

半径 5 μm 的定向输出圆盘形微腔激光器

吕晓萌¹, 黄永箴², 邹灵秀², 杨跃德², 肖金龙²

¹中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610036;

²中国科学院半导体研究所, 北京 100083

摘要 基于三维时域有限差分法,对半径为 5 μm 的径向直连波导微腔激光器的模式及定向输出特性进行研究,得到了波长在 1550 nm 附近的高品质因子(Q)横电模的 Q 值与光场分布特性。基于半导体平面加工工艺制备了 AlGaInAs/InP 圆盘形微腔激光器,微腔半径为 5 μm ,波导宽度为 1 μm 。该激光器在 298 K 下实现了连续单模输出,阈值电流为 4 mA。在注入电流为 9 mA 时,激光器的边模抑制比可达 33.4 dB。基于速率方程拟合了激光器模式强度随注入电流的变化,得到激光器的自发辐射因子约为 5.5×10^{-3} 。

关键词 激光器; 半导体激光器; 微腔; 时域有限差分法

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0901010

Unidirectional-Emission Circular Microcavity Laser with Radius of 5 μm

Lü Xiaomeng¹, Huang Yongzhen², Zou Lingxiu², Yang Yuede², Xiao Jinlong²

¹The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610036, China;

²Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract On the basis of three-dimensional finite-difference time-domain method, the mode and unidirectional-emission characteristics for a 5 μm -radius microcavity laser with radial waveguide are studied. Q factors and mode field patterns for high-Q transverse electric mode near the wavelength of 1550 nm are obtained. An AlGaInAs/InP circular microcavity laser with radius of 5 μm is fabricated by semiconductor planar processing technology, with a 1 μm wide output waveguide directly connected to the cavity. Continuous single mode lasing is achieved with a threshold current of 4 mA at the temperature of 298 K. The side mode suppression ratio of the laser is 33.4 dB when the injection current is 9 mA. On the basis of rate equation, the laser model intensity is fitted with the change of the injection current, and the spontaneous emission factor of the laser is about 5.5×10^{-3} .

Key words lasers; semiconductor lasers; microcavity; finite-difference time-domain method

OCIS codes 140.5960; 140.3410; 140.3948; 230.4555

1 引 言

采用平面半导体工艺制备的半导体微腔激光器具有成本低、Q 值高、易于集成等特点,可作为大规模光子集成电路和超大规模光通信系统的理想光源^[1-4]。其中,回音壁模式微腔激光器具有体积小、阈值低、功耗低等优点,在光子集成电路和片上光互连光源等应用中颇具优势^[5-6]。受限于其圆形旋转对称结构,回音壁模式微腔激光器的定向输出特性严重限制了它的大规模集成与应用。在过去的 20 年中,微腔激光器的定向输出特性引起了研究人员的广泛关注,并且研究人员发现可以通过倏逝波耦合或直接连接输出波导的方式实现其单向输出^[7-10]。在之前的研究中,本课题组已从理论上分析了不同半径的微腔激光器的模式耦合输出与垂直辐射特性^[11-12]。本文在理论上模拟了半径为 5 μm 的径向直连波导微腔激光器的模式特性,并基于平面半导体工艺制备了半径为 5 μm 、径向波导宽为 1 μm 的圆盘形微腔激光器,在室温下实现了连续电注入激光,

收稿日期: 2017-04-17; 收到修改稿日期: 2017-05-16

作者简介: 吕晓萌(1986—),男,博士,主要从事微腔激光器及微纳光子学方面的研究。E-mail: lvxiaomeng@semi.ac.cn

导师简介: 黄永箴(1963—),男,博士,研究员,主要从事微腔激光器及微纳光子学方面的研究。

E-mail: yzhuang@semi.ac.cn(通信联系人)

