

doi:10.3788/gzxb20184709.0914003

## 980 nm 锥形半导体激光器刻蚀工艺

乔闯<sup>1,2</sup>, 苏瑞巩<sup>2</sup>, 房丹<sup>1</sup>, 唐吉龙<sup>1</sup>, 方铤<sup>1</sup>, 王登魁<sup>1</sup>, 张宝顺<sup>2</sup>, 魏志鹏<sup>1</sup>

(1 长春理工大学 理学院 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

(2 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:**为了解决半导体激光器传统刻蚀工艺中侧壁陡直度差和器件难以重复制作的问题,利用湿法腐蚀与干法刻蚀相结合的刻蚀手段,对 980 nm 锥形半导体激光器刻蚀工艺进行优化.通过对台面粗糙度与刻蚀速度的研究,确定湿法腐蚀液和浓度配比的差异.并分析电感耦合等离子刻蚀对脊波导与腔破坏凹槽表面形貌的影响.研究表明,选择配比为  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 50$  的腐蚀液进行湿法腐蚀,刻蚀速率约为 7 nm/s,速率容易控制.且样品表面具有较好的粗糙度和均匀性,利用电感耦合等离子刻蚀得到的脊波导与腔破坏凹槽侧壁陡直度良好,没有出现横向钻蚀的情况.

**关键词:**锥形半导体激光器;陡直度;刻蚀工艺;脊波导;腔破坏凹槽

中图分类号:TN305; TN365

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)09-0914003-7

## Etching Process of 980 nm Tapered Semiconductor Laser

QIAO Chuang<sup>1,2</sup>, SU Rui-gong<sup>2</sup>, FANG Dan<sup>1</sup>, TANG Ji-long<sup>1</sup>, FANG Xuan<sup>1</sup>, WANG Deng-kui<sup>1</sup>,  
ZHANG Bao-shun<sup>2</sup>, WEI Zhi-peng<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun 130022, China)

(2 Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of bad sidewall steepness and device repetition in the traditional etching process of semiconductor laser, the etching process of 980 nm tapered semiconductor laser is optimized by means of the combination of wet etching and dry etching. The difference of wet etching solution and concentration ratio is determined through the study of mesa roughness and etching speed. The effect of inductively coupled plasma etching on the surface morphology of the damaged grooves in ridged waveguide and cavity is analyzed. The results show that the etching rate is about 7 nm/s, and the etching rate is easy to be controlled by wet etching with the ratio of  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 50$ . The surface of the sample has good roughness and uniformity, the ridge waveguide and cavity etched by inductively coupled plasma have good steepness of the side wall of the groove, and there is no transverse drilling erosion.

**Key words:** Tapered semiconductor laser; Steepness; Etching process; Ridge waveguide; Cavity failure groove

**OCIS Codes:** 140.5960; 140.3070; 160.6000; 220.4000; 140.3460

## 0 引言

半导体激光器具有体积小、重量轻、光电转化率高、便携性高等优点<sup>[1-5]</sup>.单频高亮度的激光光源已经成

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61504012),吉林省科技厅中青年科技创新领军人才及团队项目(No. 20160519007JH),吉林省优秀青年人才基金项目(No.20170520117JH)和吉林省自然科学基金项目(No.20160101255JC)资助

**第一作者:**乔闯(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为半导体激光器物性及工艺. Email: cqiao2017@sinano.ac.cn

**导师(通讯作者):**房丹(1982—),女,副研究员,博士,主要研究方向为半导体激光器物性及工艺. Email: fangdan19822011@163.com

**收稿日期:**2018-03-22; **录用日期:**2018-05-10

<http://www.photon.ac.cn>

为新兴激光技术,例如空间通信、光学变频、光学雷达等的关键组成部分.常规宽条形半导体激光器很难实现高亮度与高光束质量的并存,而采用锥形激光芯片结构是提高半导体激光器光束质量的同时保持高亮度的一种重要方法.与普通条形的脊型波导结构相比,带有锥形增益区的脊型波导结构具有减小功率密度、抑制出光面灾变引起的光损伤、减弱引起光束质量下降的非线性效应、防止自聚焦产生、改善器件饱和特性等优点<sup>[6-7]</sup>.

