

# 隧道结级联量子阱锁模激光器

刘震<sup>1</sup>, 王嘉琪<sup>1</sup>, 于红艳<sup>1</sup>, 周旭亮<sup>1</sup>, 陈妮兮<sup>2</sup>, 丁颖<sup>3</sup>, 李召松<sup>1</sup>, 王圩<sup>1</sup>, 潘教青<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院半导体研究所半导体材料科学重点实验室, 低维半导体材料与器件北京市重点实验室, 北京 100083;

<sup>2</sup>北京大学物理学院人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871;

<sup>3</sup>格拉斯哥大学物理学院, 格拉斯哥 G12 8LT, 英国

**摘要** 采用两段式被动锁模激光器结构, 利用隧道结级联两组量子阱有源区, 实现了一种工作在近红外波段的单片集成大功率量子阱被动锁模激光器。对该锁模激光器的锁模特性进行了表征, 测试得到该锁模激光器工作中心波长为 1038 nm, 激光脉冲重复频率为 24.37 GHz, 改变激光器的工作条件, 其脉冲宽度变化范围为 2.19~9.27 ps, 峰值功率变化范围为 76~308 mW, 表明该锁模激光器具有单片集成、体积小、功率大、重复频率高等优良特性。同时, 在一定的反向偏压条件下, 该锁模激光器呈现出功率双稳态的特性, 扩大了有效锁模范围。

**关键词** 激光器; 锁模激光器; 半导体激光器; 多量子阱; 超快激光

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0314001

## Tunnel Junction Cascade Quantum Well Mode-Locked Laser

Liu Zhen<sup>1</sup>, Wang Jiaqi<sup>1</sup>, Yu Hongyan<sup>1</sup>, Zhou Xuliang<sup>1</sup>, Chen Weixi<sup>2</sup>,  
Ding Ying<sup>3</sup>, Li Zhaosong<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>, Pan Jiaoqing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Beijing Key Laboratory of Low Dimensional Semiconductor Materials and Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory for Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

<sup>3</sup>School of Engineering, University of Glasgow, Glasgow G12 8LT, UK

**Abstract** Utilizing two section passive mode-locked laser structure, a monolithic high-power quantum well passive mode-locked laser operating in the near-infrared band is realized by cascading two quantum well active regions by the tunnel junction. The mode-locked characteristics of the model-locked laser are measured. The results show that the center wavelength of this laser is 1038 nm, the pulse repetition frequency is 24.37 GHz, and when the working condition of lasers changes, the pulse width varies from 2.19 ps to 9.27 ps. The peak power variation range is from 76 mW to 308 mW. It shows that the mode-locked laser has the advantages of monolithic integration, compact size, high power and high repetition frequency. Meanwhile, under certain reverse bias conditions, the mode-locked laser exhibits the characteristics of power bistability and enlarges the effective mode-locking range.

**Key words** lasers; mode-locked lasers; semiconductor lasers; multiple quantum well; ultrafast lasers

**OCIS codes** 140.4050; 140.5960; 040.4200; 320.7090

## 1 引 言

锁模激光器是一种超短脉冲源, 在物理学、化学、生物学、医学、光通信等领域都有着广泛应用<sup>[1-2]</sup>。半导体锁模激光器以体积小、效率高、成本低、可单片集成、波长调谐灵活等优点, 可应用于光互连<sup>[3]</sup>、光时分复用(OTDM)、高速时钟恢复、光学取样<sup>[4]</sup>、模/数转换<sup>[5]</sup>、微波和毫米波测量<sup>[6]</sup>以及生物成像<sup>[7-8]</sup>等领域。特别是被动锁模半导体激光器, 因其工作机理简单、有效而被广泛采用, 它利用可饱和吸收体对光的非线性吸收作

收稿日期: 2016-10-10; 收到修改稿日期: 2016-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(61604144, 61504137)

作者简介: 刘震(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体锁模激光器方面的研究。E-mail: liuzhen@semi.ac.cn

导师简介: 潘教青(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事半导体激光器方面的研究。E-mail: jqpan@semi.ac.cn(通信联系人)

