

InGaAsP 多量子阱双稳态激光器的实验及理论研究

徐玉兰^{1,2}, 林中晔¹, 陈景源^{1,2}, 林琦^{1,2}, 王凌华¹, 苏辉¹

(1. 中国科学院福建物质结构研究所 激光工程技术研究室, 福建 福州 350002;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 从实验和理论上研究了 InGaAsP 多量子阱 (Multi-Quantum-Well, MQW) 双区共腔(Common Cavity Tandem Section, CCTS)结构半导体激光器的吸收区偏置状态对双稳态特性的影响。实验结果表明:随着可饱和吸收区上的负偏置电压的增大,激光器 $P-I$ 曲线中双稳态特性更加明显, $V-I$ 曲线有负微分电阻,当偏压加至 -3 V 时,回滞曲线环宽度增加至 13.5 mA ,开关比达到 $21:1$ 。理论分析表明,利用吸收区的高负偏置态和短载流子逃逸时间能获得更好的双稳态特性。最大 $107:1$ 的开关比也说明双区共腔激光器能在两稳态之间实现非常明确的转换。

关键词: 双稳态; 半导体激光器; 双区共腔; 回滞曲线环; 开关比

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1105004

Experimental and theoretical study of the bistable InGaAsP multi-quantum-well lasers

Xu Yulan^{1,2}, Lin Zhongxi¹, Chen Jingyuan^{1,2}, Lin Qi^{1,2}, Wang Linghua¹, Su Hui¹

(1. Laboratory of Laser Engineering and Technology, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter,
Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Influences of the bias states of saturable absorbers on bistable InGaAsP multi-quantum-well (MQW) common cavity tandem section(CCTS) semiconductor lasers were investigated experimentally and theoretically. The experiment demonstrated that the bistability characteristic of $P-I$ curves can be more significant with increasing reversed bias voltage in the saturable absorber (SA), and a negative differential resistance phenomenon was found in $V-I$ curves. When the voltage was -3 V , the hysteresis width was broadened to 13.5 mA , with the on-off ratio up to $21:1$. The theoretical analysis proves that higher passive voltage in SA and shorter carrier escape time can result in better bistability. The maximum on-off ratio as high as $107:1$ promises that a common cavity two-section laser can be switching between the two-steady state.

Key words: bistable; semiconductor lasers; common cavity tandem section; hysteresis; on-off ratio

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(61405198); 国家 863 计划(2013AA014202); 福建省自然科学基金(2014J06022);

国家重点研发计划(2016YFB0402300, 2016YFB0402304)

作者简介: 徐玉兰(1989-), 女, 博士生, 主要从事通讯波段 $1\ 310\text{ nm}$ 半导体发光器件的制备与研究。Email: xuyulan@fjirsm.ac.cn

导师简介: 苏辉(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体激光器、光电器件及系统等方面的研究。Email: huisu@fjirsm.ac.cn

0 引言

自 1964 年由 Laser^[1]提出光学双稳态概念以来,双稳态广泛的应用于光通讯、光再生、光记忆、逻辑门电路^[2-3]等领域。光学双稳态产生于有光反馈的系统,这些系统内包含了可饱和吸收体或者其他的非线性物质,如光子晶体^[4]微谐振腔、掺铒光纤激光器^[5]、半导体法布里-伯罗腔(F-P)^[6]等。在过去的几十年里,半导体激光器采用双区共腔(Common Cavity Tandem Section, CCTS)结构实现了各种可调的双稳态,如波长双稳态^[7]、功率双稳态^[8]等。CCTS 结构的半导体激光器为实现光学双稳态,将其中一区正向偏置,另一区作为可饱和吸收体。由于单、多量子阱或量子点具有超快的载流子动态响应及吸收恢复时间^[9],非常适合作为饱和吸收体,因此采用量子阱(QW)或量子点(QD)结构制作 CCTS 双稳态激光器是半导体激光研究的一个热点。Kam Lau^[10]等研究吸收区的 $V-I$ 曲线发现当双稳态激光器的吸收区处于某一段特定偏置电压驱动时会存在一个负微分电阻,这个负微分电阻对激光器的双稳态特性和光功率-电流($P-I$)曲线的跳变以及自脉冲现象有着非常大的影响。Hiroyuki Uenohara^[11]等和 Huang Xiaodong^[12]等通过测试吸收区的电致荧光谱谱线发现,外加偏压的电吸收引起的量子约束斯塔克效应(Quantum-Confined Stark Effect, QCSE)和 QW 或 QD 的非线性饱和和吸收效应,是激光器的 $P-I$ 曲线表现出双稳态特性和回滞曲线的主要原因。