早在1996年,WALPOLE J N<sup>[8]</sup>研究发现,采用锥形波导的半导体激光器可以产生高亮度连续波激光. BORRUEL L等<sup>[9]</sup>在2004年提出了一种多物理量的自洽锥形半导体激光器模型,该模型包括电流分布、传热和激光束在锥形激光器中的传输.2005年,KALLENBACH S等<sup>[10]</sup>设计了脊波导长度为500  $\mu\text{m}$ 、锥形放大区为2000  $\mu\text{m}$ 的锥形半导体激光器,激光功率大于1.5 W.2008年,Fraunhofer应用固体物理研究所的 OSTENDORF R<sup>[11]</sup>采用反应耦合等离子体刻蚀法获得了输出功率为10 W的锥形半导体激光器.2013年,GOKDEN B等<sup>[12]</sup>用湿法刻蚀技术,制作了刻蚀深度为9.5  $\mu\text{m}$ 、锥形角分别为 $1^\circ$ 和 $2^\circ$ 的锥形激光器,锥角为 $1^\circ$ 的激光器输出功率为2.5 W、光束质量 $M^2$ 为2.08,锥角为 $2^\circ$ 的激光器输出功率为3.8 W、光束质量 $M^2$ 为2.25.2015年,蒲涛飞等<sup>[13]</sup>利用干法刻蚀技术,采用多步套刻法分别制作了脊形区、锥形区、抑制光反馈的隔离槽和互扰隔离槽,制作了发射波长为808 nm、光束质量 $M^2 < 2.5$ 、输出功率为3.5 W的激光器.目前通过改善锥形半导体激光器台面刻蚀工艺来提高器件性能的研究还较少,本文主要对锥形半导体激光器中不同结构的台面刻蚀工艺进行研究,通过湿法腐蚀与干法刻蚀相结合的刻蚀手段,得到可以形成较好样品表面质量的腐蚀液,实现脊波导与腔破坏凹槽侧壁无横向钻蚀且陡直度良好.

## 1 锥形激光器结构

采用的激光器芯片由金属有机化合物化学气相沉淀(Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)法生长,外延片结构见表1.有源区为非掺杂7 nm厚的InGaAs三量子阱,上、下波导层分别为P型和N型的 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ ,厚度分别为1.1  $\mu\text{m}$ 和1.6  $\mu\text{m}$ .上、下限制层为 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ,厚度均为1  $\mu\text{m}$ ,掺杂浓度均为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .接触层由厚度为400 nm的GaAs组成,掺杂浓度为 $1 \times 10^{20}$ .

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	$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	1 000	$1 \times 10^{18}$
P	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	1 100	$1 \times 10^{18}$
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	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	1 600	$1 \times 10^{18}$
N	$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	1 000	$1 \times 10^{18}$
N+	GaAs	200	$1 \times 10^{18}$
Substrate	GaAs		

激光器结构如图1所示,主要由锥形放大区、脊波导区与腔破坏凹槽三部分构成.对于不同区域的腐蚀及刻蚀要求为:

1)锥形放大区:对于锥形增益区的刻蚀深度要求并非像脊形那样严格,通常只需将接触层部分腐蚀掉即可,本文选择锥形腐蚀深度在450~500 nm之间,目的是去掉重掺杂的接触层.从图1可以看出,锥形增益区的图形尺寸大,且刻蚀深度浅,通常选用适合大尺寸图形腐蚀的湿法腐蚀对台面进行刻蚀,而以往刻蚀GaAs-AlGaAs材料体系时通常选用一定浓度配比的 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 溶液作为腐蚀液.由于 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 的强

腐蚀性使外延片表面粗糙不平而且会出现严重的横向钻蚀现象, 并且这种腐蚀液很难控制腐蚀速率. 因此, 实验中采用相对弱的  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$  进行适当浓度对比对芯片进行刻蚀.