用产生超短脉冲激光,工作时无需外加射频(RF)信号,更具有体积小、成本低、单片集成等优势,是一个极具前景的发展方向。同时不断提高半导体锁模激光器的输出功率,用以取代传统的固体锁模激光器,一直是国内外半导体激光器研究的重要方向。不过,以量子阱有源区为基础的宽波导大功率激光器,为了克服激光出射端面处的高光功率密度引起的端面灾变性烧毁(COD)<sup>[9]</sup>,大注入电流导致的器件热烧毁等<sup>[10]</sup>问题,需要不断增大波导厚度,对材料外延质量与激光器光场模式的控制能力提出了越来越高的要求。而通过隧道结连接多组量子阱有源区,使前一组有源区中的复合载流子通过反向隧道结获得再生,并在下一组有源区继续复合激光发光,则可以显著提升半导体激光器的内量子效率,而且多组有源区扩大了激光器的发光区使激光器出射端面处的光功率密度大幅度降低,也显著降低了端面灾变性损伤对大功率半导体激光器的限制能力。同时在同等功率水平下成倍地降低了器件的注入电流,大幅度减少了激光器的热效应,进而提升了半导体激光器的输出功率<sup>[11-12]</sup>。因此,基于隧道级联量子阱激光器,结合被动锁模激光器的设计原理,制备具有大功率、高重频、小体积的皮秒脉冲光源,可以更好地满足实际科学与工业应用的要求。

本文采用两段式被动锁模激光器结构,利用隧道结级联两组量子阱有源区,实现了一种工作在近红外波段的单片集成大功率量子阱被动锁模激光器。该半导体锁模激光器工作中心波长为 1038 nm,激光脉冲重复频率为 24.37 GHz,其脉冲宽度变化范围为 2.19~9.27 ps,峰值功率变化范围为 76~308 mW。同时,讨论了锁模激光器增益区电流在两种变化方向下锁模区发生变化的特性,与吸收区反向偏压对输出脉冲宽度的影响。

## 2 器件结构与工艺制备

隧道结级联量子阱锁模激光器的材料结构如表 1 所示,其中两组量子阱有源区由一个 GaAs 重掺杂隧道结相连,每个有源区包括两个  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$  量子阱。GaAs 重掺杂隧道结反向击穿电压仅 0.5 V,有利于降低两组量子阱有源区级联后的工作电压,提高斜率效率。通过调控材料组分,使量子阱的波长位于 1038 nm 附近。波导层包括组分线性变化的 AlGaAs 分别限制异质结与 AlGaAs 盖层共同起到光场限制作用。

表 1 隧道级联量子阱锁模激光器的材料结构

Table 1 Material structure of tunnel junction cascade quantum well mode-locked laser

Material layer	Doping concentration	Thickness /nm
GaAs	C: $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	300
$\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$	C: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	1800
$\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$	I	100
GaAs	I	400
$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	I	5/15/5
GaAs	I	80
$\text{Al}_{0.47-0.26}\text{Ga}_{0.53-0.74}\text{As}$	I	50
$\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$	Si: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	40
GaAs	Si: $1.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	25
GaAs	C: $2.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	10
$\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$	C: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	40
$\text{Al}_{0.26-0.47}\text{Ga}_{0.74-0.53}\text{As}$	I	50
GaAs	I	80
$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	I	5/15/5
$\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$	I	400
$\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$	Si: $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	1800
GaAs buffer	Si: $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	400

器件制备过程中,通过低压金属有机化合物气相外延技术(LP-MOCVD)在 N 型重掺杂 GaAs 衬底上依次外延各层半导体材料。利用光刻与感应耦合等离子体(ICP)干法刻蚀技术,制备出宽为 3.3  $\mu\text{m}$ 、深为 2.4  $\mu\text{m}$ 的脊形波导,如图 1(a)所示。通过等离子体增强化学气相沉积技术(PECVD)淀积一层二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )作为电绝缘层,然后再用自对准光刻技术刻出电接触窗口。利用磁控溅射和真空蒸发制作 TiAu P 型电极,和 AuGeNi N 型电极。采用湿法刻蚀宽为 15  $\mu\text{m}$ 的隔离沟,腐蚀到 AlGaAs 上盖层,实现增益区和

可饱和吸收(SA)区的电隔离。器件测试时,将外延片解理成腔长 1515  $\mu\text{m}$  的锁模激光器管芯,其中增益区长为 1440  $\mu\text{m}$ ,可饱和吸收区长为 60  $\mu\text{m}$ ,如图 1(b)所示。