由于光学双稳态在光开关等领域的应用,大的开关比意味着稳态与稳态之间更鲜明,较宽的曲线回滞曲线环说明操作和控制两态的范围越大,稳定性越好,因此,追求大的开关比和宽的回滞环是半导体双稳态激光器研究的一个重要方面。在国内,姜立稳等^[13]用 InAs 量子点(QD)激光器在近 1 A 的大电流注入下通过增加吸收区的长度得到开关比为 129:1 的回滞曲线,王启明^[14]等研制的 CCTS 结构 GaAs/AlGaAs 单量子阱双稳态激光器也在脉冲工作下得到了双稳特性。但对 InP 基多量子阱(MQW)结构双稳态激光器方面,关于其吸收区偏置状态引起的负微分电阻现象及与偏压相关的载流子逃逸时间对双稳态特性影响如开关比和回滞环宽的变化等方面,

有关报道却很少。

文中利用 MQW 结构制成的 CCTS 激光器,从实验和理论上探讨吸收区的偏置状态对双稳态特性的影响。实验证明,在高偏置电压时,由于强电吸收作用引起负微分电阻, $P-I$ 曲线有更明显的双稳态和更大的开关比。速率方程模拟的结果也表明,CCTS 结构激光器在吸收区的偏置情况下存在双稳态现象,吸收区偏压越大,与偏压相关的载流子逃逸时间越短,双稳态特性更明显,回滞环更宽,开关比更大。基于吸收区的偏置状态在激光器双稳态特性中发挥的作用,分析器件的动态效应对实现更高速的光转换、优化器件设计有着重要的意义。

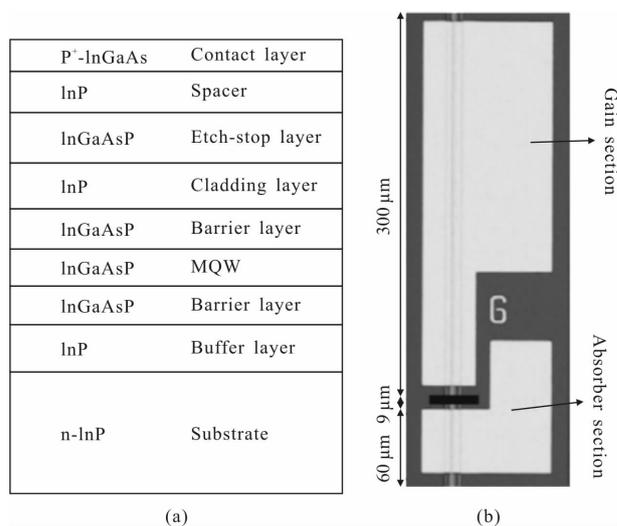
1 实验结果与分析

1.1 双稳态激光器的结构及制作

文中制作的双稳态激光器的外延片采用均匀多层量子阱(Multi-Quantum-Well, MQW)结构,在 n -InP 衬底上通过 MOCVD 依次生长 n -InP 缓冲层, InGaAsP 下势垒层,含 14 nm 均匀应变多量子阱 InGaAsP 的有源层, InGaAsP 上势垒层, InP 盖层,并在盖层上引入 InGaAsP 腐蚀停止层和 InP 空间层,最后生长一层 P^+ -InGaAs 电接触层,外延结构如图 1(a)所示。