2) 脊波导区与腔破坏凹槽: 在器件的制作中部分结构对刻蚀工艺的要求较高, 如侧壁陡直度、刻蚀均匀性、刻蚀损伤等. 本文研究的锥形半导体激光器中, 脊波导与腔破坏凹槽部分的制作对刻蚀的要求是具有良好的侧壁陡直度并尽可能减少侧壁的横向钻蚀. 常规的湿法腐蚀通常有较为严重的横向钻蚀现象, 如图 2, 并且工艺可重复性差. 而电感耦合等离子(Inductively Coupled Plasma, ICP)刻蚀的刻蚀速度快、选择比高、各向异性刻蚀、大面积均匀性好、刻蚀表面平滑, 与传统湿法刻蚀相比, 具有刻蚀过程易于控制、刻蚀截面轮廓可控性高等优点<sup>[14-15]</sup>. 因此实验中选用 ICP 刻蚀法对脊波导与腔破坏凹槽进行刻蚀.

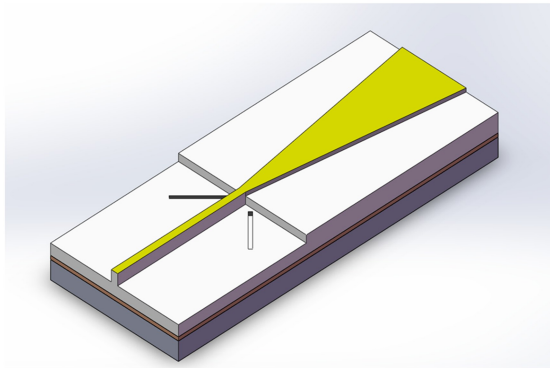


图 1 锥形半导体激光器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of tapered semiconductor laser

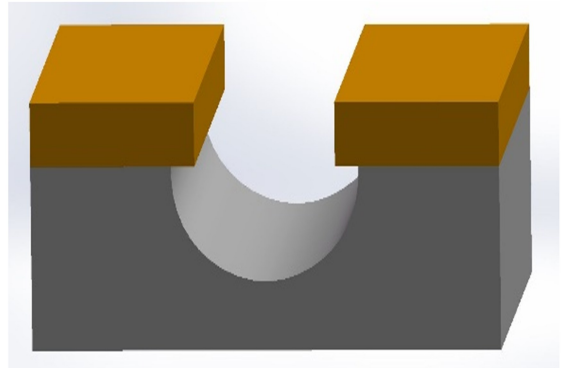


图 2 湿法刻蚀的横向钻蚀现象

Fig.2 Lateral drilling erosion of wet etching

## 2 实验方案

对于台面的刻蚀, 选择 AZ6112 光刻胶作为掩膜层, 如图 3, 利用湿法腐蚀和 ICP 干法刻蚀对台面进行刻蚀. 该工艺的实验步骤为:

- 1) 常规 GaAs 材料表面清洗, 分别用丙酮、异丙醇浸泡 5 min, 去离子水冲洗干净后氮气吹干;
- 2) 在样品表面制作光刻胶掩膜, 采用 AZ6112 光刻胶, 喷涂粘附剂后进行旋转涂胶, 旋涂条件为 4 000 rad/min、30 s, 软烘 100℃、120 s;
- 3) 以光刻胶为掩膜, 利用 MA6 光刻机进行光刻处理, 将掩模版上的图形转移到样品表面, 不同的台面刻蚀步骤中需利用相应的光刻版进行套刻, 光刻条件为宽带光源曝光 2 s, 显影 30~35 s, 坚膜 110℃、120 s, 之后利用湿法腐蚀与 ICP 刻蚀方法对不同台面进行刻蚀;
- 4) 完成刻蚀后, 分别用丙酮、异丙醇浸泡 5 min, 去离子水冲洗后氮气吹干, 目的是去除光刻胶掩膜.

