

# 980 nm 高功率 DBR 半导体激光器的设计及工艺

乔闯<sup>1,2</sup>, 苏瑞巩<sup>2</sup>, 李翔<sup>2</sup>, 房丹<sup>1\*</sup>, 方铤<sup>1</sup>, 唐吉龙<sup>1</sup>, 张宝顺<sup>2</sup>, 魏志鹏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学理学院高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123

**摘要** 设计并制作了非对称大光腔波导结构, 利用分布布拉格反射技术, 实现了 980 nm 波段高功率半导体激光器的稳定输出。在实验过程中, 采用电子束光刻技术, 结合感应耦合等离子刻蚀工艺, 利用 SiO<sub>2</sub> 作为硬掩模, 并通过减小 Ar 离子的束流来减弱刻蚀过程中由于物理轰击作用对 SiO<sub>2</sub> 硬掩模的消耗, 制作出形貌良好、周期为 890 nm、占空比为 50% 的分布布拉格反射器光栅; 采用脊型波导激光器的制作工艺, 成功制作出分布布拉格反射激光器, 当器件注入电流 15 A 时, 该激光器的输出功率高达 10.7 W, 斜率效率为 0.73 W/A, 器件阈值电流为 0.95 A, 中心波长为 979.3 nm。该研究为 GaAs 基 DBR 半导体激光器的制作与研究提供了新思路。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 分布布拉格反射器; 电子束光刻; 高功率

中图分类号 TN305; TN365

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0701002

## Design and Fabrication of 980 nm Distributed Bragg Reflection Semiconductor Laser with High Power

Qiao Chuang<sup>1,2</sup>, Su Ruigong<sup>2</sup>, Li Xiang<sup>2</sup>, Fang Dan<sup>1\*</sup>, Fang Xuan<sup>1</sup>,  
Tang Jilong<sup>1</sup>, Zhang Baoshun<sup>2</sup>, Wei Zhipeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics (SINANO), Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China

**Abstract** An asymmetric large optical cavity waveguide structure is designed and fabricated, and a stable output of a 980 nm high power semiconductor laser is realized by combining distributed Bragg reflection (DBR) technology. The experiments use electron beam lithography technology and an inductive coupled plasma etching process with SiO<sub>2</sub> as a hard mask. By reducing the Ar beam current, the consumption of the SiO<sub>2</sub> hard mask due to physical bombardment is reduced. A DBR grating with good morphology, period of 890 nm, and duty cycle of 50% is fabricated. Combined with ridge waveguide laser fabrication technology, the DBR laser is successfully fabricated. Finally, when the device injection current is 15 A, the output power is up to 10.7 W, slope efficiency is 0.73 W/A, device threshold current is 0.95 A, and central wavelength is 979.3 nm. This study presents a new approach for the fabrication and research of GaAs-based DBR semiconductor lasers.

**Key words** lasers; semiconductor lasers; distributed Bragg reflector; electron beam lithography; high power

**OCIS codes** 140.5960; 140.3070; 160.6000; 220.4000; 140.3460

## 1 引 言

近年来, 半导体激光器以体积小、质量轻、光电转化率高、方便携带等优点, 在工业应用中扮演着越来越重要的角色<sup>[1-5]</sup>。其中 980 nm 波段半导体激光器

引起研究人员的广泛关注, 这主要是因为其不仅是抽运光纤激光器和固体激光器的新一代抽运源, 还可以广泛应用在医学领域中<sup>[6-7]</sup>。但是受到结构设计、外延和封装技术的影响, 较低的激光输出功率一直制约着 980 nm 波段半导体激光器的发展, 所以提升激光

收稿日期: 2019-01-31; 修回日期: 2019-03-04; 录用日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(11674038, 61674021, 61574022, 61704011)