外延片用传统的脊形波导半导体加工工艺,脊宽为 $2.2 \mu\text{m}$,通过一系列的光刻、生长、腐蚀等工艺制作成 CCTS 结构激光器芯片,如图 1(b)所示。

其中增益区长度 $300 \mu\text{m}$,吸收区长度 $60 \mu\text{m}$,增益区和吸收区的长度比为 5:1,两区中间有先使用湿法腐蚀至 InP 层,然后利用 PECVD 沉积的 SiO_2 绝缘层作为电隔离区,长度为 $9 \mu\text{m}$,形成大于 $1.5 \text{k}\Omega$ 的



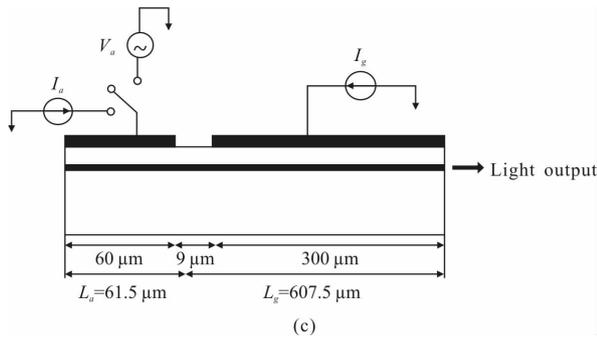


图 1 CCTS、MQW 结构双稳态激光器,(a)外延结构图(b)芯片示意图(c)波导示意图

Fig.1 CCTS, MQW two-section laser, (a) epitaxial layer structure (b) chip schematic (c) waveguide structure

隔离电阻。为了提高输出功率,在吸收区端面镀反射率为 0.88 的高反膜,增益区一端端面为出光端面端面,镀反射率为 10% 的高透膜。

1.2 测试结果

将 CCTS 结构激光器放置在温度控制为室温的铜热沉上,且 P 面朝上。激光器的激光波长为 1310 nm。测试示意图如图 1(c)所示,在增益区上注入一个正向电流 I_g ,在吸收区上施加偏置电压 V_a (或偏置电流 I_a),吸收区没有外接任何负载电路。图 2(a)给出了不同的吸收区偏压下,激光器输出光功率和增益区电压与增益区电流之间的关系。从图中看到,随着负偏压的增加,激光器的阈值电流增大,同一电流下的功率减小, $P-I$ 曲线表现出越来越明显的双稳态特性。这都是由于量子约束斯塔克效应,愈来愈强的电场导致吸收的巨大变化,激光器的损耗变大^[13]而造成的影响。而 $V-I$ 曲线随着负偏压增加 ($0\text{ V} \rightarrow -3\text{ V}$) 时逐渐向右移动,这是因为隔离效果不是非常理想,隔离电阻值不够大,吸收区和增益区之间存在着漏电流^[12]。从图 2(b)中可以看到,随着负偏

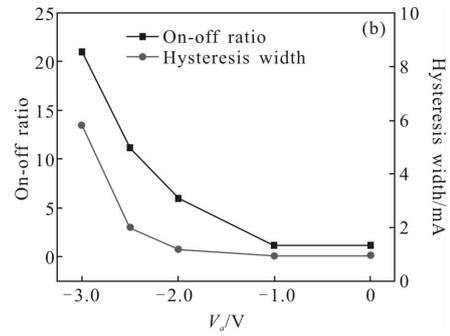
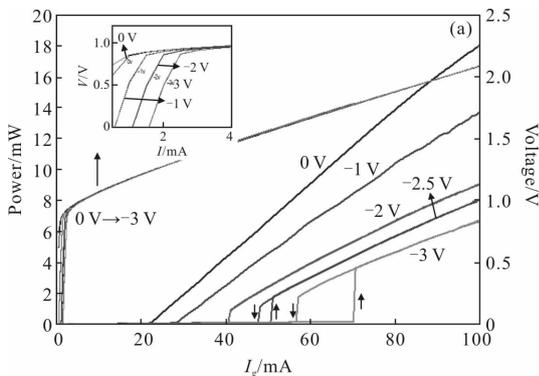