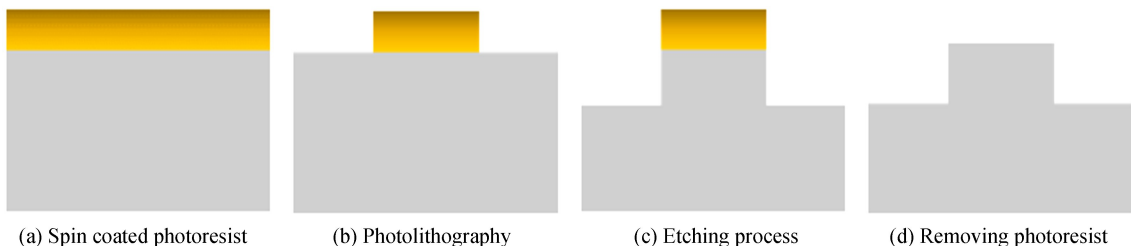
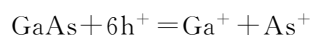


图 3 台面刻蚀流程示意图

Fig.3 Table etching process diagram

### 2.1 锥形放大区的制作

GaAs 在浸入腐蚀液时, 电子将转移到电解质里, 其反应式为<sup>[16]</sup>



AlGaAs 也有类似的反应, 利用过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )将  $\text{Ga}^{3+}$  和  $\text{As}^{3+}$  氧化, 生成镓和砷的氧化物, 再加入酸或碱溶液, 使这些氧化物分解在这些酸或碱溶液中, 达到刻蚀的目的. 对腐蚀液的另一个要求是不能腐蚀作为掩膜层的光刻胶. 氨水( $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )可以满足这些条件, 因此选择的腐蚀液为氨水、过氧化氢、水的混

合液.

刻蚀锥形放大区之前利用陪片探究了最佳的腐蚀液浓度配比与腐蚀速率. 首先将 GaAs 外延片均分成大小相同的四块样品, 分别编号 #1、#2、#3、#4, 在四个样品中间分别滴一滴光刻胶, 这里光刻胶主要起到掩膜层的作用, 保护光刻胶下方的 GaAs 材料不被腐蚀液腐蚀, 随后进行烘干、坚膜处理. 在室温下配比  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 5$  (腐蚀液 A) 与  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 50$  (腐蚀液 B) 两种浓度的腐蚀液, 将 #1 样品与 #2 样品在腐蚀液 A 中分别浸泡 1 min、3 min; #3 样品与 #4 样品在腐蚀液 B 中分别浸泡 1 min、2 min. 最后用去离子水清洗, 氮气吹干, 用台阶仪测量刻蚀深度, 计算刻蚀速率. 选定合适的腐蚀液后, 利用光刻将锥形放大区的图形转移到样品表面, 如图 4.

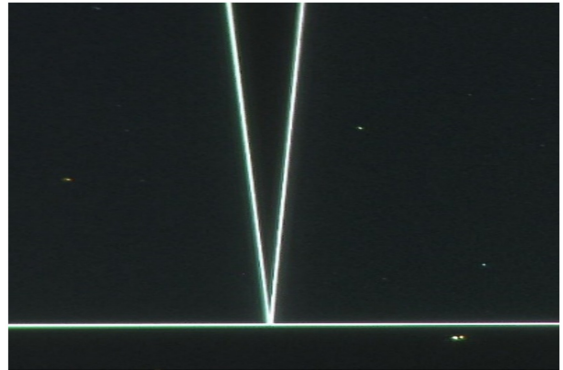
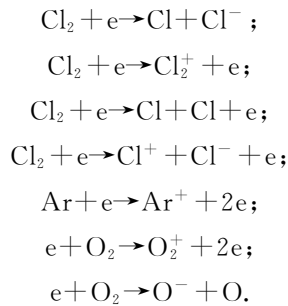


