

基于 CO₂ 激光加工的法布里-珀罗光学微腔阵列的制备

贾卓楠*, 张婷婷, 栗正华, 花双全, 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 主要研究了基于 CO₂ 激光微加工实现法布里-珀罗(FP)光学微腔阵列的制备。首先,通过 CO₂ 激光微加工和掩模板相结合的方法,在玻璃基底上制备了阵列型的凹面结构,并对结构的特性进行了分析。测量及模拟分析结果表明,凹面结构可近似为高斯曲面,深度范围为 0.042~0.64 μm,半峰全宽范围为 11.30~16.60 μm;结构底部可近似为球面。随后,通过镀介质膜和微腔封装,制备了 FP 微腔阵列,采用平面镜-凹面镜的微腔组装形式,形成 FP 稳定腔。最后,测试了微腔阵列中光微流激光的产生。

关键词 激光光学;法布里-珀罗微腔;微腔阵列;CO₂ 激光烧蚀;光学掩模;光微流激光

中图分类号 TN242 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.231404

Fabrication of Fabry-Pérot Optical Microcavity Array Based on CO₂ Laser Processing

Jia Zhuonan*, Zhang Tingting, Li Zhenghua, Hua Shuangquan, Wang Wenjie

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

Abstract The main research is to realize the fabrication of Fabry-Pérot(FP) optical microcavity array based on CO₂ laser processing. Firstly, by combining CO₂ laser micromachining and mask, an array-type concave structure was prepared on the glass substrate, and the characteristics of the structure were analyzed. Measurement and simulation analysis results show that the concave structure can be approximated to a Gaussian surface with depth ranging from 0.042 μm to 0.64 μm and full width at half maximum ranging from 11.30 μm to 16.60 μm, the bottom of the structure can be approximated as a spherical surface. Secondly, FP microcavity array was prepared by dielectric coating and microcavity assembly, using a flat mirror-concave mirror microcavity assembly form to form an FP stable cavity. Finally, the generation of optofluidic laser in the FP microcavity array was realized.

Key words laser optics; Fabry-Pérot microcavity; microcavity array; CO₂ laser ablation; optical mask; optofluidic laser

OCIS codes 140.4780; 140.3390; 140.3945

1 引言

法布里-珀罗(FP)微腔激光器在各研究领域有着广泛的应用,如在光微流激光中,采用 FP 微腔激光可以实现对微量物质的检测^[1-12]。一般情况下,FP 微腔是由两个平行的平面反射镜构成,但在组装过程中,通常会人为地引入倾斜损耗,从而造成微腔

损耗的增加。前期的工作通过 CO₂ 激光微加工的方法,在熔融石英玻璃上制备微型凹面结构,结合镀膜技术,可实现微型凹面镜结构的制备^[13-14]。采用平面镜-凹面镜形式组成的 FP 光学微腔可以极大地减少微腔的损耗,降低微腔激光(即实验中的光微流激光)的泵浦阈值。

FP 微腔阵列在激光波分复用、多信号光微流

收稿日期: 2020-03-27; 修回日期: 2020-05-07; 录用日期: 2020-05-15

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: jiazhuonan2020@163.com

激光产生及检测等方面有着广泛的应用。前期的工作通过 CO₂ 激光打点的方式在熔融石英玻璃基底上制备阵列型凹面结构,从而实现阵列型光微流激光的产生^[13]。但这种方法产生的阵列结构周期较长,所组成的 FP 微腔的模式体积也较大。

为了进一步完善以上加工方法,本文采用 CO₂ 激光微加工和掩模板相结合的方法在熔融石英玻璃基底上制备出微型的阵列结构,随后通过镀膜技术和微腔组装,制备了 FP 微腔阵列,并测试了此微腔阵列中光微流激光的产生。

2 理论分析

一束平行光通过一个透射型掩模板后,再经透镜聚焦可在其焦平面处得到掩模板的傅里叶空间光谱。采用如图 1(a)所示的掩模板,由 4 个圆孔构成,分别位于正方形的四个顶点;正方形的边长为 $2a$,对角线长度为 $2\sqrt{2}a$,圆孔的直径为 b 。

