

# 垂直腔面发射激光器中 GaAs/AlGaAs 的选择性刻蚀技术研究

张秋波, 冯源, 李辉, 晏长岭, 郝永芹\*

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 在氧化物限制型垂直腔面发射激光器制备中, 刻蚀 GaAs/AlGaAs 时因异质型材料常出现选择性内蚀现象, 这会直接影响后续的氧化工艺及电极钝化的效果。针对因选择性内蚀而出现的“镂空”现象, 对湿法刻蚀工艺和干法刻蚀工艺进行详细研究, 研究表明通过调整刻蚀液体积配比和感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀下电极射频功率可有效消除“镂空”现象。湿法刻蚀中, 当刻蚀液  $H_3PO_4-H_2O_2-H_2O$  各物质体积配比为 1:1:10 时, 得到了陡直度较好且光滑的侧壁。ICP 干法刻蚀时, 通过改变下电极 RF 功率可调整腔室内的化学刻蚀和物理刻蚀的动态平衡, 在下电极射频功率为 100 W 时, “镂空”现象基本消失, 且侧壁陡直度大于  $80^\circ$ 。

**关键词** 激光技术; 垂直腔面发射激光器; GaAs/AlGaAs; 湿法刻蚀; 感应耦合等离子体刻蚀; 选择性内蚀; 镂空  
**中图分类号** TN248.4 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/CJL202047.0401001

## Selective Etching Technologies for GaAs/AlGaAs in Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Zhang Qiubo, Feng Yuan, Li Hui, Yan Changling, Hao Yongqin\*

National Key Laboratory of Science and Technology on High Power Semiconductor Lasers,  
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In the preparation of oxide confinement vertical-cavity surface-emitting lasers, selective internal corrosion often occurs when GaAs/AlGaAs is etched, which directly affects the subsequent oxidation process and electrode passivation. To address this problem, the wet and the dry etching processes are thoroughly investigated in this study. Results show that the hollows caused by selective internal corrosion can be effectively eliminated by adjusting the volume ratio of the etching solution and bottom electrode radio frequency (RF) power of the inductively coupled plasma (ICP) etching. We obtain good steepness and smoothness in the wet etching process when the volume ratio of the  $H_3PO_4-H_2O_2-H_2O$  solution is 1:1:10. In the ICP dry etching process, the dynamic balance of the chemical and physical etching in the chamber is adjusted by changing the RF power of the bottom electrode; the hollow phenomenon is hardly observed, and the sidewall steepness is greater than  $80^\circ$  at a power of 100 W.

**Key words** laser technique; vertical-cavity surface-emitting lasers; GaAs/AlGaAs; wet etching; inductively coupled plasma etching; selective internal corrosion; hollow

**OCIS codes** 140.7260; 140.5960; 140.0140

## 1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 具有光束质量好、动态单纵模工作、功耗低、波长稳定性好及易于高密度集成等优异特性<sup>[1-4]</sup>, 被广泛应用于光识别、光互联系统<sup>[5]</sup>、光存储等领域。近年来, 随着材料及

工艺技术的改进, VCSEL 在智能手机人脸识别、无人机避障、VR/AR (virtual reality/augmented reality)、扫地机器人、家用摄像头等领域发挥着越来越重要的作用, 成为了国内外研究的热点。目前, GaAs 基 VCSEL 的发展和最为广泛, 例如 850 nm 的 VCSEL 已被广泛用于光通信和智能手机, 940 nm 的

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2019-11-07; 录用日期: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(11474038)、吉林省科技发展计划项目(20200519018JH)

\* E-mail: hyq72081220@aliyun.com

VCSEL 被用于激光雷达测距等领域。

氧化物限制技术是当前 VCSEL 实现光电限制所采用的主要技术手段<sup>[6-7]</sup>, 该技术的应用降低了器件的阈值电流并提高了电-光转换效率。在进行氧化工艺前, 需要采用刻蚀工艺制作出氧化窗口以暴露出待氧化层, 而 GaAs 基 VCSEL 的外延片一般是 GaAs/AlGaAs 两种材料交替生长的多层结构, 因此刻蚀时会因异质型材料而产生严重的选择性内蚀现象, 这会直接影响后续的氧化工艺及电极钝化的效果。