\* E-mail: fangdan19822011@163.com

输出功率一直是该领域的研究热点之一。

1975年,贝尔实验室利用GaAs衬底成功制备了第一个单模激射的分布布拉格反射(DBR)激光器,这个研究成果使得Bragg反射器走上了光电子器件的应用之路<sup>[8]</sup>。2008年,Hasler等<sup>[9]</sup>成功制备了1060 nm窄线宽DBR锥形半导体激光器,将三量子阱的超大光腔波导结构与6阶光栅相结合,当脊波导处的电流( $I_{RW}$ )为300 mA时,器件的输出功率达到5 W。2010年,德国费尔南德-布朗研究所(FBH)利用干刻蚀技术制作出6阶表面光栅和脊型波导结构,器件的总长度为4 mm,其单模输出功率超过1 W,激射波长为974 nm<sup>[10]</sup>。同年,德国FBH研究所制作了GaAs基980 nm DBR半导体激光器,其条宽为90  $\mu\text{m}$ ,输出功率达到14.3 W,转换效率为50%,通过引入6阶光栅的实现了波长稳定性的提升,波长漂移仅为0.074 nm/K<sup>[11]</sup>。2014年,Decker等<sup>[12]</sup>设计了80阶V型光栅结构的DBR半导体激光器,该器件的连续输出功率达到6 W,转换效率大于50%,光谱宽度小于0.7 nm。虽然DBR激光器的发展速度很快,在窄线宽、波长稳定方面都有很多出色的研究成果,但是在高功率方面的研究却少有报道,本文为了实现DBR激光器的高功率输出,从器件结构设计入手,通过优化制备工艺的手段来实现器件高功率输出。

## 2 器件结构

采用大光腔非对称波导结构来增加腔面处光斑的横向尺寸,降低有源区光限制因子,从而降低腔面光功率密度,提高器件的可靠性。采用金属有机化合物化学气相沉淀(MOCVD)法生长外延片,本研究中所生长的外延片结构参数如表1所示<sup>[13]</sup>,其中p++为p型重掺杂区,n+为n型重掺杂,I型为本征层,整个外延片为PIN结构。有源区为非掺杂7 nm厚的InGaAs三量子阱材料,上、下波导层为1.1  $\mu\text{m}$ 和1.6  $\mu\text{m}$ 厚的p型、n型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 材料,上、下限制层均为1  $\mu\text{m}$ 厚的 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 材料,其中p型掺杂元素为Be,n型掺杂元素为Si,掺杂浓度(粒子数浓度)均为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ;接触层为400 nm厚的GaAs材料,其Be元素的掺杂浓度为 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。

对于非对称大光腔结构,基于波长为980 nm的激射光,为了获得较高的输出光质量和较小的光限制因子,有源区采用7 nm厚的三量子阱结构。为了获得较低的阈值增益,需要选择合适的p层和

n层波导层厚度差。若厚度差太大,则基模光场将偏离有源区;若厚度差太小,则基膜和高阶模间光限制因子差值小,易产生高阶模<sup>[14]</sup>。经计算,当厚度差为0.5  $\mu\text{m}$ 时,可以获得最佳的阈值增益;当p型和n型波导限制层厚度太厚时,器件电阻过大,高阶模阈值减少,引入模式竞争;当限制层厚度太薄,限制层作用将丧失,辐射损耗增大,因此,本研究选择上、下限制层厚度均为1  $\mu\text{m}$ 的结构,以最大程度地抑制高阶模的产生。

表1 半导体激光外延片结构

Table 1 Diode-laser epitaxial layer structures

Type	Component	Thickness / nm	Doping content / $\text{cm}^{-3}$
p++	GaAs	400	$1 \times 10^{20}$
p	$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	1000	$1 \times 10^{18}$
p	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	1100	$1 \times 10^{18}$
I	$\text{Al}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$	10	
I	InGaAs	7	
I	$\text{Al}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$	10	
I	InGaAs	7	
I	$\text{Al}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$	10	
I	InGaAs	7	
I	$\text{Al}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$	10	
n	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	1600	$1 \times 10^{18}$
n	$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	1000	$1 \times 10^{18}$
n+	GaAs	200	$1 \times 10^{18}$
Substrate	GaAs		

## 3 DBR光栅设计

本研究设计并制作了6阶DBR光栅结构,以满足光谱窄线宽的需求。利用散射矩阵导出DBR反射率与其耦合系数 $\kappa$ 的关系,通过优化耦合长度、占空比、刻蚀深度等光栅参数,最终获得具有高反射率的DBR结构。