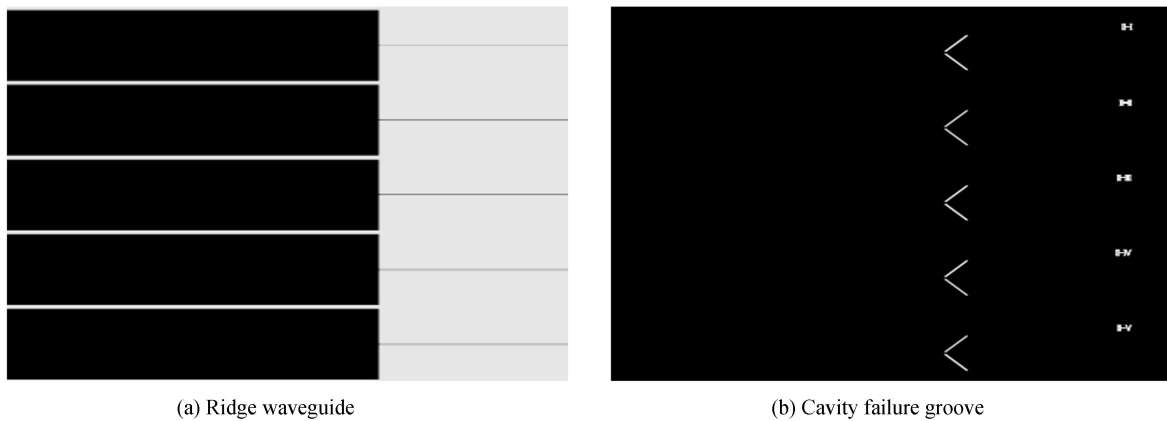
图 4 光刻后的锥形放大区  
Fig.4 Tapered amplification area after lithography

### 2.2 脊波导与腔破坏凹槽的制作

用 ICP 刻蚀技术, 在  $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{O}_2$  环境中, 对 GaAs 基外延片进行刻蚀,  $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{O}_2$  等离子体的工艺过程为<sup>[17]</sup>



在制作脊波导区与腔破坏凹槽时, 利用光刻套刻技术, 分别将图 5 中光刻版的图形转移到外延片上, 光刻步骤与锥形放大区部分相似, 因为图形的最小线宽不同, 需要调整相应的曝光时间. 曝光显影后, 利用 M4L 等离子去胶机进行去底膜处理, 其工作原理是: 真空等离子体脱胶机反应室中的氧在高频和微波能量作用下, 电离产生氧离子、游离态氧原子  $\text{O}^*$ 、氧分子和电子等混合等离子体, 具有较强氧化能力的游离态氧原子 (约 10%~20%) 在高频电压下与光刻胶膜发生反应:  $\text{O}_2 \rightarrow \text{O}^* + \text{O}^*$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y + \text{O}^* \rightarrow \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O} \uparrow$ . 生成的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  随即被抽走. 之后以 110°C、60 s 的条件进行坚膜处理. 最后利用 ICP-180 设备对样品进行干法刻蚀.



(a) Ridge waveguide

(b) Cavity failure groove

图 5 掩模版局部形貌  
Fig.5 Local topography of mask plate

### 3 结果与分析

利用实验方案对外延片进行了刻蚀. 为了探究各台面刻蚀质量的好坏, 对样品进行了原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM)、扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 等测试. 对不同结构的刻蚀结果进行了分析与讨论.

#### 3.1 锥形放大区最佳腐蚀条件

对于锥形增益区的刻蚀通常只需将接触层部分腐蚀掉即可, 根据表 1 给出的外延片结构, 选择锥形腐蚀深度在 450~500 nm 之间. 由表 2 可以看出, 当配比为  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 5$  时, 刻蚀速率为 51.3 nm/s, 刻蚀速率过快, 对刻蚀深度难以控制. 而当配比为  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 50$  时, 刻蚀速率约为 7 nm/s, 刻蚀速度缓慢, 对刻蚀深度的控制相对容易. 为了探究不同腐蚀液对样品表面粗糙度的影响, 利用原子力显微镜对样品表面粗糙度进行了测量.

