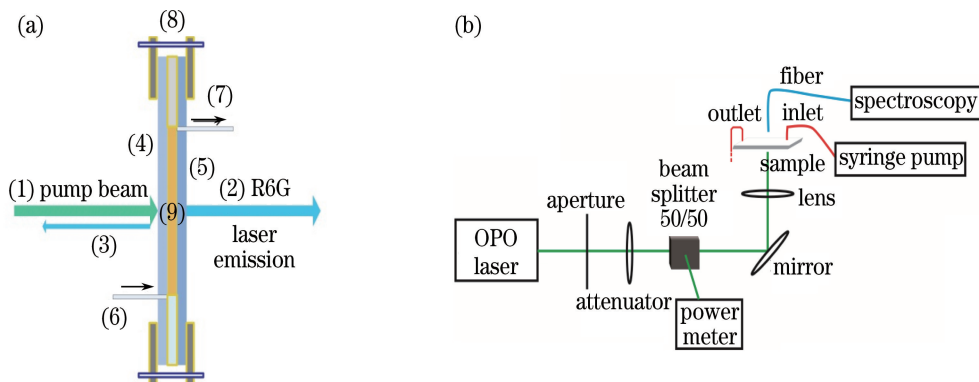


图 1 (a) F-P 微腔结构装置图:(1)激光抽运光束(532 nm), (2) R6G 激光发射正向, (3) R6G 反向激光发射, (4) 镜子 #1, (5) 镜子 #2, (6) 进管, (7) 出管, (8) 夹具, (9) R6G 溶液通道; (b) 光微流激光产生实验装置图

Fig. 1 (a) Diagram of F-P microcavity structure: (1) laser pump beam (532 nm), (2) R6G forward laser emission, (3) R6G backwards laser emission, (4) mirror #1, (5) mirror #2, (6) inlet, (7) outlet, (8) fixture, (9) R6G solution channel; (b) experimental setup for optofluidic laser generation

激光抽运实验装置如图 1(b)所示。实验中采用纳秒脉冲激光器(OPO,脉宽 5 ns ,频率 20 Hz ,抽运波长 532 nm)作为抽运源。抽运光分别经过衰减片和 $50:50$ 的分光棱镜后,经由焦距 $f = 50 \text{ mm}$ 的透镜入射到 F-P 微腔中,聚焦光斑尺寸约为

$100 \mu\text{m}$ 。衰减片和光功率计分别用于调节和记录抽运光能量。从 F-P 微腔中出射的光微流激光信号经由光纤直接传输到光谱仪中进行记录分析。实验中,F-P 微流芯片放置在三维平移台上,通过调节平移台使得抽运光的焦点位于 F-P 微腔中,以保证

在相同抽运光条件下激光出射信号最大。

实验中为减少温度对液体折射率的影响,液体溶剂在注入之前在常温 24 °C 下保存,并保持实验室工作环境在 24 °C。液体溶剂以 6 mm/s 的速率持续快速通过 F-P 微激光腔(或聚焦光斑抽运区域,聚焦光斑尺寸约为 100 μm)。同时采用 5 ns 的单脉冲抽运进行激光出射实验,即液体样品及时更新(6 mm/s 的流速持续更新)后,抽运激光与液体增益介质的作用时间仅为 5 ns,并且相邻数据点的采集时间为 10 min。在此实验条件下,激光本身产生的热效应对混合溶液折射率及波长造成的影响可忽略不计。

为得到不同折射率的样品溶液,实验中采用无水乙醇和去离子水的混合液作为有机染料 R6G 的溶剂。实验中制备了纯的无水乙醇溶液和 7 种含水量不同的混合物溶剂。其中混合液中水的摩尔分数为 $X\%$,无水乙醇的摩尔分数为 $(100-X)\%$ 。为了与文献[18]的测量结果形成对比, X 分别取 0, 1.09, 5.98, 11.91, 20.42, 30.75, 45.27, 51.89。