与目前已报道的同结构的微腔激光器相比,该结果是实验上实现的最小尺寸连续电注入激光激光器。

2 激光模式模拟分析

在之前的研究中,本课题组利用圆形微腔激光器的旋转对称特性,将三维结构简化为二维结构,求解了没有输出波导的完整圆盘形微腔的模式特性^[13-14]。在此基础上,本课题组采用三维时域有限差分(FDTD)方法,对径向直连波导的圆盘形微腔激光器直接进行三维(3D)模拟分析;之后在真实的3D空间中构建了微腔激光器的3D模型,该微腔激光器的半径为 $5\ \mu\text{m}$,直连波导的宽度为 $1\ \mu\text{m}$,微腔结构如图1所示。圆盘形微腔激光器的衬底材料为磷化铟(InP),其结构自上而下分别为上限制层、有源层、下限制层和衬底,中心有源层的厚度 $t_g=0.3\ \mu\text{m}$,折射率 $n_1=3.4$,上限制层厚度 $t_u=1.4\ \mu\text{m}$,下限制层厚度 $t_b=2.1\ \mu\text{m}$,限制层和衬底的折射率 $n_2=3.17$ 。微腔周围的介质为空气,折射率为1,坐标系原点设在有源层和微腔的中心处。横电(TE)场和横磁(TM)场的回音壁模式的主电磁场分量分别为 H_y, E_x, E_z 和 E_y, H_x, H_z 。FDTD算法的空间步长 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别设为20,30,30 nm,在满足收敛Courant的条件下,设定时间步长为0.047 fs。用宽带激发源在微腔中激发出多个模式,然后通过Padé近似地将记录的FDTD时域输出转换到频域,以计算模式波长和Q因子^[15-16]。之后,对于选定的模式,再用以模式波长 λ 为中心的窄带宽激发源来激发单个模式,得到模场分布。记录腔内某点的场分量在最后 1×10^5 步的FDTD输出,然后利用Padé近似即可变换到频域进行光谱分析。

基于三维FDTD方法,利用宽带激发源得到了TE模式的强度谱,如图2所示,实线和虚线分别对应对称模式和反对称模式,在波长为1496.1,1519.6,1544.1,1569.5 nm处存在4个高Q的TE模式。仿真结果显示,半径为 $5\ \mu\text{m}$ 的圆形微腔激光器的模式间距分别为23.5,24.5,25.4 nm。在1519.6 nm波长附近,对称和反对称模式的模式Q因子分别为 5.4×10^3 和 4.5×10^3 ,在1506.5,1532.9,1560.2 nm波长处也观察到了模式Q因子低很多的高阶模式。在 $z=0\ \mu\text{m}$ 和 $y=0\ \mu\text{m}$ 截面内,1519.6 nm波长处对称模式的模式强度分布如图3所示。由图3(b)可以看出,垂直方向上的模场被有效地限制在有源层内。

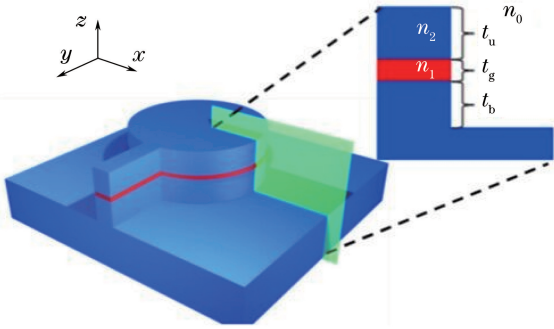


图1 直连波导的微腔激光器的三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of microcavity laser with radial waveguide

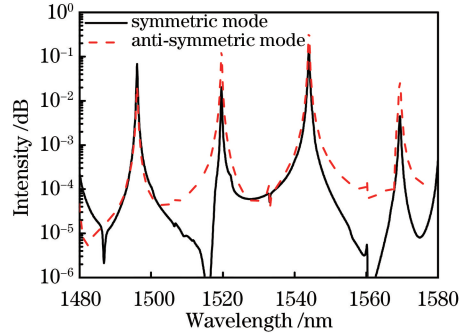


图2 利用宽带激发源得到的微腔激光器TE模式强度谱

Fig. 2 TE mode intensity spectra of microcavity laser obtained by broadband source