表 2 湿法腐蚀结果  
Table 2 Wet corrosion results

Sample	Corrosive liquid	Time/ min	Etching depth/ $\mu\text{m}$	Corrosion rate/( $\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
#1	Corrosive liquid A	1	3.08	51.3
#2	Corrosive liquid A	3	7.65	
#3	Corrosive liquid B	1	0.392 2	7
#4	Corrosive liquid B	2	0.534 5	

如图 6, 通过 AFM 测量结果可以发现, 经过腐蚀液 A 腐蚀的样品表面粗糙度为 1.12 nm, 腐蚀液 B 腐蚀的样品表面粗糙度为 0.52 nm. 腐蚀液 A 的腐蚀速度过快, 不易控制刻蚀深度, 且样品表面粗糙度远差于腐蚀液 B. 因此为了优化刻蚀速率与样品表面粗糙度, 选择配比为  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 50$  的腐蚀液对激光器的锥形放大区进行制作, 样品刻蚀深度更加容易控制, 同时使锥形放大区表面具有较小的表面粗糙度.

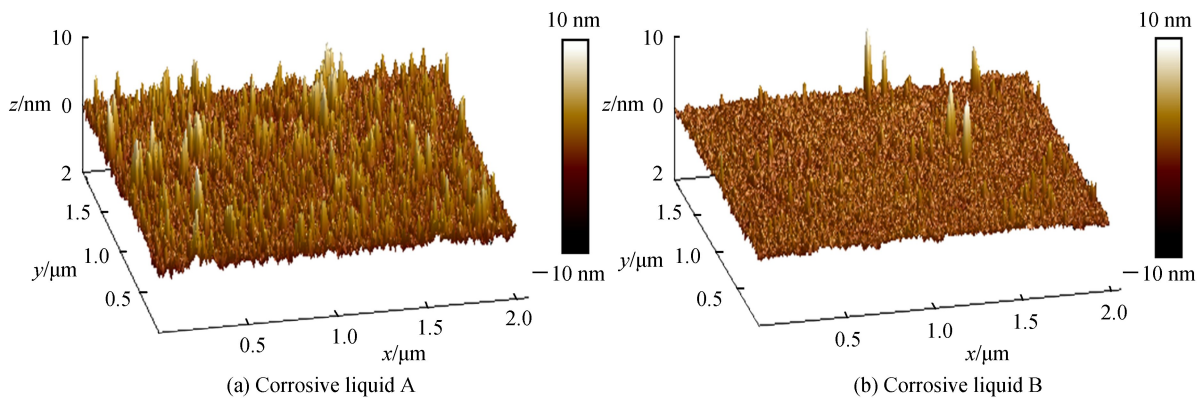


图 6 样品的 AFM 测量结果  
Fig.6 AFM measurement results of samples

通过台阶仪对刻蚀深度测试区进行测量发现, 样品刻蚀深度均匀性良好. 根据测试分析可以说明, 浓度配比为  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 50$  的腐蚀液, 既能保证刻蚀深度的可控性, 又能使样品表面具有良好的粗糙度和刻蚀深度均匀性. 因此该浓度配比的腐蚀液适合用于 980 nm 锥形半导体激光器中锥形放大区的制作.

#### 3.2 脊波导与腔破坏凹槽刻蚀形貌研究

实验中采用 ICP-180 设备对脊波导与腔破坏凹槽进行干法刻蚀. 该装置使用不同的射频电源分别控制等离子体密度和离子轰击能量. 第一射频电源 (源功率) 通过感应耦合使工艺气体电离, 产生活性自由基、亚稳态粒子、原子等高密度等离子体, 这些粒子与衬底表面相互作用, 在第二射频电源 (偏置功率) 作用下, 在衬底上产生定向物理溅射轰击. 在破坏化学键、引起晶格损伤、促进衬底表面化学反应等方面起着重要作用<sup>[18-19]</sup>. 当蚀刻材料与电离产生的自由基或正离子发生反应, 产生挥发性气体物质时, 就达到了刻蚀的目的.