3 结果与讨论

首先研究了 F-P 微腔中单模激光的出射情况。采用的液体溶剂为纯的无水乙醇,购置的无水乙醇常温 $T=24$ °C 下的折射率 $n_0=1.360000$ (Sigma 公司提供参数)。R6G 溶于无水乙醇中,浓度为 1 mmol/L。图 2 为 F-P 微腔中出射的激光光谱图,从图中可以看出实验得到了较好的单模激光出射,中心波长 $\lambda_0=560.048$ nm。单模激光的实现是因为采用了腔长比较短的激光谐振腔,即 $L=3.5$ μm。F-P 微腔激光器中出射的单模激光中心波长 λ 、溶剂折射率 n 及微腔腔长 L 的关系可表示为

$$m\lambda = 2nL, \quad (1)$$

式中: m 为出射的激光模式数。图 2 的实验结果采用纯的无水乙醇溶液作为溶剂,将以上参数代入(1)式,可计算出激光模式数 $m=17$ 。单模激光光谱只有一个模式存在,当液体的折射率 n 发生改变时,激光的模式数将保持不变,而出射的单模激光的中心波长会发生移动。因此通过测量不同折射率溶液下出射的单模激光中心波长,结合(1)式可以得到相应的折射率大小:

$$n = \frac{n_0\lambda}{\lambda_0}. \quad (2)$$

因此可以通过单模激光中心波长的移动,实现对液体折射率的测量。实验中当溶液的折射率 n 发生

改变时,单模激光中心波长 λ 的移动量 $\Delta\lambda$ 可表示为

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta n 2L}{m} = \frac{\Delta n \lambda_0}{n_0}. \quad (3)$$

根据光谱理论可知,最小可分辨的光谱移动量 $\delta\lambda$ 等于光谱的 FWHM。实验中,对图 2 中的单模激光光谱进行高斯拟合可以得到单模激光的 FWHM 为 0.260 nm。结合(3)式可以计算出采用激光光谱移动的方法能够测量的最小折射率差值 $\delta n = 6.31 \times 10^{-4}$ 。

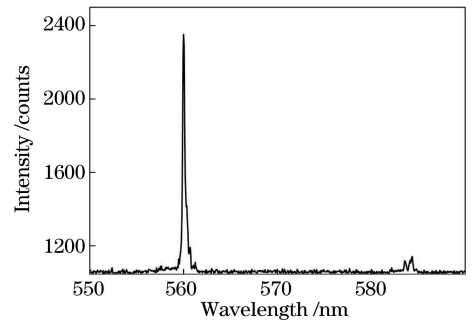


图 2 $T=24$ °C 下,纯的无水乙醇溶液中单模激光光谱图(水的摩尔分数为 0)

Fig. 2 Single-mode laser spectrum in pure absolute ethanol (water molar fraction of 0) at $T=24$ °C

随后,制备一系列含水量不同的混合物溶液,从而得到一系列不同折射率的混合溶液,并保持混合溶液中有有机染料 R6G 的浓度为 1 mmol/L。从(1)式可以看出,F-P 谐振腔中溶液的折射率 n 发生变化时,其谐振波长 λ 也将发生移动。根据文献[18]的结果可知,在一定范围内,随着含水量的增加,无水乙醇和去离子水混合溶液的折射率也将增加,使得谐振波长向长波长方向移动;而当混合溶剂中水的摩尔分数超过 45.27%,混合溶剂的折射率会随之降低,因此激光谐振波长开始向短波长方向移动。图 3(a)给出了混合液中水的摩尔分数分别为 1.09%, 5.98%, 11.91%, 20.42%, 30.75%, 45.27%, 51.89% 时,出射的单模激光光谱图。从图中可以看出:随着含水量的增加,单模激光的中心波长向长波长方向移动;而当含水量超过一定数值后,单模激光的中心波长开始向短波长方向移动,这与上述分析结果一致。从图中还可以看出:含水量相邻的两种溶液中,激光波长移动量不尽相同,这主要是由于不同含水量的混合物溶液所对应的折射率差值大小不同。