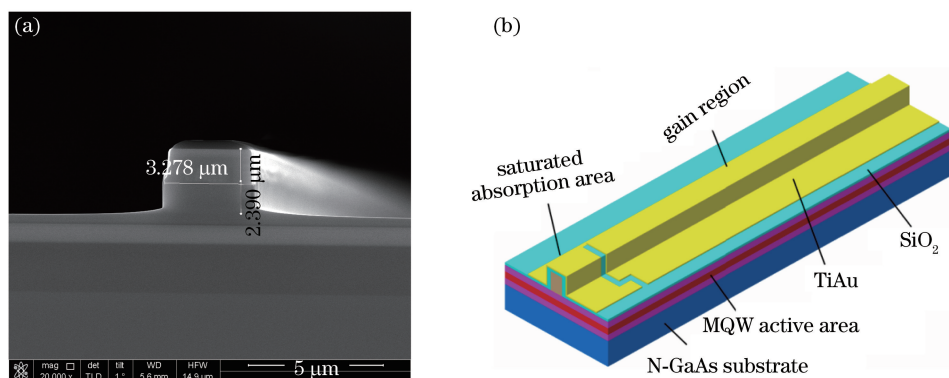


图 1 隧道结级联量子阱锁模激光器的 (a) 脊波导扫描电镜图与 (b) 结构图

Fig. 1 (a) Ridge waveguide scanning electron microscope and (b) structure figure of the tunnel cascade quantum well mode-locked laser

### 3 器件特性测试与分析

1038 nm 隧道结级联量子阱锁模激光器的测试系统如图 2 所示。从激光器发出的脉冲光经过透镜准直后通过光隔离器(OI),避免了光反射进入激光器中形成反馈干扰,从而影响激光器的正常工作。然后,脉冲光通过光纤准直器后将光束耦合到单模光纤(SMF)中,经过光纤分束器(FS),将光脉冲分别输入到频谱仪(RFSA)、光谱仪(OSA)和自相关仪进行对应的测试,同时积分球测试锁模条件下对应的光功率。

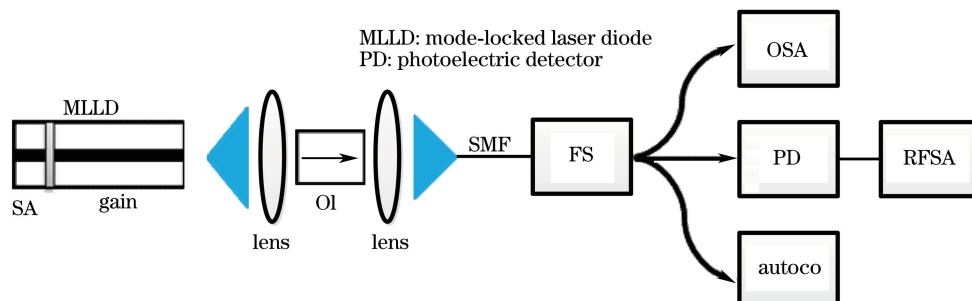


图 2 锁模激光器脉冲测试系统

Fig. 2 Pulse test system of mode-locked laser

测试时,根据被动锁模激光器的工作原理,需要对增益区注入正向电流,同时在饱和吸收区加反向偏置电压。图 3 为当加反向偏压分别为 5.2 V 和 5.3 V 时的功率-电流曲线,可以看到,当在饱和吸收区加不同反向偏压时,增益电流由大到小和由小到大的过程中锁模激光器的功率-电流特性会呈现不同的特性。

当饱和吸收区所加的反向偏压超过 5.2 V 时,功率在增益电流由大到小和由小到大的过程中呈现出功率双稳态特性。这主要是由于饱和区在一定反向偏置电压下,隧道结级联的两组量子阱有源区中,增大电流过程与减小电流过程对增益区的输出光在反偏量子阱中的吸收有一定不同导致的<sup>[13]</sup>。

由图 4 可知,当增益电流由小到大[图 4(a)]和由大到小[图 4(b)]时,锁模激光器呈现出两个不同的锁模区域,因此可以控制不同的增益区电流和饱和吸收区电压来扩展激光器的锁模区域,实际应用时可以更加方便地调节所需的脉冲宽度与功率大小。