由于等离子体源与射频加速源分离,等离子体密度更高,加速度也更高,从而可以提高刻蚀速率和更好的各向异性刻蚀.因此可以在快速刻蚀的同时,保证刻蚀侧壁的陡直.刻蚀结果如图7所示.

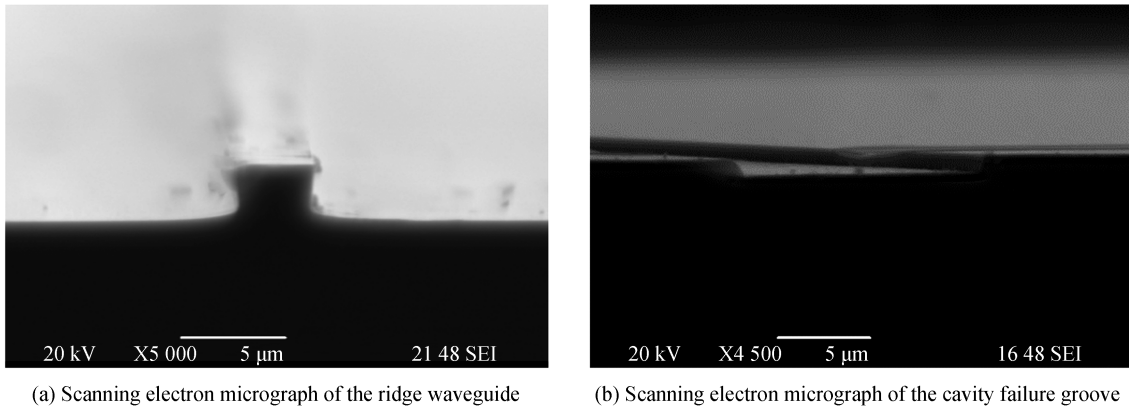


图7 ICP刻蚀效果

Fig.7 Etching effect diagram of ICP

从图中可以看出,经过ICP刻蚀后的脊波导与腔破坏凹槽侧壁陡直度接近 $90^\circ$ ,没有出现常规湿法腐蚀中的横向钻蚀现象,样品表面均匀性良好,满足器件制备的要求.

## 4 结论

在锥形半导体激光器的制作中,采用浓度配比为 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 50$ 的腐蚀液对锥形放大区进行台面刻蚀,刻蚀速率约为 $7 \text{ nm/s}$ ,实现了刻蚀速率可控,样品表面光滑,且刻蚀深度均匀.在脊波导与腔破坏凹槽的制作中,采用ICP刻蚀技术对其进行干法刻蚀,使样品侧壁陡直度接近 $90^\circ$ ,解决了传统湿法刻蚀工艺中侧壁陡直度差以及难以重复制作的问题.

### 参考文献

- [1] ZHAO Yuan-an, HU Guo-hang, LIU Xiao-feng, *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 Zheng-ping, SHEN Hong-hai, XU Yong-sen. 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 You-qiang, CAO Yin-hua. 5KW fiber coupling diode laser for laser processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1279-1287.  
刘友强, 曹银花. 激光加工用5kW光纤耦合半导体激光器[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(5): 1279-1287.
- [4] LI Jing, QIU Yun-tao, CAO Yin-hua, *et al.* High brightness tapered diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(8): 990-995.  
李景, 邱运涛, 曹银花, 等. 高亮度锥形半导体激光器[J]. 发光学报, 2016, **37**(8): 990-995.
- [5] AN Ning, HAN Xing-wei, LIU Cheng-zhi, *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] QIAO Zhong-liang, BO Bao-xue, GAO Xin, *et al.* High brightness high power broad area semiconductor lasers with no-absorption mode filter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(4): 13-18.  
乔忠良, 薄报学, 高欣, 等. 无吸收模式滤波结构高亮度大功率宽条形半导体激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 13-18.
- [7] FIEBIG C, BLUME G, KASPARI C, *et al.* 12W high-brightness single-frequency DBR tapered diode laser [J]. *Electronics Letters*, 2008, **44**(21): 1253-1255.
- [8] WALPOLE J N. Semiconductor amplifiers and lasers with tapered gain regions[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 1996, **28**(6): 623-645.
- [9] BORRUEL L, SUJECKI S, MORENO P, *et al.* Quasi-3-D simulation of high-brightness tapered lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, **40**(5): 463-472.