为了保持实验数据的重复性与稳定性,对每一种混合物溶液中产生的激光光谱进行 7 次测量,即每间隔 10 min 采用单脉冲抽运产生一次单模激光,

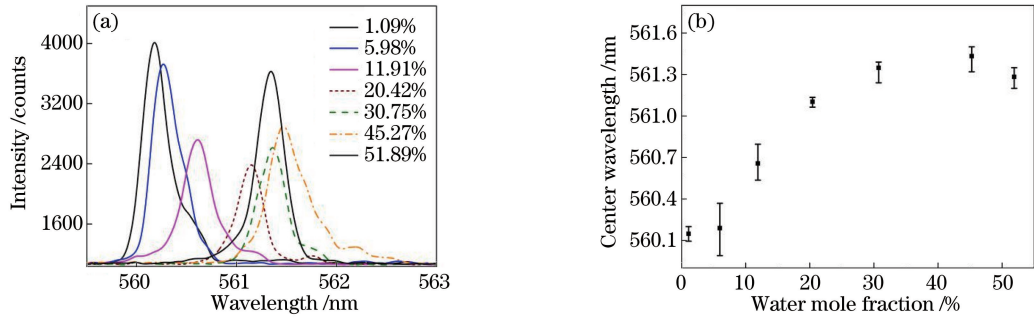


图3 (a) 7种水的摩尔分数分别为1.09%, 5.98%, 11.91%, 20.42%, 30.75%, 45.27%, 51.89%的混合溶液下单模激光的出射光谱图; (b) 不同混合溶液下测量的平均单模激光中心波长及对误差范围

Fig. 3 (a) Spectra of single-mode laser emission in seven kinds of mixtures with water mole fractions of 1.09%, 5.98%, 11.91%, 20.42%, 30.75%, 45.27%, 51.89%; (b) mean single-mode laser center wavelength and corresponding error range measured in different mixed solutions

并对光谱进行一次采集。随后对7次采集光谱的中心波长进行求和、取平均值,得到的数据作为实验中测量的单模光谱的中心波长。如图3(b)所示,给出了不同混合物浓度下测得的激光中心波长。其中方块表示测量波长的平均值,随着混合物中含水量的增加,中心波长分别为560.148, 560.189, 560.657, 561.103, 561.349, 561.433, 561.283 nm;每个方点上的竖线表示误差范围,即波长单次测量值相对于平均值的波动范围。同一混合物溶液中单模激光中心波长的移动可能是由于激光芯片的不稳定性及环境温度扰动造成的。同时,分析不同混合物溶液中产生的单模激光光谱的FWHM,得到不同含水量混合溶剂中单模激光的FWHM约为0.260 nm,与图2中(无水乙醇作为溶剂)得到光谱的FWHM相同。因此,根据(3)式可以计算出可测量的最小折射率差值为 6.31×10^{-4} ,与前面计算结果相同。从图3(b)可以看出:水摩尔分数为5.98%时相对于1.09%时的平均波长移动约为0.041 nm,小于最小波长移动范围 $\delta\lambda$ (0.260 nm),因此波长的测量具有更大的误差(相比于其他混合液情况)。

结合图3的测量结果及(2)式计算出了不同混合物溶液的折射率值,如图4所示,其中方块表示实验中测得的不同混合物的折射率 n 。随着含水量的增加, n 分别为1.360358, 1.360460, 1.361594, 1.362679, 1.363276, 1.363502, 1.363115;竖线表示测量的折射率的误差范围。圆点表示文献[18]中测得的相应折射率,他们使用阿贝折射仪对水摩尔分数分别为1.09%, 5.98%, 11.91%, 20.42%, 30.75%, 45.27%, 51.89%的去离子水和无水乙醇混合溶液(本实验中保持相同的溶液配比)的折射率进行了测量,折射率值 n_r 分别为1.360225, 1.360851,

1.361684, 1.362532, 1.363277, 1.363516, 1.363249。图4中的插图给出了相同溶液浓度配比下,本实验中测量的折射率与文献[18]中测量的折射率之差即 $n - n_r$,除水摩尔分数为5.98%的溶液具有较大的折射率差值 3.91×10^{-4} 外,其他情况下的折射率差值均小于 1.50×10^{-4} ,但均在可测量的最小折射率差值 6.31×10^{-4} 之内。由此可以看出本实验测量值与文献[18]的测量结果十分相近。

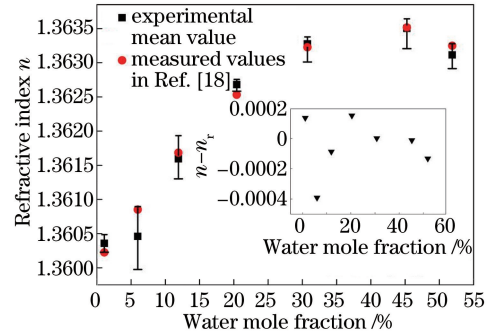


图4 测量计算的7种水的摩尔分数分别为1.09%, 5.98%, 11.91%, 20.42%, 30.75%, 45.27%, 51.89%的混合溶液的折射率(方点)及测量误差。圆点表示文献[18]中的测量值。插图是实验值与文献值的差值