在饱和吸收反向偏压为 5.8 V 时,将增益电流分别从 135 mA 加到 185 mA 和从 185 mA 降到 135 mA 的脉冲,测量脉冲时间的变化情况如图 5 所示。随着增益电流的不断增大,脉冲宽度逐渐减小,直至到达锁模边缘区域,脉冲宽度最小可达 2.19 ps。而在增益电流由小到大和由大到小的两个过程中脉冲宽度的变化没有显著差异。由此可知,功率的双稳态特性对器件的脉冲宽度没有明显的影响,只是存在不同的锁模区域,说明隧道级联量子阱技术可以增大半导体被动锁模激光器的锁模区域。

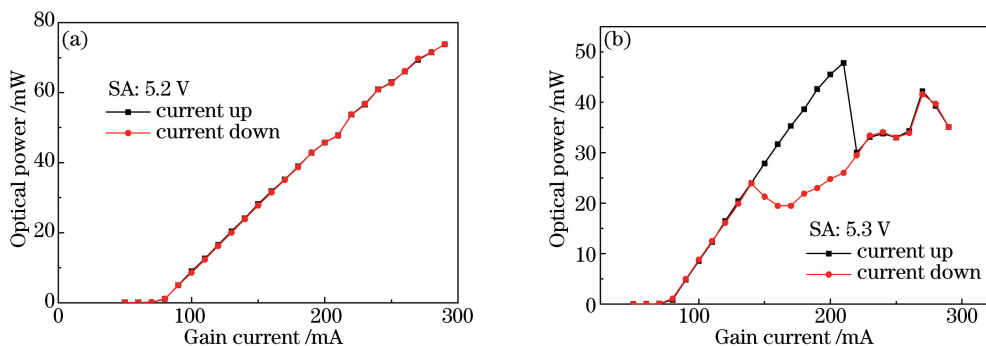


图 3 隧道结级联量子阱锁模激光器在(a)5.2 V和(b)5.3 V偏压下测得的功率-电流特性曲线  
Fig. 3 Power-current curves of tunnel junction cascade quantum well mode-locked laser at bias voltage of (a) 5.2 V and (b) 5.3 V

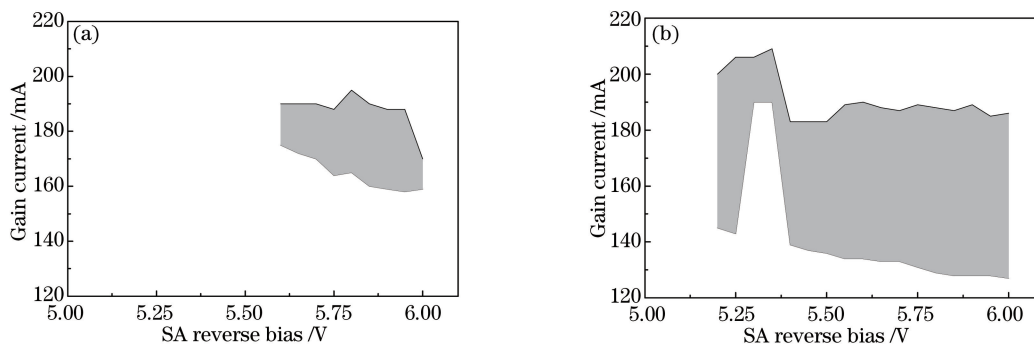


图 4 隧道结级联量子阱锁模激光器增益电流(a)由小到大过程和(b)由大到小过程中的锁模区域  
Fig. 4 Mode-locked areas of gain current in (a) increasing and (b) decreasing course of tunnel junction cascade quantum well mode-locked laser

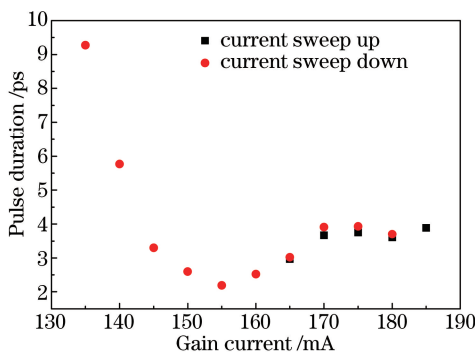


图 5 SA 反向偏压区在 5.8 V 时锁模激光器脉冲宽度随增益区电流由小到大与由大到小过程中的变化曲线  
Fig. 5 Pulse duration changing with the gain current in increasing and decreasing course when SA reverse bias voltage is fixed at 5.8 V