DBR反射率与其耦合系数 $\kappa$ 的关系为

$$R = |r|^2 = \tan^2 h^2(\kappa L), \quad (1)$$

式中: $r$ 为DBR结构的反射系数; $R$ 为反射率; $L$ 为光栅区长度; $h$ 为光栅刻蚀剩余层厚度。根据(1)式模拟得到的反射率与光栅区长度的关系如图1。

从图1可以看出,当光栅区长度达到500  $\mu\text{m}$ 时,反射率达到90%,并且随着光栅区长度的继续增加,反射率的增加幅度趋于平缓,为了简化制作工艺并减少损耗,选择的光栅区长度为500  $\mu\text{m}$ 。根据布拉格条件

$$\Lambda = \frac{m\lambda}{2n_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

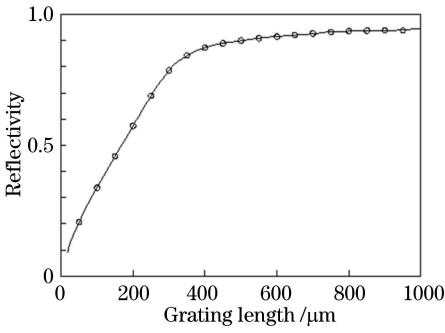


图 1 光栅区长度与反射率关系曲线

Fig. 1 Relationship between grating length and reflectivity  
 式中： $\Lambda$  为光栅周期； $m$  为光栅阶数； $n_{\text{eff}}$  为材料的有效折射率； $\lambda$  为出射光的波长。由(2)式可知，光栅阶数  $m$  与光栅周期  $\Lambda$  成正比，即阶数越大，周期越长。但是对于 DBR 光栅而言，在占空比、刻蚀深度、光栅长度和光栅材料等条件相同的情况下，光栅反射率随着光栅阶数的增加而降低。为了均衡器件性能与工艺制作难度，本研究选择制作 6 阶光栅，输入波长为 980 nm，材料的有效折射率约为 3.3<sup>[15]</sup>，因此，可以得到光栅的周期约为 890 nm。

### 4 器件制备

器件整体结构如图 2 所示，激光器的芯片长 4000  $\mu\text{m}$ ，宽 500  $\mu\text{m}$ 。该激光器由脊型波导区和 DBR 光栅区两部分组成，其中脊型波导长 3500  $\mu\text{m}$ 、宽 100  $\mu\text{m}$ ，光栅区长 500  $\mu\text{m}$ 、宽 100  $\mu\text{m}$ 。DBR 光栅为器件的重要组成部分，也是制作的难点所在，为

了获得形貌良好且满足器件制作要求的 DBR 光栅结构，通过理论计算得到光栅周期、光栅长度等参数，结合实验摸索对光栅周期、光栅区长度、刻蚀方法等进行优化，以保证 DBR 光栅能够满足理想要求。实验中采用分别制作脊型波导区和光栅区的方式，虽然将两部分分开制作会增加工艺难度，但可以对脊型波导与光栅的刻蚀深度分别进行控制，有利于器件的制作。

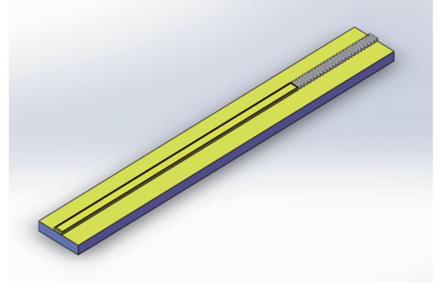


图 2 脊型激光器的器件结构

Fig. 2 Structure of ridge semiconductor laser

脊型波导的制作采用常规的紫外光刻技术，但对于周期为 890 nm 的光栅，普通紫外光刻机无法达到其线宽要求，因此选择用精度更高的电子束光刻技术对 DBR 光栅进行制作，并利用感应耦合等离子(ICP)刻蚀工艺对光栅进行刻蚀。由于光栅刻蚀深度超过 1  $\mu\text{m}$ ，而普通的有机玻璃(PMMA)电子束光刻胶与 GaAs 的抗刻蚀选择比很低，约为 1:2，不满足此刻蚀深度的要求。因此选择用  $\text{SiO}_2$  作为硬掩模来对光栅进行刻蚀。光栅制作流程如图 3 所示。