Fig. 4 Measured refractive index (square) and corresponding error of seven kinds of mixed solutions with water mole fractions of 1.09%, 5.98%, 11.91%, 20.42%, 30.75%, 45.27%, 51.89%, respectively. The dots indicate the measured values in Ref. [18]. The illustration is the difference between the experimental values and the literature values

根据图3和图4的测量计算结果,给出了混合物溶液中产生的单模激光的中心波长移动随折射率变化的关系图,如图5所示。其中方点表示测量值,直线表示对测量数据的线性拟合;直线的斜率表示

测量的灵敏度,即单位折射率的变化所引起的波长移动,为 411 nm/RIU(RIU 为单位折射率),与一般基于 F-P 微腔激光的折射率测量灵敏度相近^[17]。文献[17]中测得折射率灵敏度为 514 nm/RIU。

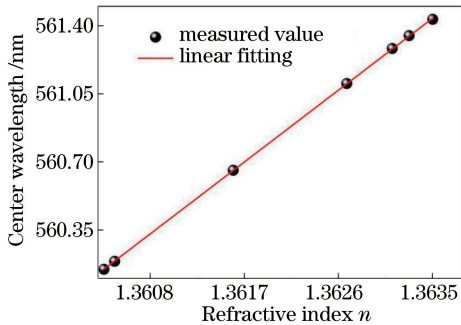


图 5 测量的折射率与单模中心波长的关系

Fig. 5 Relationship between the measured refractive index and the center wavelength of single-mode laser

目前有多种方法可测量液体折射率,常用具有较高配置的阿贝折射仪,可实现 10^{-4} 到 10^{-6} 的折射率测量精度^[18],但不适用于检测微量体积的样品。实验室内可实现液体测量的光学方法中,基于表面等离子共振的折射率传感器可达到 10^{-8} 到 10^{-10} 测量精度^[19],但有比较复杂及操作精度要求很高的信号耦合及信号输出系统;基于光子晶体微腔的液体折射率检测一般在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ RIU^[20];基于回音壁模式微腔^[21],如微环、微盘的折射率检测一般在 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ RIU,但回音壁模式的特点不利于光场信号的输出耦合。以上实验室方法均采用外界光源,如波长可调的激光器作为输入和输出信号。本研究采用微流芯片自身产生的激光信号作为检测信号实现对液体折射率的测量。采用 F-P 微腔可产生方向性较好的激光信号,且利于芯片集成及通量检测。与微流控相结合,特别适用于对微量样品的检测,检测体积可低至几十纳升(见实验装置计算部分),适用于对微量生物、化学样品的折射率检测及基于激光光谱移动的分析。下一步工作中可通过自相关技术进一步降低周围环境、器件本身所引起的折射率和波长漂移及噪声^[21-22],进一步提高折射率检测的精度。

4 结 论

光微流激光在生物化学传感方面有重要的应用,将光微流激光应用于生物化学传感是近年来深受研究者们关注的一个研究方向。本研究制备了高品质因子(反射镜具有高的反射率)的 F-P 光学微

谐振腔,腔长约为 $3.5 \mu\text{m}$;采用有机染料 R6G 作为增益介质,在 532 nm 抽运光的作用下实现了单模激光的产生;随后实现了不同混合物溶液(无水乙醇和去离子水)中单模激光的产生,测量及分析表明最小可测量的折射率差值为 6.31×10^{-4} ,测量灵敏度为 411 nm/RIU。根据单模激光波长的移动实现了对混合溶液折射率的测量,并对测量的结果及误差进行了分析。相比于多模激光,单模激光减少了模式竞争和串扰,具有更高的稳定性。基于实验中制备的 F-P 微腔单模光微流激光,下一步工作还可实现对液体分子浓度等的测量。