为了表征激光器的锁模特性,选取增益电流由小到大时饱和吸收区电压 5.8 V、增益区电流为 180 mA 与增益电流由大到小时锁模区域内饱和吸收区偏压为 5.8 V、增益区电流为 150 mA 两个条件进行测试。锁模激光器输出脉冲光的自相关迹和光谱曲线均采用 Sech2 函数拟合。

当饱和吸收区偏压为 5.8 V、增益区注入电流为 180 mA 时,测到锁模激光器输出脉冲宽度为 3.6 ps [图 6(a)], 激光中心波长为 1038 nm, 光谱半峰全宽  $\Delta\lambda_{FWHM} = 1.03$  nm [图 6(b)], 振荡频率为 24.37 GHz [图 6(c)]。此时, 测到平均光功率为 19.6 mW, 换算可得峰值功率为 196.6 mW。时间带宽积由  $T_{BWP} = (c \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta\tau) / \lambda^2 = \Delta\tau \cdot \Delta\nu = a \sqrt{1 + a^2}$  求得为 1.03。

当饱和吸收区偏压为 5.8 V、增益区注入电流为 150 mA 时,测到锁模激光器输出脉冲宽度为 2.6 ps [图 7(a)], 激光中心波长为 1038 nm, 光谱半峰全宽  $\Delta\lambda_{FWHM} = 0.85$  nm [图 7(b)], 振荡频率为 24.37 GHz [图 7

(c)]. 此时, 测到平均光功率为 15.2 mW, 换算可得峰值功率为 211.1 mW。时间带宽积由  $T_{\text{BWP}} = (c \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta\tau) / \lambda^2 = \Delta\tau \cdot \Delta\nu = a \sqrt{1 + \alpha^2}$  求得为 0.62。

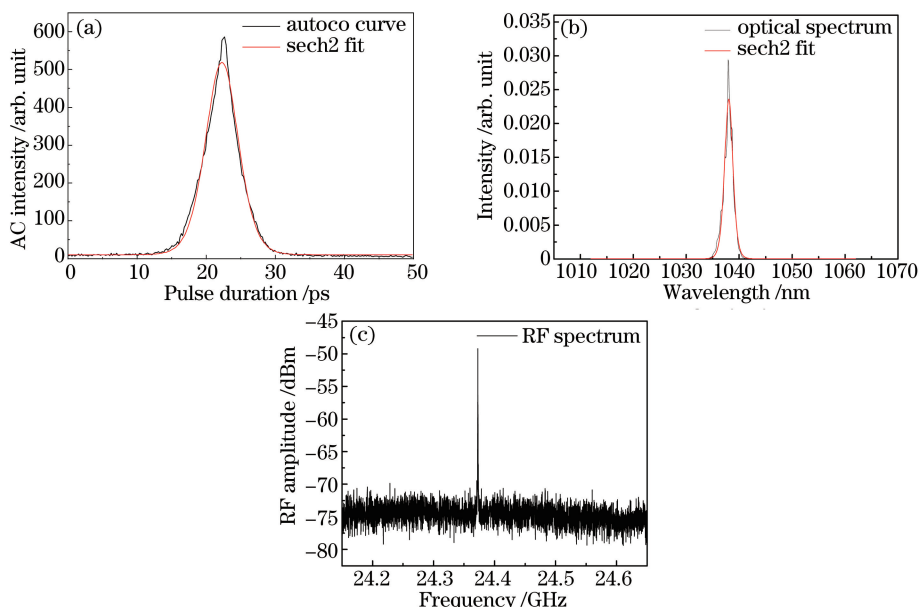


图 6 增加增益区电流时的典型锁模脉冲特性。(a)自相关测试曲线;(b)光谱;(c)射频频谱  
Fig. 6 Typical mode-locked characteristics in increasing gain current. (a) Autocorrelation curve;  
(b) optical spectrum; (c) RF spectrum

