

# 用于垂直腔面发射激光器的 GaAs/AlGaAs 的 ICP 刻蚀工艺研究

王宇<sup>1,2</sup>, 周燕萍<sup>2\*</sup>, 李茂林<sup>2</sup>, 左超<sup>2</sup>, 杨秉君<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长春大学理学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>爱发科(苏州)技术研究开发有限公司, 江苏 苏州 215026

**摘要** 采用电感耦合等离子体(ICP)刻蚀设备对应用于垂直腔面发射激光器的 GaAs/AlGaAs 材料进行刻蚀工艺研究。该刻蚀实验采用光刻胶作为刻蚀掩模, Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub> 作为刻蚀工艺气体, 通过实验分析总结了 ICP 源功率、射频偏压功率和腔体压强对 GaAs/AlGaAs 材料和掩模刻蚀速率的影响。利用扫描电子显微镜观察不同参数条件对样品侧壁垂直度和底部平坦度的影响。最终在保证高刻蚀速率的前提下, 通过调整优化各工艺参数, 得到了侧壁光滑、底部平坦的圆台结构。

**关键词** 激光光学; 垂直腔面激光发射器; 电感耦合等离子体刻蚀; 圆台结构; GaAs/AlGaAs 材料

中图分类号 TB34

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0401005

## ICP Etching Process of GaAs/AlGaAs for Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Wang Yu<sup>1,2</sup>, Zhou Yanping<sup>2\*</sup>, Li Maolin<sup>2</sup>, Zuo Chao<sup>2</sup>, Yang Bingjun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Changchun University, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>ULVAC Research Center Suzhou Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215026, China

**Abstract** We use inductively coupled plasma (ICP) etching equipment to study the etching process for GaAs/AlGaAs materials used in vertical-cavity surface-emitting lasers. During the ICP etching process, photoresist is used as the etching mask, whereas Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub> is used as the etching gas. The ICP antenna power, radio frequency bias power, and cavity pressure in case of the GaAs/AlGaAs materials and masks are analyzed and summarized through experiments. Further, scanning electron microscopy is used to investigate the effects of different parameter conditions on the verticality and bottom flatness of the pattern sidewalls. Finally, a round-table structure with smooth sidewalls and flat bottom is obtained by adjusting and optimizing the parameters during each process to ensure a high etching rate.

**Key words** laser optics; vertical-cavity surface-emitting lasers; inductively coupled plasma etching; round-table structure; GaAs/AlGaAs materials

**OCIS codes** 140.3390; 160.6000; 250.5960

## 1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 是一种新型的半导体激光器, 与传统边发射激光器相比, VCSEL 具有体积小、可靠性高、功耗低以及成本较低等优势, 被广泛应用于光互连<sup>[1]</sup>、光通信<sup>[2]</sup>、激光引信<sup>[3]</sup>、激光照明<sup>[4]</sup>及芯片级原子钟<sup>[5]</sup>等多个领域。目前, 600 ~ 980 nm 波段的 VCSEL 都是以 GaAs/

AlGaAs 材料为基础, 制备技术较成熟, 已投入商业化。所用材料 GaAs/AlGaAs 作为第二代半导体材料的典型代表, 与传统的硅材料相比, 具有宽禁带、耐高温、抗辐射、直接带隙、消耗功率低、电子迁移率高<sup>[6-7]</sup>等优点, 在超高频、超高速、低噪声、低功率器件和电路中, 特别是在光电集成方面和光电子器件上, 占有独特的优势, 应用广泛<sup>[8]</sup>。

氧化限制型 VCSEL 一般采用氧化工艺对上分

收稿日期: 2019-10-14; 修回日期: 2019-11-11; 录用日期: 2019-12-13

\* E-mail: yanping\_zhou@ulvac.com

布布拉格反射镜(P-DBR)和有源增益区中高铝组分的 AlGaAs 层进行氧化,形成高阻值限制区,达到光限制和电限制的目的。为了使高铝氧化层侧面能够暴露在水蒸气中,一般采用台面结构<sup>[9]</sup>。理想的台面刻蚀技术应该满足以下几个要求:1)各向异性刻蚀,台面刻蚀过程中只有垂直于外延方向的刻蚀,而横向没有钻蚀;2)良好的刻蚀选择性,与被刻蚀的半导体材料的刻蚀速率相比,刻蚀过程中应保证光刻胶(PR)的刻蚀速率足够小,即有足够大的刻蚀选择比,以保证掩模效果;3)刻蚀应具有高的可控制性,以保证刻蚀深度。