参 考 文 献

- [1] Ke L D, Chen W Y, Zhang Y, *et al.* Optimizing design for sensitivity improvement of refractive index sensors based on photonic crystal waveguide [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 052304.
柯林佟, 陈卫业, 张洋, 等. 基于光子晶体波导的折射率传感器的灵敏度优化设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 052304.
- [2] Rong M, Zhang L S. Liquid content measurement with fiber Bragg grating sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(5): 65-68.
荣民, 张连水. 光纤光栅传感器检测液体浓度[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(5): 65-68.
- [3] White I M, Fan X. On the performance quantification of resonant refractive index sensors [J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1020-1028.
- [4] Zhang D Y, Zhao L, Wang X X, *et al.* A refractive index sensor based on composite structure of dielectric grating with metal films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1124001.
张东阳, 赵磊, 王向贤, 等. 一种基于介质光栅金属薄膜复合结构的折射率传感器[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1124001.
- [5] Reynolds T, Riesen N, Meldrum A, *et al.* Fluorescent and lasing whispering gallery mode microresonators for sensing applications [J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2017, 11(2): 1600265.
- [6] François A, Riesen N, Hong J, *et al.* Polymer based whispering gallery mode laser for biosensing applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(3): 60-82.
- [7] Wienhold T, Kraemmer S, Wondimu S F, *et al.* All-polymer photonic sensing platform based on whispering-gallery mode microgoblet lasers [J]. *Lab*

- on A Chip, 2015, 15(18): 3800-3806.
- [8] Afshar V S, Henderson M R, Greentree A D, *et al.* Self-formed cavity quantum electrodynamics in coupled dipole cylindrical-waveguide systems [J]. Optics Express, 2014, 22(9): 11301-11311.
- [9] Liang H Q, Liu B, Chen J, *et al.* High sensitive elliptic side core surface plasmon resonance refractive index sensing characteristics based on dual-core photonic crystal fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090601.
梁红勤, 刘彬, 陈佳, 等. 基于双芯光子晶体光纤的高灵敏度椭圆侧芯表面等离子体共振折射率传感特性[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 090601.
- [10] Zhang X H, Liu C, Liang C, *et al.* Microlens array applied for laser induced fluorescence detection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 080402.
张学海, 刘冲, 梁超, 等. 应用于激光诱导荧光检测的微透镜阵列[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 080402.
- [11] Shi S X, Yang Q W, Ouyang X P, *et al.* Measurement technique of signal noise ratio based on resonator oscillation for femtosecond single-shot pulse [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0904001.
石帅旭, 杨庆伟, 欧阳小平, 等. 谐振腔振荡式飞秒单次脉冲信噪比的测量技术[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904001.
- [12] He Y L, Chen Z Y, Wu F T. Effects of coherent and incoherent light sources on resolution of Bessel beam imaging system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 090301.
何艳林, 陈姿言, 吴逢铁. 相干和非相干光源对贝塞尔光束成像系统分辨率的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 090301.
- [13] Psaltis D, Quake S R, Yang C. Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics [J]. Nature, 2006, 442(7101): 381-386.
- [14] Chen Y, Lei L, Zhang K, *et al.* Optofluidic microcavities: dye-lasers and biosensors [J]. Biomicrofluidics, 2010, 4(4): 043002.
- [15] Gather M C, Yun S H. Single-cell biological lasers [J]. Nature Photonics, 2011, 5(7): 406-410.
- [16] Lee W, Li H, Suter J D, *et al.* Tunable single mode lasing from an on-chip optofluidic ring resonator laser [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(6): 061103.
- [17] Lahoz F, Martin I R, Gil-Rostra J, *et al.* Portable IR dye laser optofluidic microresonator as a temperature and chemical sensor [J]. Optics Express, 2016, 24(13): 14383-14392.
- [18] Rioboo R J, Philipp M, Ramos M A, *et al.* Concentration and temperature dependence of the refractive index of ethanol-water mixtures: influence of intermolecular interactions [J]. The European Physical Journal E, Soft matter, 2009, 30(1): 19-26.
- [19] Ng S P, Loo F C, Wu S Y, *et al.* Common-path spectral interferometry with temporal carrier for highly sensitive surface plasmon resonance sensing [J]. Optics Express, 2013, 21(17): 20268-20273.
- [20] Jágerská J, Zhang H, Diao Z, *et al.* Refractive index sensing with an air-slot photonic crystal nanocavity [J]. Optics Letters, 2010, 35(15): 2523-2525.
- [21] Iqbal M, Gleeson M A, Spaug B, *et al.* Label-free biosensor arrays based on silicon ring resonators and high-speed optical scanning instrumentation [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(3): 654-661.
- [22] Zhang M, Peh J, Hergenrother P J, *et al.* Detection of protein-small molecule binding using a self-referencing external cavity laser biosensor [C]. Journal of the American Chemical Society, 2014, 136(16): 5840-5843.