3 微腔激光器的制备

使用边发射AlGaInAs/InP压应变量子阱激光晶片,基于文献^[17-19]中的工艺制备微腔激光器。图4为制作微腔激光器的完整工艺流程图。首先,通过等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术在激光晶片上沉积800 nm厚的 SiO_2 层;然后采用光刻技术和感应耦合等离子体(ICP)蚀刻技术将激光图案转移到 SiO_2 层上,图形化的 SiO_2 层用作后续ICP蚀刻工艺的硬掩模,以深度蚀刻AlGaInAs/InP激光晶片,总的蚀刻深度约为 $4.7\ \mu\text{m}$;随后使用HF溶液去除残留的 SiO_2 硬掩模,再通过PECVD技术在晶片上沉积200 nm厚的氮化硅(SiN_x)层,以保证下一工序中旋涂的苯并环丁烯(BCB)具有良好的黏附性,保护微腔激光器免受后续反应离子蚀刻(RIE)工艺的破坏。在刻蚀过的材料表面旋涂BCB,共旋涂2次,涂覆之后,在氮气气氛中固化BCB,以避免其在空气加热固化过程中被氧化。以 CF_4, O_2 和氩气的混合气体作为刻蚀气体,采用RIE蚀刻技术,在没有任何掩模的情况下直接刻蚀固化后的BCB,直至暴露出微腔激光器的顶部;然后在整个晶

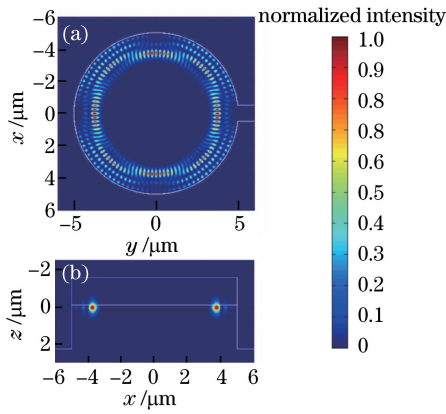


图 3 (a) $z=0 \mu\text{m}$ 和 (b) $y=0 \mu\text{m}$ 截面内 1519.6 nm 处对称模式的归一化模式强度分布 $|H_z|^2$
 Fig. 3 Normalized intensity distributions $|H_z|^2$ of the symmetric mode at 1519.6 nm in cross sections of (a) $z=0 \mu\text{m}$ and (b) $y=0 \mu\text{m}$