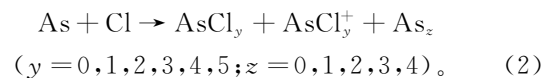
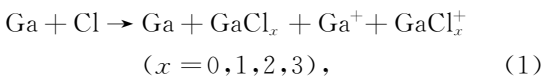
湿法腐蚀和干法刻蚀是制备 VCSEL 台面结构的两种基本技术,相较于湿法刻蚀,干法刻蚀具有控制精度高、大面积刻蚀均匀性好、污染少等特点,当刻蚀工艺参数相互匹配时,还具有刻蚀参数和刻蚀速率的调节范围大、稳定性和重复性好的优点。干法刻蚀的主要方法有激光直写法<sup>[10]</sup>、反应离子(RIE)刻蚀法<sup>[11]</sup>、电感耦合等离子体(ICP)刻蚀法,其中 ICP 刻蚀技术是一种高密度、低气压的刻蚀技术,具有可通过参数调节精确控制刻蚀、低损伤等优势<sup>[12]</sup>。

本文采用 ICP 刻蚀技术,利用 Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub> 混合气体对 GaAs/AlGaAs 基 VCSEL 结构单元进行刻蚀,系统地研究了 ICP 源功率、射频(RF)偏压功率和腔体压强对刻蚀结果的影响,对 GaAs 基 VCSEL 的 ICP 刻蚀工艺的调整具有参考价值。

## 2 实验原理、方法和目标

本文以 Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub> 作为刻蚀气体。在 高能磁 场作用下,气体分子分解成 Cl<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、Cl、BCl<sub>2</sub>、BCl、B<sup>+</sup> 等活性粒子和基团参与化学反应,其中电离生成物之间也有相互作用,如 Cl+Cl→Cl<sub>2</sub>, BCl<sub>2</sub>+Cl<sub>2</sub>→BCl<sub>3</sub>+Cl。

活性中性粒子吸附到材料表面,与表面的 GaAs 发生反应:



同时,等离子体中的离子对固体表面进行轰击,使反应产物如 GaCl<sub>x</sub>、As<sub>2</sub> 等从表面脱附<sup>[13]</sup>。本文采用 ICP 刻蚀机 (NE-950EXz, ULVAC) 进行 GaAs/AlGaAs 刻蚀。该设备在反应腔体上下部分别配有一个 RF 电源,上部电源用来控制等离子体

密度,下部电源控制垂直于下极板的电场强度,功率可调范围为 0~2000 W,可以生成高密度等离子体。该设备在 ICP 刻蚀机上增加了固定磁场,具有单位体积内等离子体密度高、离子能量低、对基板损伤小、起辉/放电所需腔体压力小等优点,并配有 ULVAC 自主研发的星形电极 (Star Electrode),星形电极能够产生反向磁场,可以自动高效地清洁腔体,提高实验效率。最后,利用台阶式探针轮廓仪 (Dektak 8, Veeco) 测量样品的刻蚀深度,通过刻蚀深度来计算刻蚀速率,并利用冷场发射扫描电子显微镜 (SEM, JSM-7500F, JEOL) 测量样品刻蚀角度及图形形貌。

通过在 Si 衬底上沉积 GaAs 膜及 AlGaAs 膜制备实验所用样片,掩模为台湾永光化学生产的 EPG-516 型光刻胶。由于样片制备工艺复杂、成本较高,本文通过划片把样片划成 1 cm×1 cm 的实验片,把实验片放在 Si 陪片 (Dummy Wafer) 上进行实验测试,如图 1 所示。因为样片表面为光刻胶,所以在 Si 陪片上覆盖一层同为有机物组成的聚酰亚胺胶带,以避免实验过程中 Si 陪片影响实验结果。