通过 4 个圆孔可得到 4 个点光源,其在物平面 (x, y) 的电场分布为

$$U(x, y) = \delta(y)[\delta(x - \sqrt{2}a) + \delta(x + \sqrt{2}a)] + \delta(x)[\delta(y - \sqrt{2}a) + \delta(y + \sqrt{2}a)]. \quad (1)$$

则在傅里叶频谱面的电场分布为

$$U(\nu_x, \nu_y) = F[U(x, y)] = [\exp(-i2\pi\sqrt{2}a\nu_x) + \exp(i2\pi\sqrt{2}a\nu_x)] + [\exp(-i2\pi\sqrt{2}a\nu_y) + \exp(i2\pi\sqrt{2}a\nu_y)] = 2[\cos(2\pi\sqrt{2}a\nu_x) + \cos(2\pi\sqrt{2}a\nu_y)]. \quad (2)$$

因 $\nu_x = x'/\lambda f, \nu_y = y'/\lambda f$,故

$$U(x', y') = 2[\cos(2\pi\sqrt{2}ax'/\lambda f) + \cos(2\pi\sqrt{2}ay'/\lambda f)], \quad (3)$$

$$|F[U(x, y)]|^2 =$$

$$4 + 2\cos(2\pi\sqrt{2}ax'/\lambda f) + 2\cos(2\pi\sqrt{2}ay'/\lambda f) + 8\cos(2\pi\sqrt{2}ax'/\lambda f)\cos(2\pi\sqrt{2}ay'/\lambda f). \quad (4)$$

由(4)式可知,波矢 $k = 2\pi\sqrt{2}a/\lambda f$,在 (x', y') 方向的光强度分布周期 $T = 2\pi/k = \lambda f/2\sqrt{2}a$ 。其中 λ 为光源波长, f 为傅里叶透镜的焦距。

图 1(b)给出了此模板(掩模板的正方形边长为 $6\sqrt{2}$ mm,对角线为 12 mm)的傅里叶变换频谱空间,可以看出,它的傅里叶频谱空间表现出正方形的周期性分布,沿边长方向的周期长度为 $22.43 \mu\text{m}$,其中 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}, f = 25.4 \text{ mm}$ 。

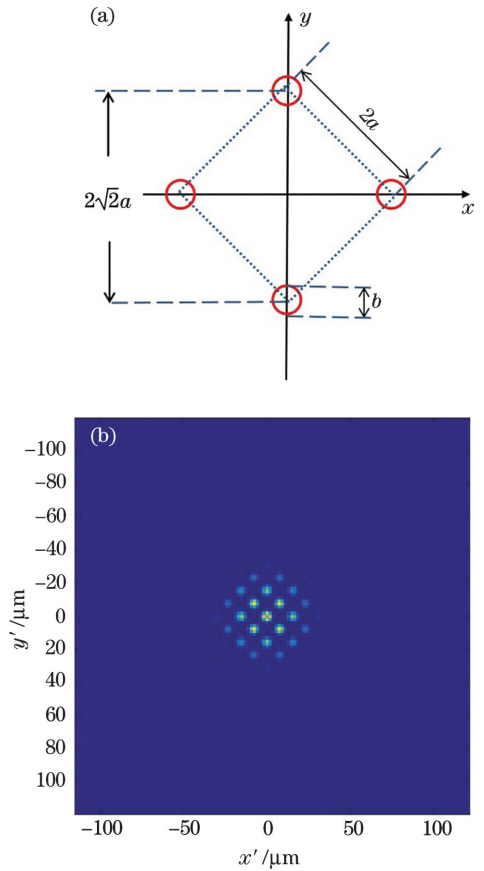


图 1 掩模板四圆孔分布及其傅里叶空间频谱。

(a)掩模板;(b)掩模板的傅里叶空间频谱

Fig. 1 Distribution of four circular holes in the mask and its Fourier spatial spectrum. (a) A mask; (b) Fourier spatial spectrum of the mask