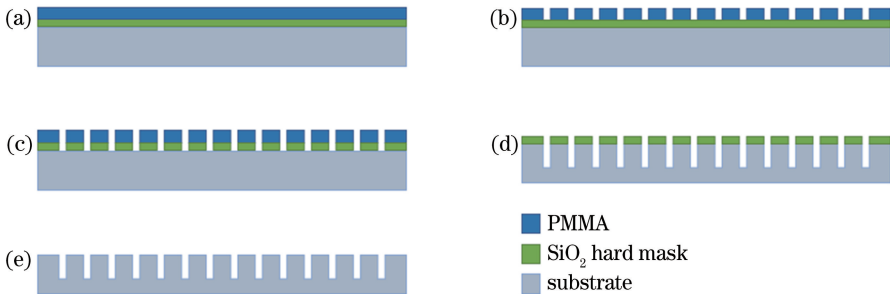


图 3 DBR 光栅制作流程。(a)用 PECVD 在衬底上生长 200 nm 厚的  $\text{SiO}_2$ ，并旋涂 PMMA 光刻胶；(b)进行电子束光刻；(c) RIE 刻蚀  $\text{SiO}_2$ ；(d)去除光刻胶，利用 ICP 刻蚀衬底；(e)去除残余  $\text{SiO}_2$

Fig. 3 Production process of DBR grating. (a) Grow 200 nm-thick  $\text{SiO}_2$  by PECVD on substrate and then coat with PMMA photoresist; (b) perform electron beam lithography; (c) etch  $\text{SiO}_2$  mask layer by RIE; (d) remove photoresist and etch substrate with ICP; (e) remove residual  $\text{SiO}_2$  mask layer

DBR 光栅制作的具体步骤如下：

1) 对外延片进行清洗后，利用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 法生长一层 200 nm 厚的

$\text{SiO}_2$  硬掩模，利用旋涂法在表面涂覆电子束光刻胶；

2) 利用电子束光刻技术，将光栅图形直接写到  $\text{SiO}_2$  表面，并显影；

- 3) 利用反应离子刻蚀(RIE)技术对 SiO<sub>2</sub> 进行刻蚀,将光栅图形转移到 SiO<sub>2</sub>硬掩模上;
- 4) 去除电子束光刻胶后,利用 ICP 刻蚀技术,对外延片材料进行刻蚀;
- 5) 利用缓冲氧化物刻蚀液(BOE)漂洗 30 s,去除残余 SiO<sub>2</sub>,得到光栅结构。

首先利用 ICP 刻蚀技术中的 GaAs 标准刻蚀工艺对光栅进行刻蚀,参数如表 2,刻蚀进行 4 min 后,光栅的形貌如图 4(a) 所示,可以看出光栅形貌呈尖锥状,难以满足器件制备要求。光栅之所以呈尖锥状是因为刻蚀参数中 Ar 的束流过高,物理轰击作用明显,导致 SiO<sub>2</sub>硬掩模在刻蚀过程中被消耗殆尽,无掩模状态下持续刻蚀使光栅出现尖锥形。为了优化光栅形貌,对表 2 的参数进行调整,主要是将 Ar 的束流从  $2.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  降低至  $8.33 \times$

$10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,目的是减少物理轰击作用对 SiO<sub>2</sub> 的消耗,其他参数不变。优化参数后对光栅进行刻蚀,此刻蚀参数下 SiO<sub>2</sub> 与 GaAs 的抗刻蚀选择比约为 1:10,GaAs 刻蚀速率约为 270 nm/min,满足刻蚀深度的要求,参数优化后的光栅形貌如图 4(b) 所示。可以看出,优化后光栅形貌良好,可以满足器件的制作要求。