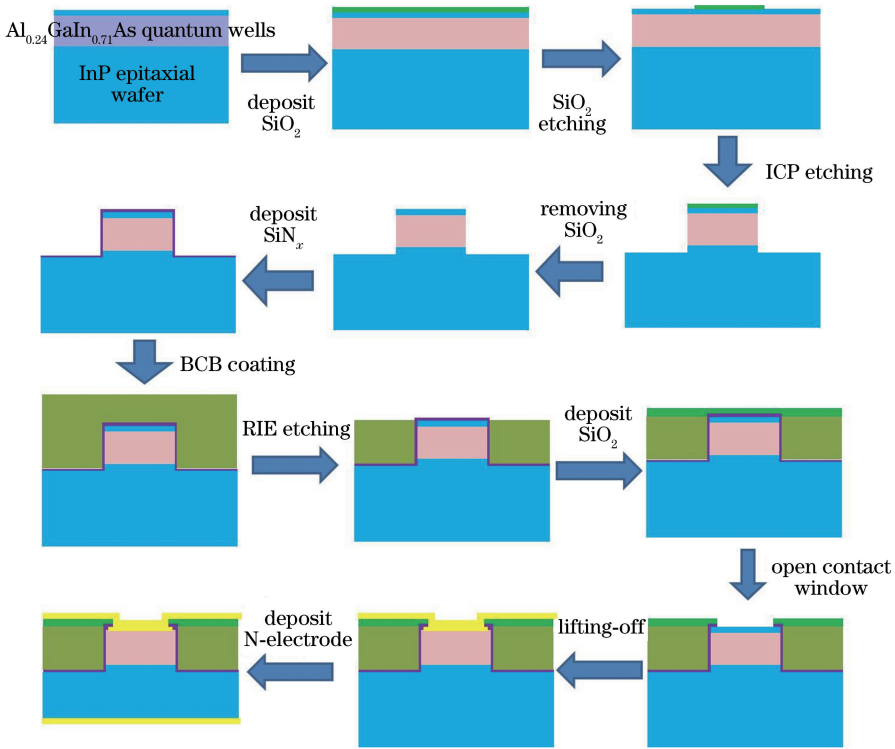


图 4 微腔激光器制备工艺流程
 Fig. 4 Preparation process flow for microcavity laser

片上沉积 500 nm 厚的 SiO_2 层,通过光刻将图形电极窗口的图案转移到 SiO_2 层上,利用 ICP 工艺同时刻蚀掉微腔上方的 SiO_2 层和 SiN_x 层,直至露出 InP 保护层,然后利用盐酸溶液湿法腐蚀掉 InP 保护层,暴露欧姆接触层作为电极接触窗口;之后通过电子束蒸发和剥离工艺制备 Ti/Pt/Au 的 P 型电极,形成直径为 $90 \mu\text{m}$ 的焊盘;最后用研磨机将制备好的晶片机械研磨至厚度约为 $120 \mu\text{m}$,并且在 n 面制备 Au-Ge-Ni 金属层作为 N 型电极。图 5(a)为微腔激光器的扫描电子显微镜(SEM)图像,图 5(b)为微腔激光器的显微照片。

4 激光器特性测试

对晶片解理之后,将微腔激光器烧焊在 AlN 热沉表面上,并安装固定在热电制冷器(TEC)上进行测试。制冷器温度控制在 298 K 时,电压和微腔激光器输出功率随连续注入电流的变化如图 6 所示。通过线性拟合注入电流为 $5 \sim 10 \text{ mA}$ 时的电压-注入电流曲线,得到了激光器的串联电阻为 19.2Ω 。从图 6 可以得出微

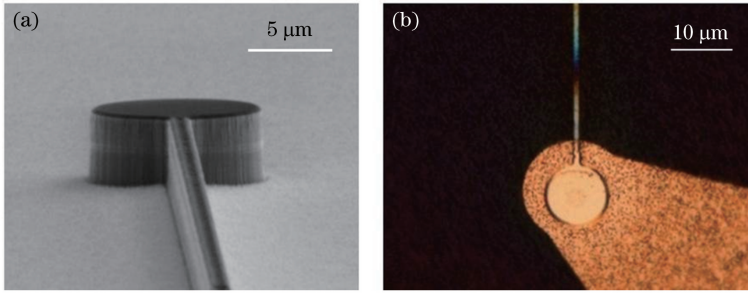


图 5 (a) ICP 刻蚀后微腔激光器的 SEM 图像;(b)制作完成的微腔激光器的显微照片

Fig. 5 (a) SEM image of microcavity laser after ICP etching; (b) microscopic picture of fabricated microcavity laser

腔激光器的阈值电流约为 4 mA,当注入电流继续增大时,输出功率也继续增大,当注入电流为 10 mA 时,耦合输出功率达到 0.28 μW。该微腔激光器耦合输出功率偏低的主要原因包括以下 3 个方面:1) 解理的波导端面与光纤耦合效率较低^[15-16];2) 小尺寸的微腔激光器具有较大的纵向辐射,导致衬底泄漏的光功率较多^[13];3) 5 μm 微腔激光器的有源区较小,输出功率较同类激光器偏低^[17-19]。