3 实验结果及分析

3.1 CO₂ 激光加工阵列凹面结构

图 2(a)为 CO₂ 激光器在基底上制备阵列结构的实验装置图。从 CO₂ 激光器(Synrad Firestar vi30)出射的激光光束经透镜 1(Lens1,焦距为 15 mm)和透镜 2(Lens2,焦距为 500 mm)后扩束准直为平行光束。掩模板垂直置于透镜 2 后方,优化后的掩模板尺寸如图 2(a)所示,正方形结构的对角线长度为 12 mm,圆孔直径为 3 mm。光束经过掩模板(掩模板材质为不锈钢 304,圆孔通过激光冲孔方式加工得到)后再经透镜 3(Lens3,焦距为 25.4 mm)聚焦,待加工的玻璃基底置于透镜 3 的焦平面处。图 2(b)和(c)分别为显微镜下熔融石英玻璃基底和盖玻片基底上制备的点阵结构。可以看出,每一个点在平面上呈圆形分布。由于两种基底材料对 CO₂ 激光强度响应的不同,分别得到了结构为 3×3 的点阵和结构为 5×5 的

点阵结构。加工这两种结构所需的加工功率为 30 W, 激光持续时长分别为 6 s(熔融石英玻璃基底)和 28 s(盖玻片基底)。这两种点阵结构的正方形边长分别为 $46.9 \mu\text{m}$ 和 $106.3 \mu\text{m}$, 沿边长方向计算的周期长度分别约为 $23.5 \mu\text{m}$ (熔融石英玻

璃基底)和 $26.6 \mu\text{m}$ (盖玻片基底)。两种基底材料上加工的点阵结构的周期存在些许不同, 可能是由于实际加工时的条件不同造成的, 如: 无法完全保证两种基底材料的加工表面都处于焦平面的同一位置。

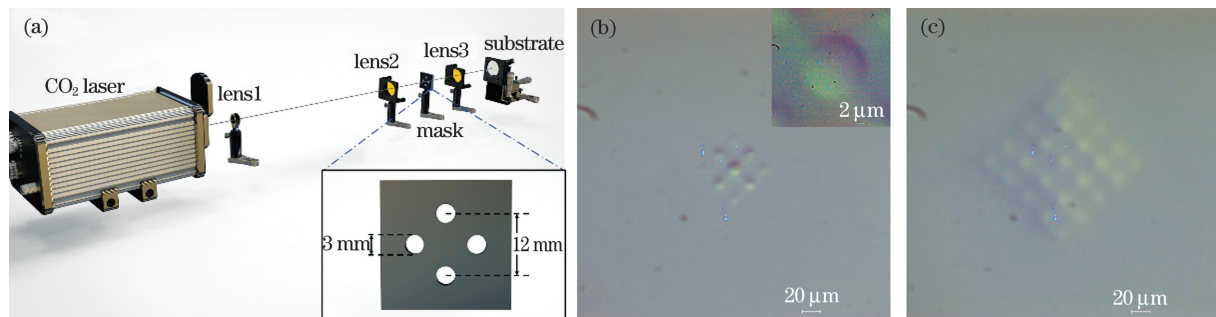


图 2 加工装置与结果。(a) CO_2 激光加工制备点阵结构示意图(放大部分为掩模板); (b) 熔融石英玻璃基底上制备的 3×3 点阵结构(显微镜图, 右上角为单个凹槽的放大图); (c) 盖玻片基底上制备的 5×5 点阵结构(显微镜图)

Fig. 2 Processing equipment and results. (a) CO_2 laser processing diagram for processing lattice structure(enlarged image for mask); (b) 3×3 lattice structure prepared on fused silica substrate (microscope picture, the picture in the upper right corner is an enlarged view of a single structure); (c) 5×5 lattice structure prepared on the cover slip substrate (microscope picture)

图 3(a)~(c) 分别为通过台阶仪测量的熔融石英玻璃基底上同一点阵中不同结构点沿 x 方向的一维深度分布(沿圆点结构的直径方向), 其中, 插图表示曲线所对应的位置。可以看出, 每一个结构呈凹形分布; 其中, 短点线代表实验上测量的结构点的深度分布曲线, 其他线型代表对相应结构圆点深度分布的高斯拟合。还可以看出, 拟合曲线和测量曲线拟合较好, 表明结构点的尺寸在一维方向上呈高斯分布。考虑到结构的对称性分布, 结构点在三维方向上呈凹形高斯面分布。图 3(a) 为点阵中心三个结构点的一维尺寸分布, 从左到右三个结构圆点