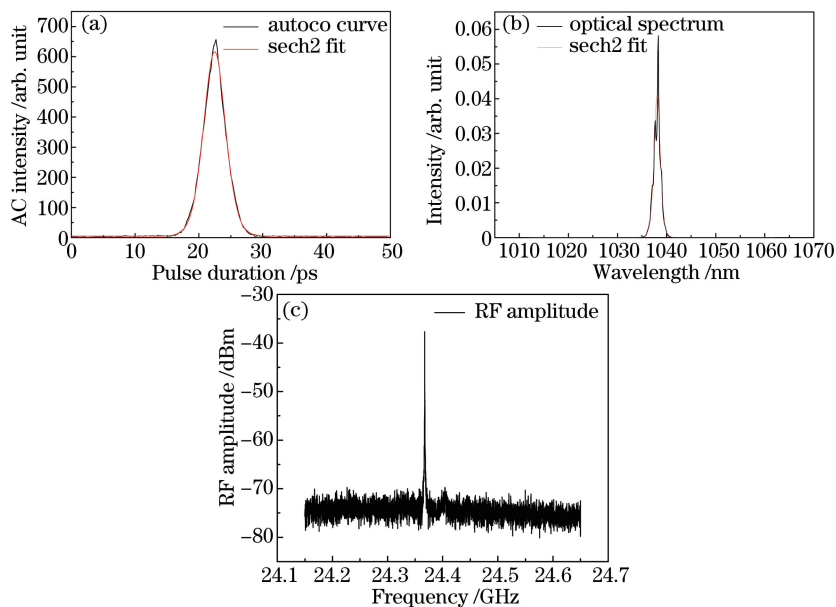


图 7 减小增益区电流时的典型锁模脉冲特性。(a)自相关测试曲线;(b)光谱;(c)射频频谱  
Fig. 7 Typical mode-locked characteristics in decreasing gain current. (a) Autocorrelation curve;  
(b) optical spectrum; (c) RF spectrum

对于反向偏压对脉冲宽度的影响, 由图 8 可知, 当固定增益区电流为 180 mA 时, 将反向偏压从 5.6 V 增加到 6 V, 然后又从 6 V 减少到 5.6 V, 观察锁模激光器的脉冲输出特性。可以看到, 随着反向偏压的不断增加, 输出脉冲宽度逐渐变小, 当反向偏压为 6 V 时, 脉冲宽度达到最小值 3.1 ps, 这是因为饱和吸收恢复时间随反向偏压变大而逐渐减小<sup>[14]</sup>。同时可以看到, 脉冲宽度在反向偏压由小到大和由大到小的两个过程中没有明显的变化, 说明器件在反向偏压变化时的锁模特性比较稳定。

最终, 通过统计全部隧道结锁模激光器在全锁模状态下的数据, 得到隧道结锁模激光器的中心波长为



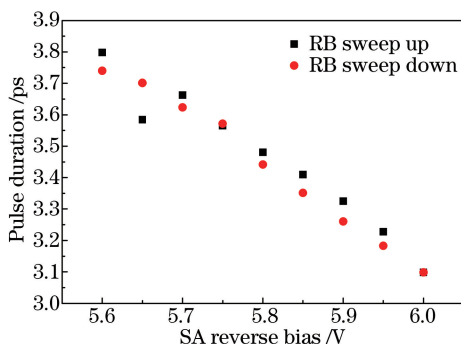


图8 增益区电流为180 mA时锁模激光器脉冲宽度随SA区反向偏压由小到大和由大到小过程中的变化曲线

Fig. 8 Pulse duration changing with the increasing and decreasing of SA reverse bias voltage course gain when gain current is fixed at 180mA

1038 nm, 重复频率为24.37 GHz, 平均功率从7 mW变化到30 mW, 峰值功率从76 mW变化到308 mW, 脉冲宽度从2.19 ps变化到9.27 ps。

## 4 结 论

采用两段式被动锁模激光器结构, 利用隧道结级联两组量子阱有源区, 创新性地实现了一种工作在近红外波段的单片集成大功率量子阱被动锁模激光器。对该半导体锁模激光器的锁模特性进行了表征, 测试得到该锁模激光器工作中心波长为1038 nm, 激光脉冲重复频率为24.37 GHz, 其脉冲宽度变化范围为2.19~9.27 ps, 峰值功率变化范围为76~308 mW。与国外相近波段的单片集成半导体被动锁模激光器相比, 在较高的重复频率与较短的脉冲时间条件下, 实现了相当高的峰值功率<sup>[15-16]</sup>。同时在实验中发现, 在一定的反向偏压条件下, 该锁模激光器呈现出功率双稳态的特性, 扩大了有效锁模范围。实验结果显示, 该锁模激光器具有单片集成、体积小、功率大、重复频率高等优良特性, 可用于光通信、光传感等多个领域, 是一种具有广阔应用前景的超短激光脉冲光源。