当连续注入电流为 9 mA 时,微腔激光器的光谱特性如图 7(a)所示。从图 7(a)中可以看出,该激光器实现了边模抑制比(SMSR)为 33.4 dB 的单模激光,注入电流为 9 mA 时微腔激光器的主模波长为 1520.9 nm,纵模波长间隔为 22.9 nm,与图 2 中的仿真结果一致。在相邻纵模之间,1508.1 nm 和 1530.5 nm 波长附近可以看到较大线宽的非激射高阶模,其对应于图 2 中低 Q 值的高阶对称模。通过光谱计算了该激光模式的模式功率随注入电流的变化,如图 7(a)插图所示,其光谱功率在 8 mA 处出现了非线性拐点,与图 6 中曲线的变化规律一致。可以推测,随注入电流增大,器件的工作温度升高,激射波长红移,可能会引起光纤耦合效率发生波动,从而使得耦合输出的模式功率出现非线性变化。

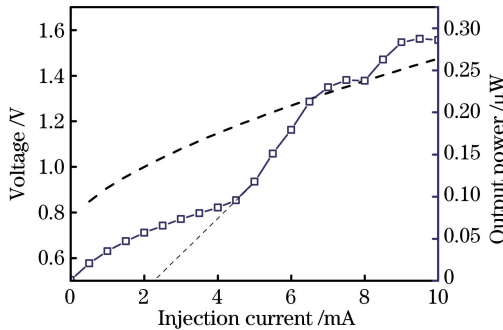


图 6 298 K 下电压和输出功率随注入电流的变化曲线

Fig. 6 Output power-current and voltage-current curves measured at 298 K

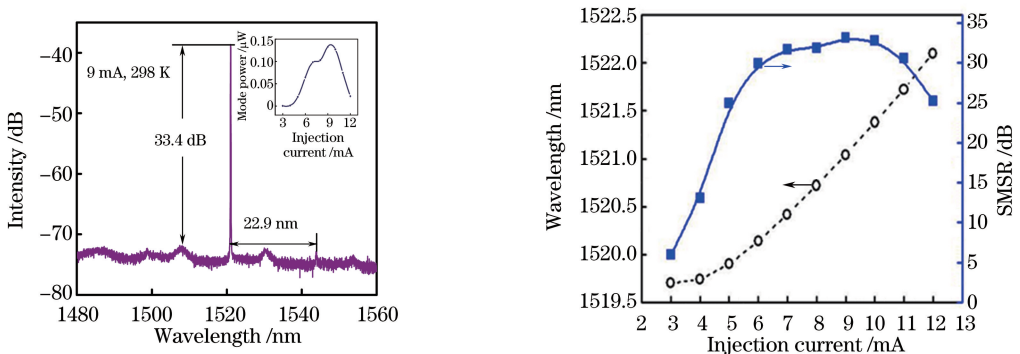


图 7 (a) 9 mA 连续注入电流下微腔激光器的光谱特性;(b) 298 K 下模式波长和 SMSR 随注入电流的变化

Fig. 7 (a) Spectral characteristic of microcavity laser at injection current of 9 mA;

(b) mode wavelength and SMSR versus injection current at 298 K

在 298 K 下,该激光器的模式波长和 SMSR 随注入电流的变化如图 7(b)所示。由图 7(b)可以看出:当注入电流从 3 mA 增加到 12 mA 时,模式波长从 1519.7 nm 移动到 1522.1 nm,根据 $0.11 \text{ nm}\cdot\text{K}^{-1}$ 的红移速率推算,器件的温升约为 21.8 K;当注入电流从 3 mA 增加到 9 mA 时,SMSR 因注入载流子的增加而先升至 33.4 dB,之后由于器件温度升高而又降低。