对应的最大深度分别为 0.09 、 0.255 、 $0.075 \mu\text{m}$, 半峰全宽分别为 14.13 、 15.90 、 $14.48 \mu\text{m}$ 。图 3(b) 给出点阵中心上方两个结构点的一维深度曲线, 从左到右两个结构点对应的最大深度分别为 $0.094 \mu\text{m}$ 和 $0.125 \mu\text{m}$, 半峰全宽分别为 $15.54 \mu\text{m}$ 和 $14.36 \mu\text{m}$ 。图 3(c) 为单个结构点的一维深度曲线, 最大深度为 $0.042 \mu\text{m}$, 半峰全宽为 $11.30 \mu\text{m}$ 。先前的研究工作表明, 在半峰全宽范围内, 深度曲线上各点的曲率半径均大于 0(即对应曲率半径的圆心位于高斯曲线内), 且最深位置处点的曲率半径最小(用 R 表示)。图 3(c) 对结构的底部用曲率半径为

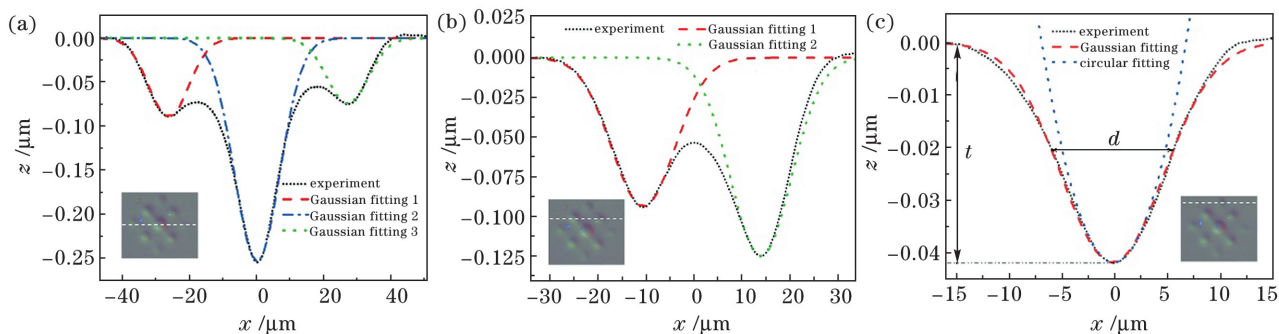


图 3 结构的一维深度分布。(a) 点阵中心三个结构点的一维深度分布; (b) 点阵中心上方两个结构点的一维深度分布; (c) 最上方单个结构点的一维深度分布

Fig. 3 One-dimensional depth distribution of structure. (a) One-dimensional depth distribution of three structural points in the center of the lattice; (b) one-dimensional depth distribution of two structural points above the center of the lattice; (c) one-dimensional depth distribution of the top single structural point

R 的圆进行了拟合,圆拟合曲线与结构底部深度分布曲线重合度高,则结构的底部可近似于一个半径为 R 的凹形球面。对实验上制备的熔融石英玻璃基底上多个点阵结构中每个凹面结构的参数进行分析,统计得到凹面结构的深度 t 的范围为 $0.042 \sim 0.64 \mu\text{m}$,半峰全宽 d 的范围为 $11.30 \sim 16.60 \mu\text{m}$,最小曲率半径 R 的范围为 $156 \sim 550 \mu\text{m}$ 。

随后在有凹面结构的熔融石英玻璃基底和盖玻片基底上镀制了多层高反射介质膜(SiO_2 和 Ta_2O_5 介质层)以形成高反射镜面(反射中心波长为 580 nm);则在凹面结构的底部位置形成具有高反射率的凹形球面反射镜。

3.2 FP 微腔的制备及激光测试

实验上采用的玻璃基底尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。采用 CO_2 激光加工时,可以在此玻璃基底上制备多组点阵结构,如图 4(a)所示。图中每一个白色圆点代表一组点阵结构。采用一面具有点阵结构的介质膜镜面和一面没有任何结构的平面镜面作为 FP 微腔的两个腔镜,通过空间隔板(厚度 $L = 30 \mu\text{m}$)和粘合剂把两面腔镜的边缘粘合在一起,形成中空的 FP 微腔,如图 4(a)所示。并结合聚二甲基硅氧烷(PDMS),制备成光微流激光芯片,用于激光的产生。可通过蠕动泵将含有增益介质的溶液注入到 FP 微腔中。