图 2 在不同的吸收区电压时,(a)激光器输出功率及增益区电压和增益区电流的关系(b)开关比和回滞曲线环宽度的变化

Fig.2 On different absorber bias conditions, (a) relationship between output power, gain voltage and gain current of laser (b) change of on-off ratio and hysteresis width

压增加时,激光器的开关比变大,在 -3 V 偏压时,回滞曲开关比达到 21:1,回滞曲线环的宽度也变大,最大时宽度为 13.5 mA。所以激光器的电流阈值和回滞曲线环的宽度等参数都可以通过外加电场来控制。

在量子点半导体激光器中,在 QD 饱和吸收和电吸收的双向影响下,当增益区工作在阈值之上的某个电流时,激光器输出功率与吸收区的偏置电压之间也会表现出双稳态特性^[12],但在文中研制的 MQW 激光器中,并没有看到类似的情况,如图 3 所示,可以看到在增益区注入大电流时(45 mA), $P-V$ 曲线在阈值附近会有一个“跳变”,但没有双稳态现象发生,这与参考文献[11]报道的结果是一致的。

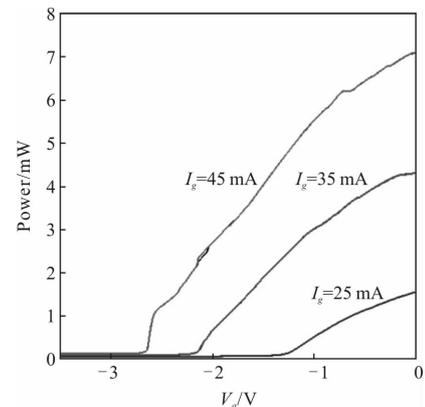


图 3 激光器输出功率与吸收区偏置电压之间的关系
Fig.3 Relationship between output power of the laser and the bias voltage in the absorber zone

为了了解双稳态形成的原因,图 4 给出了当增益区电流为 45 mA 时,吸收区电流和电压之间的关

系。吸收区的电流是由从增益区过来的漏电流和负偏压对电流的吸收决定的。在低负偏压时,电吸收效应还比较弱,吸收区是正向偏置的,整个激光器相当于一个普通的激光二极管;在高负偏压(小于-1.2 V)时,由于可饱和电吸收非常强,激光器的出光功率减小,导致吸收区电流的减少,从而出现负微分电阻的现象^[12]。与图 2 相比较,可以看到在有负微分电阻的负电压区域的 $P-I$ 曲线有更明显的双稳态现象。

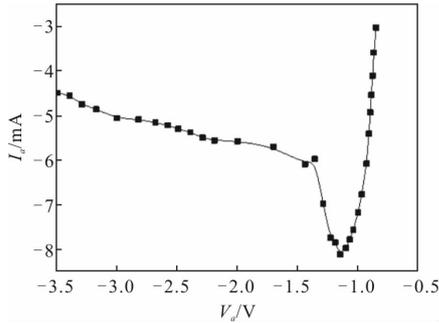


图 4 激光器吸收区电流与偏置电压之间的关系

Fig.4 Relationship between absorber current and bias voltage of laser

2 理论分析

2.1 速率方程模型

半导体激光器的稳态和动态特性与器件结构各参数之间及外部工作条件之间的关系,可用如下速率方程组表示^[10-11]:

$$\frac{dN_g}{dt} = \frac{I_g}{qV\gamma_g} - v_g g_s N_p - \frac{N_g}{\tau_g} - \frac{N_g}{\tau_{nr}} \quad (1)$$

$$\frac{dN_a}{dt} = \frac{I_a}{qV\gamma_a} - v_a g_a N_p - \frac{N_a}{\tau_a} - \frac{N_a}{\tau_{nr}} \quad (2)$$