最后分析了 1521 nm 模的激光光谱在阈值附近的变化规律,以估算微腔激光器的自发辐射耦合因子 β 。考虑方程:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\eta I}{qV_a} An - Bn^2 - Cn^3 - \nu_g g(n, s)s, \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = \nu_g [\Gamma g(n) - \alpha_i] s - \frac{s}{\tau_{pc}} + \Gamma \beta Bn^2, \quad (2)$$

$$g(n, s) = \frac{g_0}{1 + \epsilon s} \ln \left(\frac{n + N_s}{N_{tr} + N_s} \right), \quad (3)$$

式中 n 为微腔内部载流子密度, I 为注入电流, t 为时间, η 为电流注入效率, q 为电子电荷电量, V_a 为有源层体积, A 、 B 、 C 分别为缺陷复合系数、辐射复合系数、俄歇复合系数, ν_g 为微腔中的光速, $g(n, s)$ 为量子阱的增益, s 为光子数密度, Γ 为光限制因子, α_i 为内损耗因子, τ_{pc} 为只考虑光学微腔结构影响情况下的光子寿命(即冷腔光子寿命), β 为自发辐射因子, g_0 为材料增益, ϵ 为增益压缩因子, N_s 为增益参数, N_{tr} 为透明载流子浓度。微腔激光器的品质因子取三维 FDTD 中的仿真结果 $Q = 4.5 \times 10^3$, 其他参数取 $g_0 = 1500 \text{ cm}^{-1}$, $N_{tr} = 1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, $\epsilon = 1.5 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$, $N_s = 1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, $\alpha_i = 8 \text{ cm}^{-1}$, $\eta = 0.7$, $\Gamma = 0.1$, $A = 1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, $B = 1 \times 10^8 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, $C = 1 \times 10^{-28} \text{ cm}^{-28} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在自发辐射因子 β 分别 1×10^{-3} 、 5.5×10^{-3} 和 3×10^{-2} 时计算得到的功率-电流曲线如图 8 所示,横坐标为注入电流和阈值电流的比值,纵坐标为模式强度^[20]。对不同电流下测得的 1521 nm 附近的模式光谱进行洛伦兹拟合,并根据洛伦兹曲线的积分估算可以看出,自发辐射因子 $\beta = 5.5 \times 10^{-3}$ 时的理论曲线与实验结果吻合得很好。由此估算出该微腔激光器的自发辐射因子约为 5.5×10^{-3} 。另外还模拟了激光器的输出功率随注入电流的变化,如图 8 中的插图所示,阈值电流约为 2.5 mA,比实验结果略低,其原因为:1) 腔体侧面的粗糙度不理想引起腔体的实际损耗偏大;2) 激光器实际工作过程中的温升引起阈值增加。

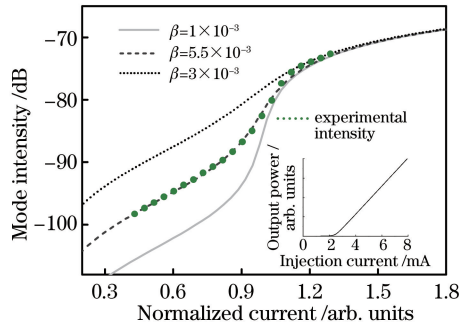


图 8 不同自发辐射因子下计算得到的模式强度-电流曲线,插图为模拟输出功率随注入电流的变化曲线

Fig. 8 Calculated mode intensity-normalized current curves at different spontaneous emission factors, the inset is the variation of output power with injection current

5 结 论

研究了半径为 $5 \mu\text{m}$ 的微腔激光器的模式和定向输出特性。实验表明,与 $1 \mu\text{m}$ 宽的径向波导连接的半径为 $5 \mu\text{m}$ 的微腔激光器可以实现连续电注入激射。在 298 K 下,测得的阈值电流为 4 mA;在注入电流为 9 mA 时,测得激光器的 SMSR 为 33.4 dB。拟合了激光模式强度随注入电流的变化规律,得到微腔激光器的自发辐射因子约为 5.5×10^{-3} 。