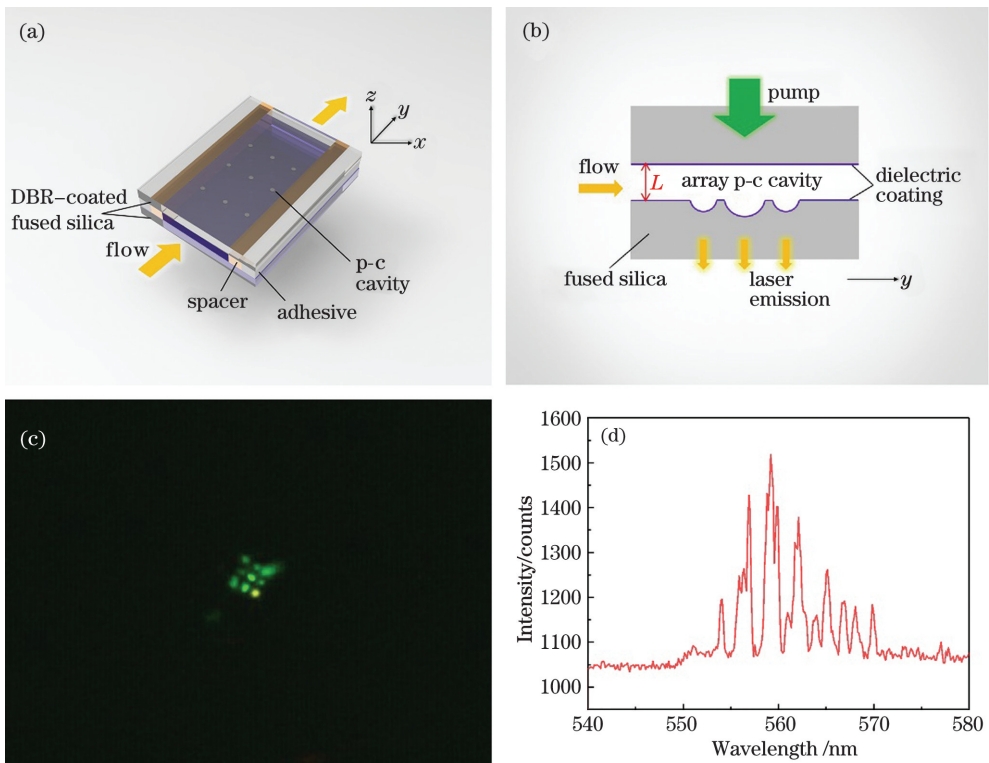


图 4 FP 微腔组装与激光测试。(a)FP 微腔的组装;(b)光微流激光测试装置;(c) CCD 采集的激光出射远场图;(d)激光光谱图

Fig. 4 FP microcavity assembly and laser testing. (a) Assembly of FP microcavity; (b) optofluidic laser test device; (c) far field image of laser emission collected by CCD; (d) laser spectrum

图 4(b)为 FP 微腔的内部结构放大图。在阵列结构位置处形成了多个平面-凹面的 FP 微腔。凹面结构底部的高反射率球面镜与相对的平面镜间的距离满足 $L + t < R$ 时,球面镜与平面镜之间可形成稳定的 FP 微腔结构。相比于平面-平面的 FP 微腔,平面-凹形球面的 FP 微腔为稳定腔,可降低 FP 微腔组装过程中引入的倾斜损耗等。实验上 $L = 30 \mu\text{m}$, t 的范围为 $0.042 \sim 0.64 \mu\text{m}$, R 的范围为 $156 \sim 550 \mu\text{m}$ 时,满足稳定腔的条件。

本文测试了基于熔融石英玻璃基底的 FP 微腔芯片,用于产生光微流激光。增益介质为溶于无水乙醇的罗丹明 6G(R6G,浓度为 1 mmol/L)。采用 532 nm 的脉冲激光器(脉宽为 5 ns ,重复频率为 20 Hz)作为泵浦源,经透镜(焦距为 6 mm)聚焦后通过平面镜垂直入射到 FP 微腔中[图 4(b)],聚焦高斯光斑的尺寸约为 $100 \mu\text{m}$,完全覆盖凹面阵列。当泵浦光的光能量密度为 $38.2 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ 时,可以在 FP 微腔的出射面处得到多个激光信号的产生,如图