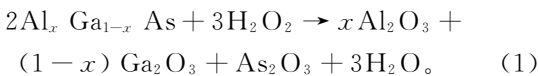
目前, 无论是湿法刻蚀工艺还是干法刻蚀工艺都主要集中在刻蚀速率和刻蚀后侧壁陡直度的研究, 而关于 GaAs/AlGaAs 异质型材料中由选择性内蚀引起的“镂空”现象的研究鲜有报道。为此, 本文分别研究了湿法刻蚀和感应耦合等离子体(ICP)干法刻蚀工艺, 分析影响 GaAs/AlGaAs 异质材料刻蚀的重要因素及其作用规律, 最后得到了选择性内蚀现象几乎消失、刻蚀速率稳定且形貌较好的氧化窗口。

## 2 刻蚀基本原理及方法

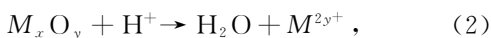
### 2.1 湿法刻蚀

湿法刻蚀是一种通过化学溶液与被刻蚀材料发生化学反应来去除被刻蚀物质的方法, 对 GaAs/AlGaAs 材料进行湿法刻蚀时常用的刻蚀液有 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液、HCl-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液、H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液等。但由于 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 HCl 属于强酸, 横向钻蚀较严重, 对材料刻蚀速率和刻蚀形貌的影响不易控制, 而 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 的酸性较弱, 对异质型材料的选择性较小, 刻蚀速率适中, 便于控制, 因此选择 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液进行对比性实验。

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液刻蚀的反应机理是氧化溶解过程<sup>[8]</sup>: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 作为氧化剂提供氧离子, 可生成 Al—O、Ga—O、As—O 键, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 起络合作用提供氢离子, 反应生成盐并溶于水, H<sub>2</sub>O 起缓冲作用。具体反应式为<sup>[9]</sup>



酸中的 H<sup>+</sup> 再使样品表面的 Al—O、Ga—O、As—O 键断裂, 具体反应式为



式中: M 代指 Al、Ga、As。从上述反应可以看出, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液配比(体积)是影响其刻蚀

效果的最重要因素。为此设计三组不同体积配比的刻蚀液(表 1), 研究体积对比对选择性内蚀、侧壁陡直度及反应速率的影响规律。

表 1 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液体积配比  
Table 1 Volume ratio of H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O solution

Group	Volume ratio
A1	1:1:7
A2	1:1:10
A3	1:1:13

为保证每次刻蚀前实验样品的一致性, 排除其他因素的干扰, 在相同条件下将表面用 SiO<sub>2</sub> 作掩模的外延片解理成若干个小片, 在水浴条件下将刻蚀温度设为 3 ℃。

### 2.2 ICP 刻蚀

相比于湿法刻蚀, ICP 刻蚀具有速度快、各向异性好及刻蚀过程易于控制等优点<sup>[10]</sup>。刻蚀过程既有化学过程也有物理过程<sup>[11]</sup>, 化学反应过程包括两部分: 1) 气体通过电感耦合的方式进行辉光放电, 产生等离子体; 带电离子、电子、具有化学活性的中性原子及自由基; 2) 等离子体与 GaAs/AlGaAs 外延片表面相互作用。物理过程主要指带电离子在加速电场作用下对外延片表面进行轰击的过程, 包括打断化学键、引起晶格损伤、增加反应物质的附着性、加速反应物的脱附、推动外延片表面的化学反应, 及去除外延片表面的非挥发性残留物等。整个 ICP 刻蚀过程可分为三个阶段: 刻蚀物质的吸附、挥发性产物的形成和产物的脱附。GaAs/AlGaAs 系材料的刻蚀过程十分复杂, 要想实现选择比低、陡直度好的刻蚀形貌, 就要深入研究刻蚀气体与 GaAs/AlGaAs 的反应机理及电极功率等刻蚀参数, 以获得化学刻蚀和物理刻蚀的动态平衡。