**致谢** 感谢中国科学院半导体研究所光子集成技术研究组的王宝军、边静、安欣、周代兵、王伟工程师对于本文材料生长、工艺制备与器件测试所给予的大力协助。

## 参 考 文 献

- [1] Li Pan, Shi Lei, Wang Xuefeng, *et al.* Experimental investigation of the supercontinuum generated by amplified high repetition mode-locked pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s2): s214006.  
李 磐, 时 雷, 王学锋, 等. 基于高重复频率锁模脉冲放大产生超连续谱的实验研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(s2): s214006.
- [2] Gou Doudou, Yang Sigang, Yin Feifei, *et al.* Widely tunable mode-locked fiber laser operating in 1  $\mu\text{m}$  wavelength range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706013.  
苟斗斗, 杨四刚, 尹飞飞, 等. 1  $\mu\text{m}$  波段宽带可调谐锁模光纤激光器[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706013.
- [3] Liu S, Wang H, Sun M, *et al.* AWG-based monolithic GHz multichannel harmonically mode-locked laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(3): 241-244.
- [4] Merghem K, Akrouit A, Martinez A, *et al.* Short pulse generation using a passively mode locked single InGaAsP/InP quantum well laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10675-10683.
- [5] Sarailou E, Ardey A, Delfyett P J. Alinearized intensity modulator for photonic analog-to-digital conversion using an injection-locked mode-locked laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(21): 3440-3445.
- [6] Nagatsuma T, Shinagawa M, Sabri N, *et al.* 1.55  $\mu\text{m}$  photonic systems for microwave and millimeter-wave measurement[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, 49(10): 1831-1839.
- [7] Hellwarth R, Christensen P. Nonlinear optical microscope using second harmonic generation[J]. *Appl Opt*, 1975, 14(2): 247-248.
- [8] Wang H, Kong L, Forrest A, *et al.* Ultrashort pulse generation by semiconductor mode-locked lasers at 760 nm[J].

- Optics Express, 2014, 22(21): 25940-25946.
- [9] Fukuda M, Okayasu M, Temmyo J, *et al.* Degradation behavior of 0.98- $\mu\text{m}$  strained quantum well InGaAs/AlGaAs lasers under high-power operation[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(2): 471-476.
- [10] Makino T, Evans J D, Mak G. Maximum output power and maximum operating temperature of quantum well lasers [J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(20): 2871-2873.
- [11] Lian Peng, Yin Tao, Gao Guo, *et al.* Novel coupled multi-active region high power semiconductor lasers cascaded via tunnel junction[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(12): 2374-2377.  
廉 鹏, 殷 涛, 高 国, 等. 新型多有源区隧道再生光耦合大功率半导体激光器[J]. 物理学报, 2000, 49(12): 2374-2377.
- [12] Li Jianjun, Han Jun, Deng Jun, *et al.* Tunnel regeneration high-power semiconductor laser with four active regions[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(12): 1819-1822.  
李建军, 韩 军, 邓 军, 等. 隧道再生四有源区大功率半导体激光器[J]. 光学学报, 2006, 26(12): 1819-1822.
- [13] Lentine A L, Miller D A B, Henry J E, *et al.* Multistate self-electro optic effect devices[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(8): 1921-1927.
- [14] Williams K A, Thompson M G, White I H. Long-wavelength monolithic mode-locked diode lasers[J]. New Journal of Physics, 2004, 6(1): 179.
- [15] Gopinath J T, Chann B, Huang R K, *et al.* 980-nm monolithic passively mode-locked diode lasers with 62 pJ of pulse energy[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(12): 937-939.
- [16] Lorensen D, Unold H J, Maas D, *et al.* Towards wafer-scale integration of high repetition rate passively mode-locked surface-emitting semiconductor lasers[J]. Applied Physics B, 2004, 79(8): 927-932.