4(c)所示。图 4(d)为图 4(c)对应的总的激光光谱图。从图中可以看出,实验得到了多个模式的激光信号产生,信号的中心波长约为 560 nm。由于实验中两面腔镜间的距离较长($L=30\ \mu\text{m}$),每个 FP 腔的腔长区别不大,因此从光谱上不能区分每个 FP 腔产生的激光信号。

4 结 论

本文主要制备了 FP 微腔阵列,并测试了 FP 微腔阵列的光微流激光产生。通过 CO_2 激光加工的方法在玻璃基底上制备了凹面结构。熔融石英玻璃阵列结构中每个凹面结构都呈高斯分布,结构最大深度 t 的范围为 $0.042\sim 0.64\ \mu\text{m}$,半峰全宽 d 的范围为 $11.30\sim 16.60\ \mu\text{m}$,最小曲率半径 R 的范围为 $156\sim 550\ \mu\text{m}$ 。同时,以此结构构建的平凹型 FP 微腔阵列激光器在泵浦光能量密度为 $38.2\ \mu\text{J}/\text{mm}^2$ 的激光泵浦下实现了多个激光信号的产生。

在今后的工作中,将进一步改善加工工艺,制备更高品质和更低模式体积的 FP 微腔阵列激光器。同时,也将探讨 FP 微腔阵列激光器在光通信以及生化检测等方面的具体应用。

参 考 文 献

- [1] Fan X D, Yun S H. The potential of optofluidic biolasers[J]. Nature Methods, 2014, 11(2): 141-147.
- [2] Gather M C, Yun S H. Single-cell biological lasers [J]. Nature Photonics, 2011, 5(7): 406-410.
- [3] Guo Y B, Li H, Reddy K, et al. Optofluidic Fabry-Pérot cavity biosensor with integrated flow-through micro-/nanochannels [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(4): 041104.
- [4] Kou Q, Yesilyurt I, Chen Y. Collinear dual-color laser emission from a microfluidic dye laser [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(9): 091101.
- [5] Liu P, Huang H, Cao T, et al. An optofluidics biosensor consisted of high-finesse Fabry-Pérot resonator and micro-fluidic channel [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(23): 233705.
- [6] Hunger D, Deutsch C, Barbour R, et al. Laser micro-fabrication of concave, low-roughness features in silica[J]. AIP Advances, 2012, 2(1): 012119.

- [7] Hunger D, Steinmetz T, Colombe Y, et al. A fiber Fabry-Perot cavity with high finesse[J]. New Journal of Physics, 2010, 12(6): 065038.
- [8] Hou M D, Liang X Y, Zhang T T, et al. DNA melting analysis with optofluidic lasers based on Fabry-Pérot microcavity [J]. ACS Sensors, 2018, 3(9): 1750-1755.
- [9] Zhou C H, Zhang T T, Zhai A P, et al. Generation of optofluidic FRET laser based on Fabry-Perot microcavity[J]. Laser Technology, 2017, 41(1): 14-18.
周春花, 张婷婷, 翟爱平, 等. 基于法布里-珀罗微腔的光微流 FRET 激光产生 [J]. 激光技术, 2017, 41(1): 14-18.
- [10] Han C, Qiu C Y, Hou M D, et al. Measurement of liquid refractive index based on optofluidic single mode laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 081401.
韩超, 邱诚玉, 侯梦迪, 等. 基于光微流单模激光的液体折射率测量 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 081401.
- [11] Liang X Y, Hou M D, Zhang T T, et al. High resolution melting technology based on Fabry-Perot microcavity laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101702.
梁希月, 侯梦迪, 张婷婷, 等. 基于法布里-珀罗微腔激光的高分辨率溶解技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101702.
- [12] Qiu C Y, Jia Z N, Zhang T T, et al. Cascade FRET optofluidic laser generation in Fabry-Perot microcavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 181403.
邱诚玉, 贾卓楠, 张婷婷, 等. 法布里-珀罗微腔中级联 FRET 光微流激光产生研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 181403.
- [13] Wang W J, Zhou C H, Zhang T T, et al. Optofluidic laser array based on stable high-Q Fabry-Pérot microcavities[J]. Lab on a Chip, 2015, 15(19): 3862-3869.
- [14] Zhang T T, Zhou C H, Wang W J, et al. Generation of low-threshold optofluidic lasers in a stable Fabry-Pérot microcavity[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 91: 108-111.