表 2 ICP 刻蚀参数

Table 2 ICP etching parameters

Parameter	Numerical value
ICP power /W	350
RF power /W	50
Cl <sub>2</sub> beam /( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$5 \times 10^{-8}$
BCl <sub>3</sub> beam /( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$1.167 \times 10^{-7}$
Ar beam /( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$2.5 \times 10^{-7}$
Time /min	4

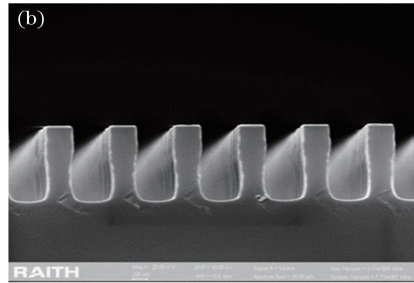
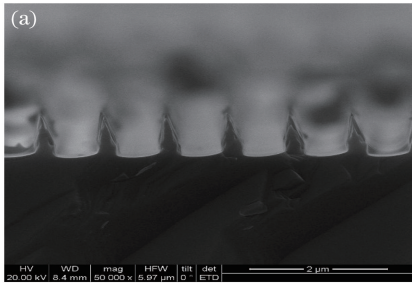


图 4 DBR 光栅的 SEM 图。(a)形貌优化前;(b)形貌优化后

Fig. 4 SEM images of DBR grating. (a) Before shape optimization; (b) after shape optimization

利用电子束光刻技术解决了常规紫外光刻线宽精度小的问题,并且电子束光刻技术具有较高的套刻精度,为后续脊型波导的套刻提供了有利条件。由于器件制作过程中需要多部套刻,高精度套刻可以提高器件制作的成功率,并在一定程度上提高器件的性能。

## 5 器件性能测试结果

经过脊型波导的制作、生长钝化层、退火合金、腔面镀膜、贴片封装等工艺后,对器件输出特性进行测试。从图 5 所示的  $P-I-V$  测试结果可以看出,当

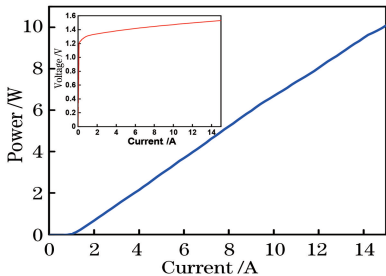


图 5 器件  $P-I-V$  测试结果

Fig. 5  $P-I-V$  test results

电流增加到 15 A 时,功率达到 10.7 W,阈值电流  $I_{th}=0.95 \text{ A}$ ,开启电压约为 1.2~1.3 V,说明芯片中没有除 pn 结以外的其他势垒存在,即 p 型和 n 型欧姆接触不存在异常势垒。从图 6 所示的光谱测试结果可以看出,激光器出射激光的中心波长为 979.3 nm,线宽为 2.77 nm,符合 DBR 光栅设计的要求。