实验采用 SI500 型 ICP 刻蚀设备, 选用 Cl<sub>2</sub>、BCl<sub>3</sub> 和 Ar 的混合气体作为刻蚀气体。干法刻蚀中选择性内蚀的出现主要是由刻蚀气体与 GaAs/AlGaAs 异质材料的化学反应差异引起的, 因此可通过调整下电极射频(RF)功率来控制等离子体的轰击能量, 从而增减物理轰击所占的比重, 有望改善选择性内蚀的“镂空”现象。另外, BCl<sub>3</sub> 分解生成的 BCl<sub>x</sub> 原子团会形成聚合物, 沉积在侧壁形成阻挡层, 对侧壁起保护作用。因此, 实验中重点研究了下电极 RF 功率及 BCl<sub>3</sub> 气体流量这两个关键参数对选择性内蚀、侧壁陡直度及反应速率的影响规律, 实验参数如表 2 和表 3 所示, sccm 为气体体积流量单位。

表 2 不同下电极 RF 功率下 ICP 刻蚀参数

Table 2 Etching parameters under different RF powers of ICP

Group	Cl <sub>2</sub> /sccm	BCl <sub>3</sub> /sccm	Ar /sccm	RF power /W	ICP power /W
B1	20	5	5	60	400
B2	20	5	5	70	400
B3	20	5	5	80	400
B4	20	5	5	90	400
B5	20	5	5	100	400
B6	20	5	5	110	400

表 3 不同 BCl<sub>3</sub> 气体流量下 ICP 刻蚀参数

Table 3 Etching parameters under different BCl<sub>3</sub> flows

Group	Cl <sub>2</sub> /sccm	BCl <sub>3</sub> /sccm	Ar /sccm	RF power /W	ICP power /W
C1	20	3	5	100	400
C2	20	5	5	100	400
C3	20	7	5	100	400

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 湿法刻蚀

图 1 给出了三组刻蚀液刻蚀 GaAs/AlGaAs 多层结构得到的深度与时间曲线。由图 1 可以看出：随着 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 浓度降低刻蚀速率下降，但刻蚀深度与时间基本都呈线性关系，速率比较稳定，三组的刻蚀速率分别为 3.38 nm/s、2.24 nm/s 和 1.49 nm/s。图 2 给出了刻蚀形貌的扫描电子显微镜 (SEM) 照片，可以看出有体积收缩的现象，这是后续氧化工艺造成的，本文主要关注由选择性内蚀导致的“镂空”现象和侧壁陡直度。从图 2 中可以看出：不同体积配比刻蚀液刻蚀后，图形截面上半部分均呈现出内凹的圆弧形，而截面下半部分呈现为一个斜面，这是因为刻蚀液与材料是逐层进行化学反应的，所以上半部出现弧度是不可避免的。在 GaAs 单晶表面上，(111)As 晶面上每个原子有 2 个不饱和键，而 (111)Ga 晶面上没有，所以 (111)As 面的化学性质比 (111)Ga 面活泼，故刻蚀速率大，这种刻蚀速率的各向异性导致最终刻蚀图形的截面无法保持陡直，从而呈现出不可避免的斜面形貌<sup>[12]</sup>。