$$\frac{dN_p}{dt} = \left[\Gamma v_g (\gamma_s g_s + \gamma_a g_a) - \frac{1}{\tau_p} \right] N_p - \Gamma \beta \left(\frac{N_g}{\tau_g} \gamma_g + \frac{N_a}{\tau_a} \gamma_a \right) \quad (3)$$

$$P_{out} = \frac{hc}{\lambda} \frac{\eta_i V N_p}{\Gamma \tau_p} \quad (4)$$

式中: dN_p 是 CCTS 半导体激光器的平均光子密度变化; dN_i 是载流子浓度变化, I_i 是各区注入的电流; τ_i 是载流子寿命; γ_i 是各区长度与激光器总腔长 L 的比。增益与载流子浓度及光子密度之间的关系可用线性关系表示为: $g_i = g_{0i}(N_g - N_{tr})(1 - \epsilon N_p)$,其中, g_{0i} 是增益系数, $i = g$ 或 a ,下标 g 和 a 分别表示激光器的增益区和吸收区, N_{tr} 是透明载流子密度, ϵ 是增益压缩因子; V 为激光器整个有源区的体积; Γ 为光限制因

子,两区激光器中的非辐射复合速率均为 τ_{nr} ; v_g 是群速度; β 是自发辐射系数。增益区中的载流子寿命 $\tau_g = 1/(B_{eff} * N_g)$, B_{eff} 为有效辐射系数。这里需要注意的是,吸收区中的载流子寿命与施加在其上的电场有关,Hiroyuki Uenohara^[11]认为当电场为 1.5×10^5 V/cm 时,光限制层中的载流子逃逸时间为 50 ps,而光子的寿命 τ_p 则满足:

$$\frac{1}{\tau_p} = \left\{ v_g \left[\alpha_{fc} + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right] \right\} \{ 1 + \gamma_1 + \gamma_2 V_a \} \quad (5)$$

式中: α_{fc} 为自由载流子损耗; R 为平均反射率; V_a 为施加在吸收区上的电压; γ_1 、 γ_2 为系数。采用四阶隆格-库塔法求解上述方程组,数值模拟过程中用到的物理参数的值如表 1 所示。

表 1 双区共腔激光器模拟所需参数

Tab.1 Numerical values used for modeling common cavity two-section laser

Parameter	Value
Gain constant g_{0g}/cm^2	2×10^{-16}
Gain constant g_{0a}/cm^2	80×10^{-16}
Transparency densities N_{tr}/cm^{-3}	1.25×10^{18}
Gain suppression factor ϵ/cm^3	2×10^{-17}
Nonradiative recombination rate τ_{nr}/ns	1
Parameters γ_1/γ_2	0.4/-0.6
Effective recombination coefficient $B_{eff}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1×10^{-10}
Spontaneous emission factor β	1×10^{-5}
Optical confinement factor Γ	0.15
Internal quantum efficiency η_i	0.1
Free carrier loss $\alpha_{fc}/\text{cm}^{-1}$	5

2.2 模拟结果及分析

在 CCTS 结构激光器工作在阈值电流之上时,如图 5 所示,模拟了不同的吸收区偏置电压(或电流)下,CCTS 激光器输出光功率随着增益区电流的变化。可以看到,不管是在吸收区施加偏压还是注入电流,随着负偏压的增加(-1 V → -2.5 V)或者负电流的增大(2 mA → -2 mA),激光器的阈值电流增大, $P-I$ 曲线都表现出越来越明显的双稳态特性,回滞曲线环的宽度增加,这些变化趋势与之前的实验结果是

一致的。而且在 -2.5 V 偏压时,激光器光转换开关比达到 41:1,在 -2 mA 电流下,开关比为 35:1。可见加偏压和加电流同样可以实现对吸收区电吸收效应的调制,也证实了仅仅调控吸收区的偏置状态,就可以实现调控双稳态的各项参数。