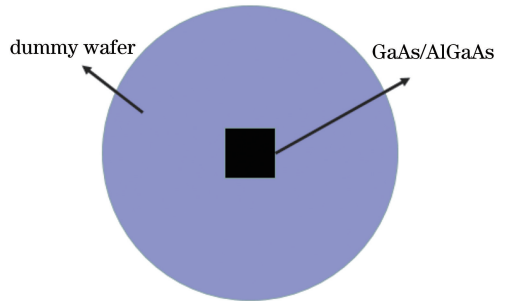


图 1 GaAs/AlGaAs 样片与 Si 陪片示意图  
Fig. 1 Schematic of GaAs/AlGaAs sample wafer and Si chip

VCSEL 主要结构的基本构成单元有 P-DBR、有源增益区和下分布布拉格反射镜 (N-DBR)。如图 2 所示,需要按照掩模图形对 P-DBR 和有源增益区进行刻蚀,保留 N-DBR,使 P-DBR 和有源增益区形成台型,最终期望得到侧壁角度为 60°~70°、侧壁光滑和底部平坦的圆台结构。

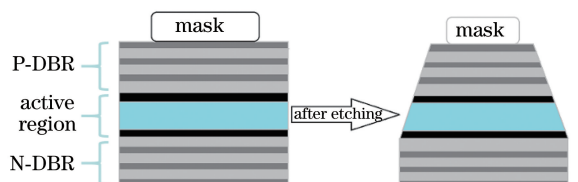


图 2 刻蚀流程示意图  
Fig. 2 Schematic of etching process

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 ICP 源功率对刻蚀结果的影响

实验中保持 RF 偏压功率、腔体压强等条件不变, ICP 源功率(Antenna Power)由 800 W 逐步增加至 1600 W, 刻蚀速率与 ICP 源功率的关系如图 3 所示, 可以看出 GaAs/AlGaAs 和 PR 的刻蚀速率随着 ICP 源功率的增加而增大, 但增加速率逐渐减小。这是因为随着 ICP 源功率的增加, 腔体中刻蚀气体的离化率上升, 等离子体密度增大, 可参与反应的离子增加, 所以刻蚀速率增加。但当离子密度趋

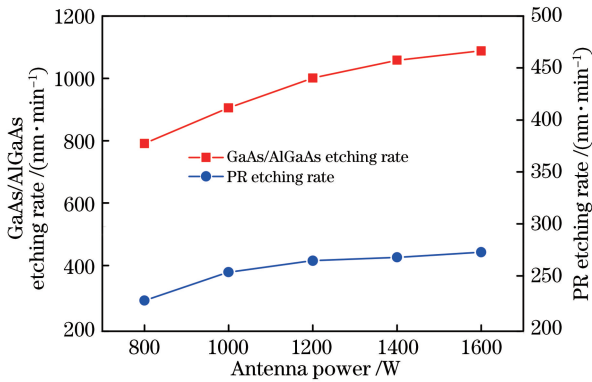


图 3 刻蚀速率随 ICP 源功率的变化曲线

Fig. 3 Etching rate versus ICP antenna power

于饱和状态时, 继续增加等离子体密度, 离子间相互碰撞概率会增加, 离子平均自由程与离子动能减小, 导致物理刻蚀速率减缓; 而且当等离子体密度过大时, 部分离子未与被刻蚀材料发生反应, 化学刻蚀速率不会显著增加, 所以 GaAs/AlGaAs 和 PR 刻蚀速率的增长速率减缓<sup>[14]</sup>。

此外, 还观察到 ICP 源功率的增加也会对图图形貌造成影响。不同 ICP 源功率下的刻蚀剖面 SEM 图如图 4 所示, 可以看出随着 ICP 源功率的增加, 实验片侧壁的垂直度增加, 但 ICP 源功率突破一定阈值后, 侧壁下部出现弯曲, 侧壁垂直度受到破坏。这是因为 ICP 源功率增加时, 气体的电离度会增大, 等离子体密度随之增加, 从而产生的 Cl 中性粒子基团增加, 使得刻蚀过程中的化学反应增强; 并且随着等离子体密度的增大, 到达样品表面的阳离子增多, 能更有效地打断被刻蚀材料的化学键, 增加刻蚀速率的同时减少了对上层材料的损耗。所以随着等离子体密度的增大, 样品侧壁的垂直度随之增加, 但当 ICP 源功率增大到一定程度后, 反应离子浓度继续增大, 离子间平均自由程减小, 离子能量减弱, Cl 中性粒子到达侧壁的概率增加, 使侧壁上产生了横向钻蚀<sup>[15]</sup>, 从而发生弯曲。因此, 想要保证侧壁的垂直度且图形不被破坏, ICP 源功率不可过大。