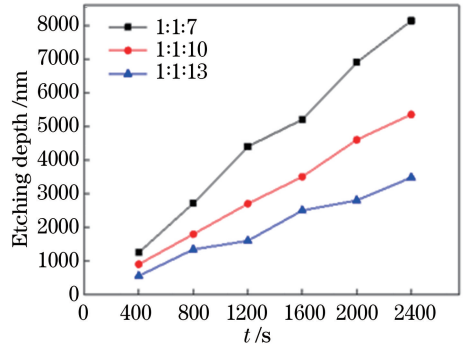


图 1 不同刻蚀液的刻蚀深度与时间的关系曲线

Fig. 1 Etching depth versus time of different etching solutions

从图 2 中还可以看出：随磷酸浓度降低，侧壁陡直度呈先增加后减小的趋势，刻蚀溶液配比为 1:1:7 和 1:1:13 时侧壁陡直度分别为 32° 和 34°，与这两种刻蚀液相比，刻蚀液配比为 1:1:10 时侧壁陡直度得到明显改善，倾斜角度为 45°。从图 2(a) 和 2(c) 可以看出，在 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 组分较高或较低时样品中均出现了“镂空”现象，这是因为 GaAs/AlGaAs 材料属于闪锌矿结构，GaAs 的 (111)Ga 面和 (111)As 面与 (100) 面相交，并具有双重对称性，在 (111) 面中有

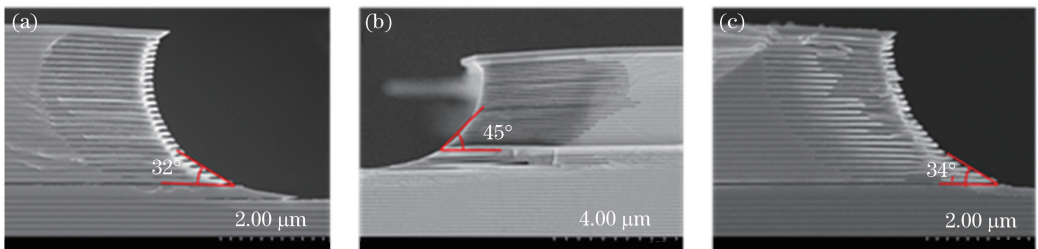


图 2 不同刻蚀液刻蚀后的 SEM 形貌图。(a) 1:1:7; (b) 1:1:10; (c) 1:1:13

Fig. 2 SEM pictures of different etching solutions. (a) 1:1:7; (b) 1:1:10; (c) 1:1:13

4个(111)Ga面和4个(111)As面。但在AlGaAs材料中,Al原子代替部分Ga原子,从而在(111)As面存在未成键的电子对,造成(111)As面化学性质比(111)Ga面活泼<sup>[13]</sup>。所以,在刻蚀AlGaAs过程中,AlGaAs呈较明显的各向同性,并在刻蚀GaAs/AlGaAs多层膜结构时会出现严重的选择性内蚀现象。同时,刻蚀液的浓度会影响AlGaAs刻蚀的各向异性效果,适当的腐蚀液浓度会抑制AlGaAs由各向异性向各向同性的转变<sup>[14]</sup>。当刻蚀液配比为1:1:10时,AlGaAs表现出较好的各向异性效果,横向几乎未产生钻蚀现象,此时“镂空”现象基本消除,获得了理想的刻蚀形貌。

### 3.2 ICP刻蚀

为研究下电极RF功率对刻蚀速率的影响,设定腔室温度为30℃,压强为0.2Pa,Cl<sub>2</sub>流量为20sccm,BCl<sub>3</sub>流量为5sccm,Ar流量为5sccm,ICP功率为400W,RF功率变化如表2所示。通过台阶仪测试了不同下电极RF功率时的刻蚀深度,并给出了不同RF功率下刻蚀深度与时间的关系曲

线,如图3所示,可以看出刻蚀深度与刻蚀时间呈线性变化,RF功率值的改变几乎对刻蚀速率无影响,刻蚀速率均为18.9nm/s。图4给出了不同下电极RF功率下刻蚀形貌的SEM照片,可以看出ICP刻蚀后的侧壁陡直度明显优于湿法刻蚀,随RF功率值的增大陡直度逐渐增大并趋于稳定,RF功率为60W和80W时陡直度分别为75°和77°,当RF功率为100W和110W时,陡直度达到82°。