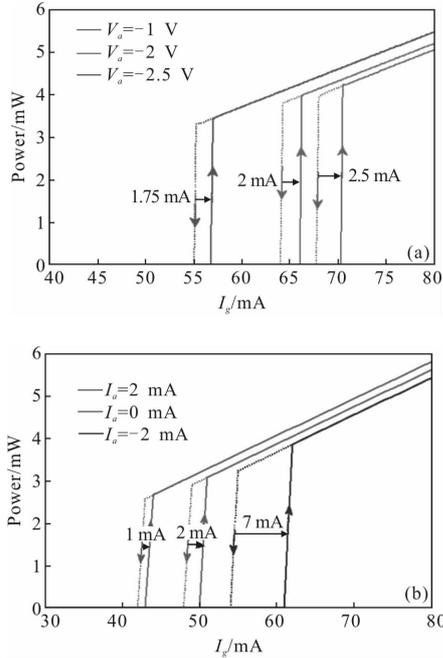


图 5 不同的吸收区偏置情况下,激光器输出光功率随增益区注入电流的变化:(a)不同偏压 V_a 下 (b)不同注入电流 I_a 下
Fig.5 Output power changes with the gain current under different absorber bias conditions: (a) different bias voltage V_a (b) different injection current I_a

由于吸收区的载流子寿命与吸收区所加的电压息息相关,它等于吸收区的载流子逃逸时间, Malins 用 pump-probe 技术测 QW 结构吸收区载流子的动态变化^[15],证明在电场的作用下,载流子的逃逸时间由于载流子耗尽效应会随着负偏压的增加而成 e 指数减小。因此进一步分析了吸收区载流子寿命对激光器双稳态的影响。

如图 6 所示,对于不同的吸收区载流子寿命,得到了输出光功率与增益区电流之间的关系。图 6(a)中,三种情况下,吸收区都没有加任何偏置, $P-I$ 曲线有明显的双稳态,载流子寿命越长,阈值电流越小,出光功率增加,因为这相当于较小的负偏压施加在吸收区上,由此可以看到,在较长的载流子寿命时,却有着最大的回滞曲线环,这是由于在吸收区没

有加偏置的缘故。图 6(b)就考虑了吸收区偏压的变化,当载流子寿命越短,逃逸越快,吸收区偏压越大时,激光器的 $P-I$ 曲线中双稳态越明显,回滞曲线环的宽度由 1.5 mA 增加到 3 mA,在近 300 mA 的电流注入下,开关比也达到了 107:1。这些都说明吸收区偏置电压及其与吸收区偏压相关的载流子逃逸时间对双稳态特性有很大的影响,或者说偏压下的电吸收和 QW 的非线性吸收作用对回滞曲线宽度及开关比的调控起非常重要的作用。

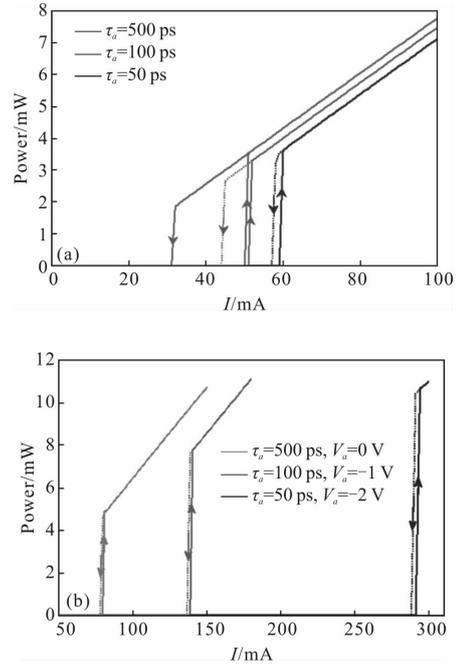


图 6 $P-I$ 关系 (a)不同的载流子逃逸时间 (b)不同的载流子逃逸时间及偏压下
Fig.6 $P-I$ characteristic (a) under different absorber carrier escape time (b) under different absorber carrier escape time and bias voltage