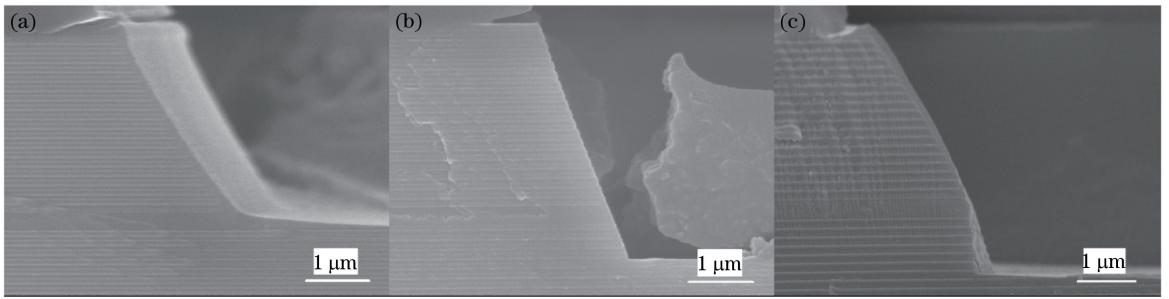


图 4 不同 ICP 源功率下 GaAs/AlGaAs 刻蚀剖面 SEM 图。(a) 800 W; (b) 1400 W; (c) 1600 W

Fig. 4 SEM images of GaAs/AlGaAs etching profile for different ICP antenna powers. (a) 800 W; (b) 1400 W; (c) 1600 W

#### 3.2 RF 偏压功率对刻蚀结果的影响

实验中保持 ICP 源功率、腔体压强等条件不变, RF 偏压功率(Bias Power)由 300 W 逐步增加到 700 W。刻蚀速率与 RF 偏压功率的关系如图 5 所示, 随着 RF 偏压功率的上升, 刻蚀速率增加。因为 RF 偏压转换成了直流偏转电压被加载在上下极板之间, 给等离子体轰击样品提供了能量, 其产生的电场主要控制物理刻蚀过程。随着 RF 偏压功率的上升, 利用等离子体的物理轰击移除表面材料的同时, 还可以打断被刻蚀材料的化学键, 轰击吸附在样品表面阻挡刻蚀进一步进行的反应生成物, 使其脱

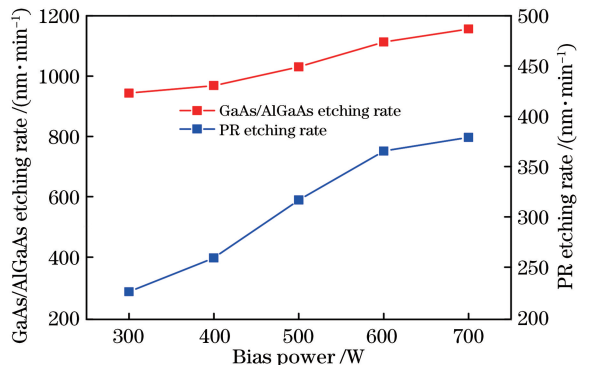


图 5 刻蚀速率随 RF 偏压功率的变化曲线

Fig. 5 Etching rate versus RF bias power

离表面<sup>[16]</sup>,从而刻蚀速率增加。

但当 RF 偏压功率过低时,样品表面会产生残留物。不同 RF 偏压功率下刻蚀剖面的 SEM 图如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出,因为离子能量不足,物理刻蚀机制减弱,化学刻蚀也不充分,反应产物不能及时溅射分离,导致样品表面产生残留。从图 6(b)可以看出,随着 RF 偏压功率的增加,破裂化学键的效率得到提高,同时材料物理溅射和生成物