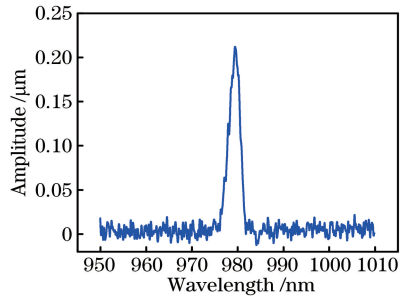


图 6 器件光谱测试结果

Fig. 6 Spectral test results

## 6 结 论

通过设计非对称大光腔的波导结构,利用 DBR



光栅压缩光谱线宽,优化制备工艺及参数,得到高功率窄线宽的 980 nm 波段激光输出。在优化制作工艺过程中,利用电子束光刻技术,选择 SiO<sub>2</sub> 作为硬掩模,提高掩模层与 GaAs 的抗刻蚀选择比,成功制作出具有高深宽比的 DBR 光栅结构,由于 Ar 的物理轰击作用,在刻蚀光栅过程中 SiO<sub>2</sub> 掩模层逐渐被消耗,刻蚀完成后 SiO<sub>2</sub> 掩模层恰好所剩无几,为后续工艺带来极大方便。本研究最终成功制作出输出功率为 10.7 W、光谱线宽为 2.77 nm、阈值电流为 0.95 A、中心波长为 979.3 nm 的 DBR 激光器。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao Y A, Hu G H, Liu X F, *et al.* Laser conditioning technology and its applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 2938-2947.  
赵元安, 胡国行, 刘晓凤, 等. 激光预处理技术及其应用[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 2938-2947.
- [2] Xu Z P, Shen H H, Xu Y S. Review of the development of laser active imaging system with direct ranging[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 28-38.  
徐正平, 沈宏海, 许永森. 直接测距型激光主动成像系统发展现状[J]. *中国光学*, 2015, 8(1): 28-38.
- [3] Liu Y Q, Cao Y H, Li J, *et al.* 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1279-1287.  
刘友强, 曹银花, 李景, 等. 激光加工用 5 kW 光纤耦合半导体激光器[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1279-1287.
- [4] Yan C L, Ning Y Q, Qin L, *et al.* High-power InGaAs quantum wells vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(9): 1029-1031.  
晏长岭, 宁永强, 秦莉, 等. 高功率 In Ga As 量子阱垂直腔面发射激光器的研制[J]. *光子学报*, 2004, 33(9): 1029-1031.
- [5] An N, Han X W, Liu C Z, *et al.* Simulation analysis of 2  $\mu\text{m}$  InGaAsSb/AlGaAsSb laser diode with dual waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(9): 0914001.  
安宁, 韩兴伟, 刘承志, 等. 2  $\mu\text{m}$  InGaAsSb/AlGaAsSb 双波导半导体激光器的结构设计[J]. *光子学报*, 2016, 45(9): 0914001.
- [6] Li H, Du J Y, Qu Y, *et al.* Low power dissipation 980 nm single mode pumping source laser with wavelength stabilization [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(1): 33-37.  
李辉, 都继瑶, 曲轶, 等. 光谱稳定的低功耗 980 nm 单模抽运源半导体激光器[J]. *发光学报*, 2016, 37(1): 33-37.
- [7] Hu L M, Liu Y, Lu Z H, *et al.* Skin welding with a combination of 980 nm and 1064 nm lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(4): 0404001.  
胡黎明, 刘云, 芦志华, 等. 980 nm/1064 nm 双波长半导体激光皮肤焊接[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0404001.
- [8] Reinhart F K, Logan R A, Shank C V. GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As injection lasers with distributed Bragg reflectors[J]. *Applied Physics Letters*, 1975, 27(1): 45-48.
- [9] Hasler K H, Sumpf B, Adamiec P, *et al.* 5-W DBR tapered lasers emitting at 1060 nm with a narrow spectral linewidth and a nearly diffraction-limited beam quality [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(19): 1648-1650.
- [10] Paschke K, Spießberger S, Kaspari C, *et al.* High-power distributed Bragg reflector ridge-waveguide diode laser with very small spectral linewidth [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(3): 402-404.
- [11] Fricke J, Bugge F, Ginolas A, *et al.* High-power 980-nm broad-area lasers spectrally stabilized by surface Bragg gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(5): 284-286.
- [12] Decker J, Crump P, Fricke J, *et al.* Narrow stripe broad area lasers with high order distributed feedback surface gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(8): 829-832.
- [13] Qiao C, Su R G, Fang D, *et al.* Etching process of 980 nm tapered semiconductor laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(9): 0914003.  
乔闯, 苏瑞巩, 房丹, 等. 980 nm 锥形半导体激光器刻蚀工艺[J]. *光子学报*, 2018, 47(9): 0914003.
- [14] Li J J, Cui B F, Deng J, *et al.* 980 nm high power semiconductor laser with asymmetric super large optical cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 1102011.  
李建军, 崔碧峰, 邓军, 等. 非对称超大光腔 980 nm 大功率半导体激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1102011.
- [15] Fiebig C, Blume G, Uebernickel M, *et al.* High-power DBR-tapered laser at 980 nm for single-path second harmonic generation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(3): 978-983.