3 结论

文中通过制作的双区共腔结构多量子阱激光器,测试了激光器的光双稳态特性,发现随着吸收区负偏压的增加, $P-I$ 曲线表现出明显的双稳态,回滞环宽度在 -3 V 偏压时达到 13.5 mA,开关比达到了 21:1;但随着增益区电流的变化, $P-I$ 曲线并没有双稳态现象发生;吸收区 $V-I$ 曲线的负微分电阻现象解释了双稳态,也说明了在吸收区外加电场的重要性。通过对双区共腔激光器的双稳态特性的理论模拟,证明了外电场和与电场相关的载流子逃逸时间即

电吸收和 QW 饱和吸收在双稳态特性中起到重要调制作用。但在理论模拟中,开关比能达到 107:1,远远大于文中实验结果,由于大的开关比和宽的回滞曲线环是光转换、光开关等领域所追求的目标,所以在下一步的实验中,将优化激光器的结构设计和工艺,如采用离子注入的方式来实现更好的电阻隔离,以得到激光器更好的双稳态特性。

参考文献:

- [1] Lasher G J. Analysis of a proposed bistable injection laser [J]. *Solid-State Electronics*, 1964, 7(10): 707–716.
- [2] Zhang Qian, Zhang Peiqing, Zeng Jianghui, et al. Mid-infrared fiber grating optical switch of Ge₂₀As₂₀Se₁₅Te₄₅ chalcogenide glass [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0720002. (in Chinese)
- [3] Li Zhen, Luo Chao, Lu Tengting, et al. Infrared single photon detection system based on parallel avalanche photodiode array [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10S): 0006.
- [4] Jiang Guoqing, Xu Chen, Xie Yiyang, et al. Fabrication of proton-implanted photonic crystal vertical cavity surface emitting laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1205001. (in Chinese)
- [5] Ding Xiangdong, He Wei, Yao Qifeng, et al. Switchable erbium-doped fiber laser utilizing tunable Mach-Zehnder filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1005006. (in Chinese)
- [6] Cai Tongjian, Liu Yunqi, Zhang Xiaobei, et al. Generation of tunable multi-wavelength optical short pulses using self-seeded Fabry-Perot laser diode and tilted multimode fiber Bragg grating [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(4): 041403.
- [7] Zhao H, Zhu Y, Li F, et al. Wavelength bistability based on optical injection in a novel tunable dual mode laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3817–3831.
- [8] Qasaimeh O. Contrast ratio and hysteresis width of optical bistability in quantum-dot vertical-cavity semiconductor optical amplifiers integrated with MEMS membrane [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(3): 109.
- [9] Komolibus K, Piwonski T, Reyner C J, et al. Absorption dynamics of type-II GaSb/GaAs quantum dots [J]. *Opt Mater Express*, 2017, 7(4): 2707.
- [10] Harder C, Lau K Y, Yariv A. Bistability and pulsations in semiconductor lasers with inhomogeneous current injection [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(9): 1351–1361.
- [11] Uenohara H, Takahashi R, Kawamura Y, et al. Static and dynamic response of multiple-quantum-well voltage-controlled bistable laser diodes [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(5): 873–883.
- [12] Huang X D, Stintz A, Li H, et al. Bistable operation of a two-section 1.3 μm InAs quantum dot laser -absorption saturation and the quantum confined stark effect [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(3): 414–417.
- [13] Jiang Liwen, Ye Xiaoling, Zhou Xiaolong, et al. Optical bistability in a two-section InAs quantum-dot laser [J]. *Journal of Semiconductors*, 2010, 31(11): 114012.
- [14] Li Jianmeng, Peng Huaide, Wang Qiming, et al. GaAs/AlGaAs single quantum well (SQW) bistable laser [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1990, 11(6): 478–481.
- [15] Malins D B, Gomez-Iglesias A, White S J, et al. Ultrafast electroabsorption dynamics in an InAs quantum dot saturable absorber at 1.3 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(17): 171111.