脱附的效率也得到提高,样品表面无残留物。但随着 RF 偏压功率继续增加,图形底部向下产生一定角度,如图 6(c)所示,因为离子能量过高,Cl 中性粒子未来得及与材料表面发生反应便发生了溅射或反射,化学刻蚀效率降低,侧壁和生成物对侧壁底部材料的物理刻蚀产生阻碍,导致侧壁底部的刻蚀效率低于平面,从而图形底部平面向下产生一定角度<sup>[17]</sup>。

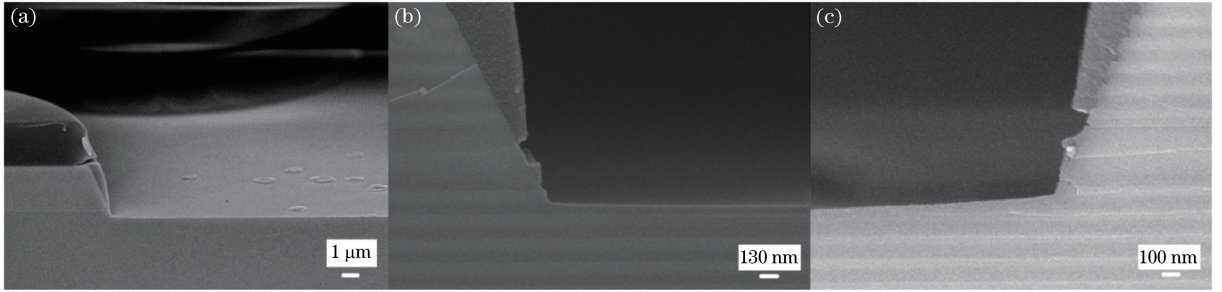


图 6 不同 RF 偏压功率下, GaAs/AlGaAs 刻蚀剖面 SEM 图。(a) 300 W; (b) 500 W; (c) 600 W

Fig. 6 SEM images of GaAs/AlGaAs etching profile for different RF bias powers. (a) 300 W; (b) 500 W; (c) 600 W

### 3.3 腔体压强对刻蚀结果的影响

实验中保持 ICP 源功率、RF 偏压功率以及气体流量、比例不变,反应室腔体压强(Cavity Pressure)由 0.6 Pa 逐步增加到 1.4 Pa。刻蚀速率与腔体压强的关系曲线如图 7 所示,可以看出, GaAs/AlGaAs 和 PR 的刻蚀速率随着腔体压强的增加而增大,最终刻蚀速率趋于平缓。压强的变化会改变电子和离子的平均自由程,进而影响等离子体的轰击能量和方向,导致刻蚀速率发生变化。压强的增加反映腔内等离子体密度增高,更多的等离子体活性基团与刻蚀材料表面发生化学反应,从而提高了刻蚀过程中化学刻蚀成分,刻蚀速率增大。但随着压强的继续增大,离子的碰撞进一步加剧,损失的能量也进一步增多,离子的散射效应增强,减弱了物理刻蚀作用,刻蚀速率趋于平缓<sup>[18]</sup>。

图 8 为腔体压强增加时的刻蚀剖面 SEM 图,

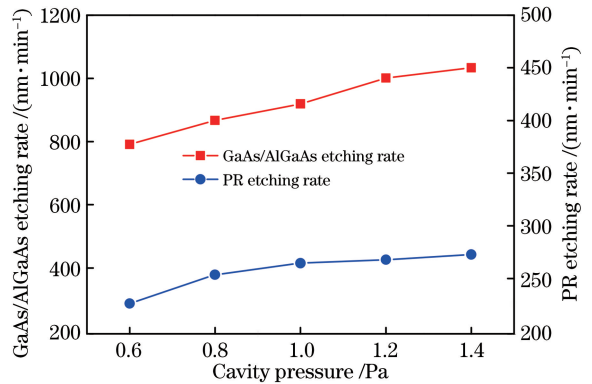


图 7 刻蚀速率随腔体压强的变化曲线

Fig. 7 Curves of etching rate with cavity pressure

可以看出,刻蚀过程中随着腔体压强的增加,图形平坦度得到改善,但图形底部平面产生了向上的角度。这是因为随着腔体压强的增加,侧壁下方的电场分布发生改变,使侧壁下方的电场强度大于中间部位,导致侧壁下方的离子轰击能量大于中间部位,从而