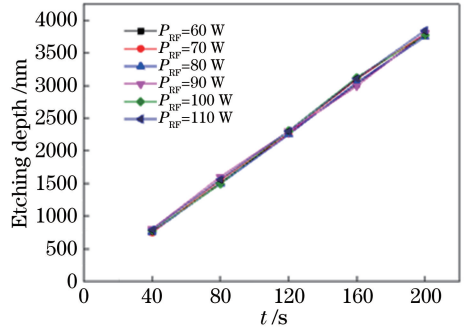


图3 不同RF功率时刻蚀深度与时间的关系曲线  
Fig. 3 Etching depth versus time under different RF powers

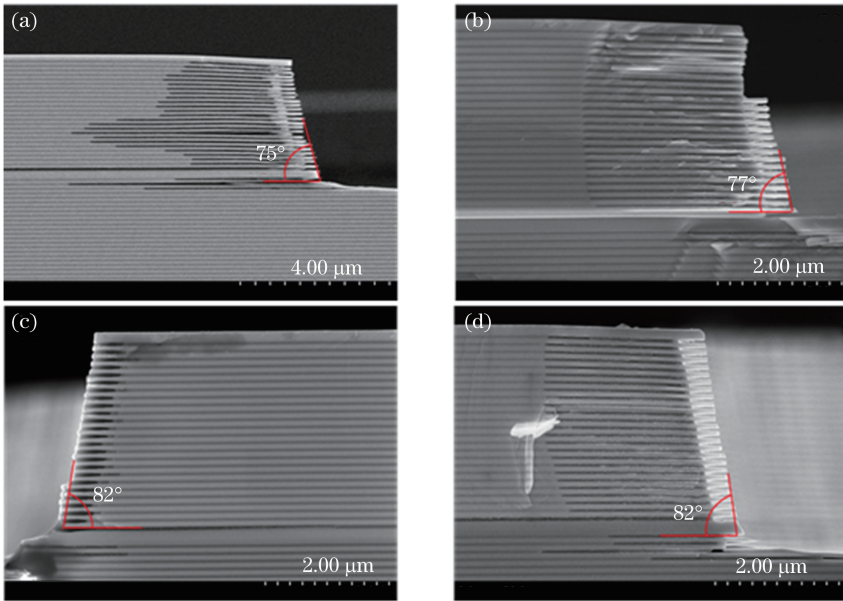


图4 不同RF功率刻蚀后的SEM形貌图。(a) 60 W;(b) 80 W;(c) 100 W;(d) 110 W

Fig. 4 SEM pictures under different RF powers. (a) 60 W; (b) 80 W; (c) 100 W; (d) 110W

对比分析可以看出,ICP刻蚀时,当RF功率由60W增大到80W时,“镂空”现象部分缓解,增大到100W时“镂空”现象基本消失。刻蚀GaAs/AlGaAs多层膜结构时,因为AlGaAs的化学性质比GaAs的活泼,所以会出现严重的选择性内蚀现象,腔室内发生的化学反应如图5所示:Cl<sub>2</sub>和BCl<sub>3</sub>电离分解产生的氯原子用于与样品表面发生化学反

应生成GaCl<sub>x</sub>、GaCl<sub>x</sub><sup>+</sup>和AlCl<sub>3</sub>,Cl<sub>2</sub><sup>+</sup>和Ar<sup>+</sup>主要对样品表面起到轰击作用,Ar用于形成稳定的等离子体,促进化学反应并进行物理刻蚀,BCl<sub>3</sub>能还原AlGaAs氧化生成的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,生成BOCl,使反应顺利进行。在RF功率为60W时,因化学刻蚀出现严重“镂空”现象,但此时物理刻蚀的轰击能力较弱,对“镂空”的轰击不明显;当RF功率为100W时,物理

刻蚀和化学刻蚀达到动态平衡,物理轰击足够把化学刻蚀产生的绝大部分“镂空”的轰击掉。RF 功率值改变不仅会影响物理刻蚀同时也会对化学刻蚀产生影响<sup>[15]</sup>。当 RF 功率继续增大到 110 W 时,刻蚀气体分解速率加快,化学刻蚀效果增强更加明显,动态平衡再次被破坏,因而再次出现严重的选择性内蚀现象。