- [10] KALLENBACH S, KELEMEN M T, AIDAM R, *et al.* High-power high-brightness ridge-waveguide tapered diode lasers at 14xx nm[C]. SPIE, 2005, **5738**: 406-415.
- [11] OSTENDORF R, KAUFEL G, MORITZ R, *et al.* 10W high-efficiency high-brightness tapered diode lasers at 976 nm [C]. SPIE, 2008, **6876**: 61124-61124.
- [12] GOKDEN B, MANSURIPUR T S, BLANCHARD R, *et al.* High-brightness tapered quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(5): 511-R.
- [13] PU Tao-fei, ZHANG Jing. High-power high beam quality tapered semiconductor laser[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2015, **38**(2): 9-12.  
蒲涛飞, 张晶. 高功率高光束质量锥形半导体激光器[J]. 长春理工大学学报(自然科学报), 2015, **38**(2): 9-12.
- [14] RAWAL D S, SEHGAL B K, MURALIDHARAN R, *et al.* Experimental study of the influence of process pressure and gas composition on GaAs etching characteristics in Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub>-based inductively coupled plasma[J]. *Plasma Science and Technology*, 2011, **13**(2): 223.
- [15] LEE J W, JUNG P G, DEVRE M, *et al.* Optimization of gas flow and etch depth uniformity for plasma etching of large area GaAs wafers[J]. *Solid-State Electronics*, 2002, **46**(5): 685-688.
- [16] LUO Yue-chuan, HAN Shang-jun, WANG Xue-min, *et al.* Steepness of the etching of GaAs/AlGaAs multilayer[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2011, **9**(3): 347-350.  
罗跃川, 韩尚君, 王雪敏, 等. GaAs/AlGaAs 多层膜刻蚀的陡直度[J]. 信息与电子工程, 2011, **9**(3): 347-350.
- [17] TANG Zhong-hua. Diagnosis of electronegative capacitively coupled plasma and surface treatment of materials[D]. Suzhou: Soochow University, 2013.  
唐中华. 电负性容性耦合等离子体诊断及材料表面处理[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [18] HUANG Hua-mao, HUANG Jiang-zhu, HU Xiao-long, *et al.* Effects of the height of nanorod structure on the photoluminescence spectra of GaN-based green LED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(8): 967-972.  
黄华茂, 黄江柱, 胡晓龙, 等. 纳米柱高度对 GaN 基绿光 LED 光致发光谱的影响 [J]. 发光学报, 2016, **37**(8): 967-972.
- [19] ZHAO Yang-yong, LIU Wei-guo, XI Ying-xue. Surface planarization process of RB-SiC based on magnetron sputtering and ICP etching[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(3): 0324001.  
赵杨勇, 刘卫国, 惠迎雪. 基于磁控溅射和 ICP 刻蚀的 RB-SiC 表面平坦化工艺[J]. 光子学报, 2018, **47**(3): 0324001.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61504012), the Jilin Province Science and Technology Department of Youth Science and Technology Leading Talent and Innovation Team (No. 20160519007JH), Excellent Youth Foundation of Jilin Province of China (No. 20170520117JH) and the Natural Science Foundation of Jilin Province of China (No. 20160101255JC)  
引用格式: QIAO Chuang, SU Rui-gong, FANG Dan, *et al.* Etching Process of 980 nm Tapered Semiconductor Laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0914003

乔闯, 苏瑞琨, 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