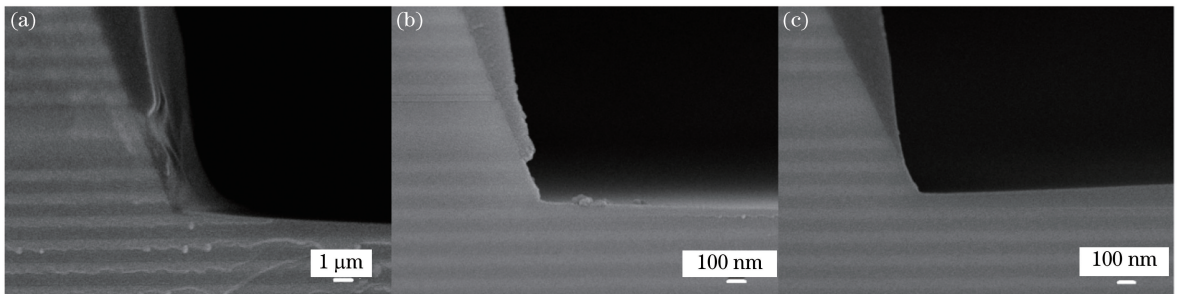


图 8 不同腔体压强下 GaAs/AlGaAs 刻蚀剖面的 SEM 图。(a) 0.8 Pa; (b) 1.2 Pa; (c) 1.4 Pa

Fig. 8 SEM images of GaAs/AlGaAs etching profile for different cavity pressures. (a) 0.8 Pa; (b) 1.2 Pa; (c) 1.4 Pa

侧壁下方的刻蚀速率远大于中间部位<sup>[19]</sup>。

### 3.4 最终刻蚀结果

通过上述实验过程及对实验结果的分析,通过调整 ICP 源功率、RF 偏压功率和腔体压强三个参

数,最终在保证高刻蚀速率的条件下,得到了侧壁角度在  $60^\circ \sim 70^\circ$  之间、侧壁光滑和底部平坦的圆台结构,如图 9 所示。参数为 ICP 源功率为 1400 W,RF 偏压功率为 500 W,腔体压强为 1.4 Pa。

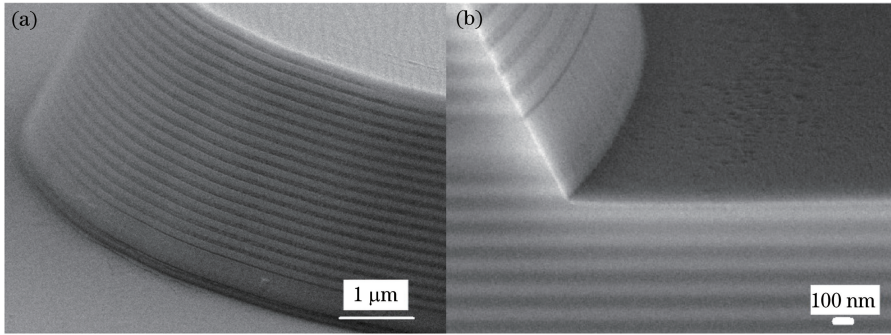


图 9 最终刻蚀结果 SEM 图。(a)样品圆台;(b)样品剖面

Fig. 9 SEM image of the final etching result. (a) Sample table; (b) sample profile

## 4 结 论

本文借助 ICP 刻蚀设备,采用  $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3$  混合气体作为刻蚀气体,研究了 ICP 源功率、RF 偏压功率和腔体压强对 GaAs/AlGaAs 材料、PR 的刻蚀速率和刻蚀图形形貌的影响。结果表明三者对于刻蚀速率和图形形貌都有较大的影响,这是因为三者对等离子体密度、粒子能量以及刻蚀过程中产生副产物的多少具有一定影响。同时,它们引发的物理刻蚀机制和化学刻蚀机制的主导情况的变化对图形底部的平坦度也有一定影响。