参 考 文 献

- [1] Roelkens G, Liu L, Liang D, *et al.* III-V/silicon photonics for on-chip and inter-chip optical interconnects[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(6): 751-779.
- [2] Zhou Xuyan, Zhao Shaoyu, Ma Xiaolong, *et al.* Low vertical divergence angle and high brightness photonic crystal semiconductor laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(2): 0201010.
周旭彦, 赵少宇, 马晓龙, 等. 低垂直发散角高亮度光子晶体半导体激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201010.
- [3] Zhang Limeng, Lu Dan, Yu Liqiang, *et al.* InP-based few lateral-modes semiconductor laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s2): s206001.
张莉萌, 陆丹, 余力强, 等. InP基少模半导体激光器[J]. *光学学报*, 2015, 35(s2): s206001.
- [4] Lu Ri, Xu Liuyang, Gao Xin, *et al.* Thermal characterization of electrically injected elliptical microcavity lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0402007.
陆日, 许留洋, 高欣, 等. 电注入椭圆微腔半导体激光器热特性分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0402007.
- [5] Papp S B, Beha K, Del'Haye P, *et al.* Microresonator frequency comb optical clock[J]. *Optica*, 2014, 1(1): 10-14.
- [6] Mao M H, Chien H C. Transient behaviors of current-injection quantum-dot microdisk lasers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 3302-3310.
- [7] Mechet P, Verstuyft S, de Vries T, *et al.* Unidirectional III-V microdisk lasers heterogeneously integrated on SOI[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 19339-19352.
- [8] Choi S J, Djordjev K, Choi S J, *et al.* Microdisk lasers vertically coupled to output waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(10): 1330-1332.
- [9] van Campenhout J, Rojo-Romeo P, Regreny P, *et al.* Electrically pumped InP-based microdisk lasers integrated with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit[J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 6744-6749.
- [10] Zou L X, Liu B W, Lv X M, *et al.* Integrated semiconductor twin-microdisk laser under mutually optical injection[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(19): 191107.
- [11] Lv X M, Huang Y Z, Yang Y D, *et al.* Influences of carrier diffusion and radial mode field pattern on high speed characteristics for microring lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(16): 161101.
- [12] Yang Y D, Huang Y Z, Chen Q. High-Q TM whispering-gallery modes in three-dimensional microcylinders[J]. *Physical Review A*, 2007, 75(1): 013817.
- [13] Lv X M, Zou L X, Huang Y Z, *et al.* Influence of mode Q factor and absorption loss on dynamical characteristics for semiconductor microcavity lasers by rate equation analysis[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(12): 1519-1525.
- [14] Yang Y D, Huang Y Z, Chen Q. Comparison of Q-factors between TE and TM modes in 3-D microsquares by FDTD simulation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(22): 1831-1833.
- [15] Lv X M, Huang Y Z, Yang Y D, *et al.* Analysis of vertical radiation loss and far-field pattern for microcylinder lasers with an output waveguide[J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 16069-16074.
- [16] Lv X M, Huang Y Z, Zou L X, *et al.* Optimization of direct modulation rate for circular microlasers by adjusting mode Q factor[J]. *Laser Photonics Reviews*, 2013, 7(5): 818-829.
- [17] Lv X M, Zou L X, Lin J D, *et al.* Unidirectional-emission single-mode AlGaInAs-InP microcylinder lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(11): 963-965.
- [18] Zou L X, Lv X M, Huang Y Z, *et al.* Four-wavelength microdisk laser array laterally coupled with a bus waveguide[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3807-3810.
- [19] Zou L X, Huang Y Z, Lv X M, *et al.* Modulation characteristics and microwave generation for AlGaInAs/InP microring lasers under four-wave mixing[J]. *Photonics Research*, 2014, 2(6): 177-181.
- [20] Fujita M, Inoshita K, Baba T. Room temperature continuous wave lasing characteristics of GaInAsP/InP microdisk injection laser[J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(3): 278-279.