为研究  $\text{BCl}_3$  气体流量对刻蚀效果的影响,设定参数如表 3 所示,刻蚀时间相同,进行三组对照性实验,图 6 为不同  $\text{BCl}_3$  气体流量刻蚀后的 SEM 形貌图。从图 6 中可以看出  $\text{BCl}_3$  气体流量的变化对刻蚀速率几乎无影响,刻蚀速率仍为 18.9 nm/s,这是因为作为主要刻蚀气体的  $\text{Cl}_2$  的流量相同,从图中看出  $\text{BCl}_3$  气体流量对陡直度及“镂空”现象的影响也很小。

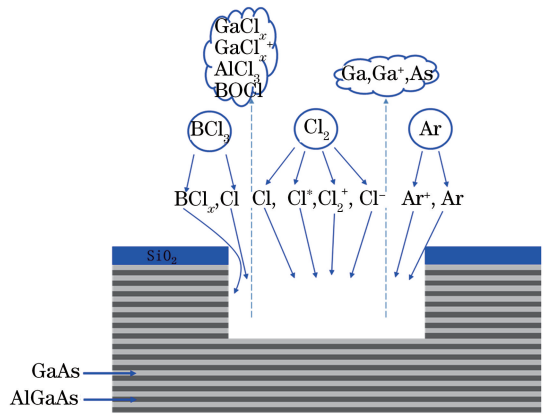


图 5 ICP 刻蚀化学反应示意图

Fig. 5 Chemical reaction diagram of ICP etching

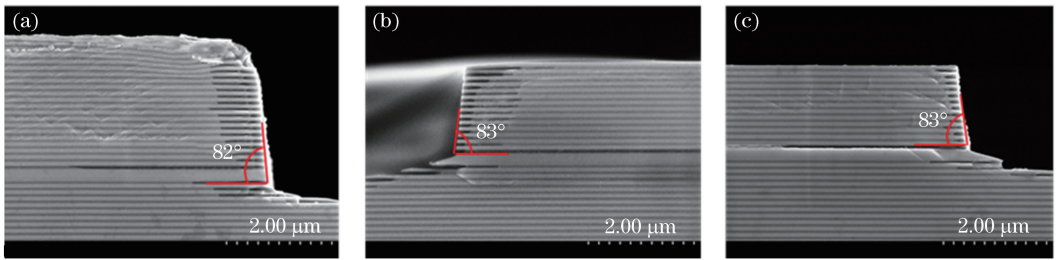


图 6 不同  $\text{BCl}_3$  气体流量刻蚀后的 SEM 形貌图。(a) 3 sccm;(b) 5 sccm;(c) 7 sccm

Fig. 6 SEM pictures under different  $\text{BCl}_3$  flow rates. (a) 3 sccm; (b) 5 sccm; (c) 7 sccm

## 4 结 论

针对氧化物限制型 VCSEL 制备中 GaAs/AlGaAs 异质型材料在刻蚀工艺中出现的“镂空”现象,详细研究了湿法刻蚀和干法刻蚀工艺中刻蚀液体积配比、下电极 RF 功率及  $\text{BCl}_3$  气体流量等参数对选择性内蚀、侧壁陡直度及反应速率的影响规律。研究表明:在湿法刻蚀工艺中,在水浴温度为 3 °C 恒定环境下随  $\text{H}_3\text{PO}_4$  浓度降低“镂空”现象呈先减弱后增强趋势,在刻蚀液  $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$  的体积配比为 1:1:10 时具有良好的刻蚀效果,“镂空”现象几乎消除,侧壁陡直度较好为 45°,且刻蚀速率适中为 2.24 nm/s;采用 ICP 刻蚀时,通过改变下电极 RF 功率可调整腔室内的化学刻蚀和物理刻蚀的动态平衡,从而有效消除了由选择性内蚀引起的“镂空”现象,同时发现下电极 RF 功率的变化对刻蚀速率的影响很小,但侧壁陡直度随下电极 RF 功率的增大而增大, $\text{BCl}_3$  气体流量对“镂空”现象、刻蚀速率和陡直度的影响很小。最终确定的 GaAs/AlGaAs 外延片的最佳干法刻蚀条件如下:腔室温度 30 °C,压强 0.2 Pa, $\text{Cl}_2$  流量 20 sccm, $\text{BCl}_3$  流量 5 sccm,Ar 流量 5 sccm,ICP 功率为 400 W,