### 参 考 文 献

- [1] Gatto A, Boletti A, Boffi P, et al. Adjustable-chirp VCSEL-to-VCSEL injection locking for 10-Gb/s transmission at  $1.55 \mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21748-21753.
- [2] Ji C, Wang J, Söderstrom D, et al. High volume 850 nm oxide VCSEL development for high bandwidth optical data link applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7229: 722904.
- [3] Geib K M, Serkland D K, Keeler G A, et al. Photonics technology development for optical fuzing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5871: 58710J.
- [4] Shechegrov A V, Watson J P, Lee D, et al. Development of compact blue-green lasers for projection display based on Novalux extended-cavity surface-emitting laser technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 5737: 113-119.
- [5] Al-Samaneh A, Renz S, Strodl A, et al. Polarization-stable single-mode VCSELs for Cs-based MEMS atomic clock applications[J]. *Proceedings of*

*SPIE*, 2010, 7720: 772006.

- [6] Kong T, Su R G, Zhang B B, et al. CMOS-compatible, label-free silicon-nanowire biosensors to detect cardiac troponin I for acute myocardial infarction diagnosis [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, 34(1): 267-272.
- [7] Spector S J, Geis M W, Zhou G R, et al. CMOS-compatible dual-output silicon modulator for analog signal processing[J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11027-11031.
- [8] Wang Y Y, Huang R, Liu X Y, et al. Development of microelectronic technology in the 21st Century facing industrial demands (part 1) [J]. *Physics*, 2004, 33(6): 403-417.  
王阳元, 黄如, 刘晓燕, 等. 面向产业需求的 21 世纪微电子技术的发展(上)[J]. *物理*, 2004, 33(6): 403-417.
- [9] Shi G Z, Guan B L, Li S, et al. Power dissipation in oxide-confined 980-nm vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(1): 014206.
- [10] Li Q S, Liang T, Lei C, et al. 355 nm all-solid-state ultraviolet laser direct writing and etching of microchannels in borosilicate glass[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0802003.  
李奇思, 梁庭, 雷程, 等. 355 nm 全固态紫外激光直写刻蚀硼硅玻璃微通道[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0802003.
- [11] Jin L, Li Y F, Shen H L, et al. Damage-removal and passivation of polycrystalline black silicon by reactive ion etching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0216001.  
金磊, 李玉芳, 沈鸿烈, 等. 反应离子刻蚀制备的多晶黑硅损伤去除与钝化性能研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0216001.

- [12] Rao L, Xin X J, Li D A, et al. Parameter optimization of inductively coupled plasma and its application on multi-wavelength DFB laser array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 031405.  
饶岚, 忻向军, 李灯熬, 等. ICP刻蚀优化及在多长分布反馈式激光器阵列中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 031405.
- [13] Kao C C, Huang H, Tsai J, et al. Study of dry etching for GaN and InGaN-based laser structure using inductively coupled plasma reactive ion etching [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2004, 107(3): 283-288.
- [14] Cho H, Vartuli C B, Abernathy C R, et al. Cl<sub>2</sub>-based dry etching of the AlGaInN system in inductively coupled plasmas [J]. *Symposium E: Power Semiconductor Materials & Devices*, 1997, 483: 327.
- [15] Wang X C, Su B F, Jia W, et al. Isolated grooves etching on 3J GaAs solar cell by ICP[J]. *Journal of Guizhou University(Natural Science)*, 2014, 31(4): 52-56.  
王训春, 苏宝法, 贾巍, 等. 三结砷化镓太阳能电池干法刻蚀技术研究[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2014, 31(4): 52-56.
- [16] Lee Y H, Sung Y J, Yeom G Y, et al. Magnetized inductively coupled plasma etching of GaN in Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub> plasma [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2000, 18(4): 1390-1394.
- [17] Smith S A, Wolden C A, Bremser M D, et al. High rate and selective etching of GaN, AlGaIn, and AlN using an inductively coupled plasma [J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(25): 3631-3633.
- [18] Khan F, Zhou L, Kumar V, et al. High rate etching of AlN using BCl<sub>3</sub>/Cl<sub>2</sub>/Ar inductively coupled plasma [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2002, 95(1): 51-54.
- [19] Ding R X, Yang Y T, Han R. Microtrenching effect of SiC ICP etching in SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> plasma[J]. *Journal of Semiconductors*, 2009, 30(1): 016001.