RF 功率为 100 W,在这些参数设置下刻蚀效果达到最佳,此时化学刻蚀和物理刻蚀达到动态平衡,刻蚀后的陡直度接近于垂直且“镂空”现象消失。

## 参 考 文 献

- [1] Moench H, Ralf C, Gronenborn S, et al. Integrated high power VCSEL systems [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9733: 97330V.
- [2] Chad W, Geske J, Henry G, et al. Large-area high-power VCSEL pump arrays optimized for high-energy lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8381: 83811R.
- [3] Yu Z Z, Hou X, Zhou Q L, et al. VCSEL pumped compact wide-temperature Nd:YAG laser and grazing-incidence amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602003.  
于真真, 侯霞, 周群立, 等. 垂直腔面发射激光器抽运小型宽温 Nd:YAG 激光器及掠入射式放大器的研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602003.
- [4] Feng Y, Hao Y Q, Wang X T, et al. Structural optimization and fabrication of 850 nm vertical-cavity surface-emitting laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0301005.  
冯源, 郝永芹, 王宪涛, 等. 850 nm 垂直腔面发射激

- 光器结构优化与制备[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301005.
- [5] Kasten A M, Giannopoulos A V, Long C, et al. Fabrication and characterization of individually addressable vertical-cavity surface-emitting laser arrays and integrated VCSEL/PIN detector arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6484: 64840C.
- [6] Li Y, Zhou G Z, Lan T, et al. Study on wet oxidation process in vertical cavity surface emitting laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(12): 1714-1721.  
李颖, 周广正, 兰天, 等. 垂直腔面发射激光器湿法氧化工艺的实验研究[J]. 发光学报, 2018, 39(12): 1714-1721.
- [7] Almuneau G, Chouchane F, Calvez S, et al. Three dimensional confinement technology based on buried patterned  $\text{AlO}_x$  layers: potentials and applications for VCSEL arrays [C] // 2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), June 23-27, 2013, Cartagena, Spain. New York: IEEE, 2013: 13779023.
- [8] Zuo L. Etching process research of VCSEL [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.  
左亮. VCSEL 刻蚀工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [9] Sun L Y. The critical process study of the GaAs/AlGaAs dual-band QWIP detector [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.  
孙丽媛. GaAs/AlGaAs 双波段量子阱红外探测器关键工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [10] 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  $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3$ -based inductively coupled plasma[J]. Plasma Science and Technology, 2011, 13(2): 223-229.
- [11] Ning J H, Zhang K F, Tang H J, et al. Inductively coupled plasma etching of  $\text{In}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{As}$  in  $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$  [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7135: 71353I.
- [12] Luo Y C, Han S J, Wang X M, 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.
- [13] Wang W J. The design and study of surface plasmon metal vertical cavity surface emitting lasers [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.  
王文娟. 基于表面等离子体的垂直腔面发射激光器的设计和研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [14] Huang H, Huang Y Q, Ren X M, et al. Selective wet etching of  $\text{HF}/\text{CrO}_3$  solution on AlGaAs: application to vertical taper structures[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(2): 208-212.  
黄辉, 黄永清, 任晓敏, 等.  $\text{HF}/\text{CrO}_3$  溶液对 AlGaAs 的选择性湿法刻蚀应用于楔型结构的制备[J]. 半导体学报, 2002, 23(2): 208-212.
- [15] Liu W K, Lin S M, Wu S, et al. Research on etch rate of reactive ion etching of GaAs, AlAs and DBR [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(9): 1222-1225.  
刘文楷, 林世鸣, 武术, 等. GaAs, AlAs, DBR 反应离子刻蚀速率的研究[J]. 半导体学报, 2001, 22(9): 1222-1225.