

文章编号: 1672-8785(2023)02-0024-11

GaAs 基 VCSEL 干法刻蚀技术研究综述

范昊轩 张文博 李沐泽 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 130000)

摘 要: GaAs 基垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) 自 1977 年问世以来, 凭借阈值电流较低、光束质量很高、可集成到二维阵列、易单模激射等优势被广泛应用于各个领域, 但是其尺寸过小而在制造中难以精确控制精度、等离子体刻蚀时易对掩膜和侧壁造成形貌损伤、刻蚀过程中生成副产物过多等问题, 影响了应用范围和提高了制造难度。如何保持高刻蚀速率并尽可能地减小刻蚀损伤成为了目前的研究热点问题。分析了 GaAs 基 VCSEL 干法刻蚀技术的研究现状与技术难点, 并展望了未来的发展趋势。

关键词: GaAs; 垂直腔面发射激光器; 干法刻蚀; 选择性刻蚀; 刻蚀损伤

中图分类号: O472+.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.02.005

Review of GaAs-Based VCSEL Dry Etching Technology

FAN Hao-xuan, ZHANG Wen-bo, LI Mu-ze, HAO Yong-qin*

(National Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: GaAs-based vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) has been widely used in various fields since its introduction in 1977 with its advantages such as low threshold current, high beam quality, integration into two-dimensional arrays and easy single-mode maser. However, due to its small size, it is difficult to accurately control the accuracy in manufacturing, and it is easy to cause morphological damage to the mask and side wall during plasma etching, and too many by-products are generated in the etching process, which affects its application scope and improves the manufacturing difficulty. How to maintain high etching rate and reduce etching damage as much as possible has become a hot research topic. The research status and technical difficulties of GaAs-based VCSEL dry etching technology are analyzed, and the future development trend is prospected.

Key words: GaAs; vertical-cavity surface-emitting laser; dry etching; selective etching; etch damage

收稿日期: 2022-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(11474038); 吉林省科技发展计划项目(20200401073GX)

作者简介: 范昊轩(1999-), 男, 吉林四平人, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器件研究。

*通讯作者: E-mail: hyq72081220@aliyun.com

0 引言

GaAs 基材料由于具有特别的性质而在半导体激光器、光电探测器、航空航天器件等方面得到了广泛应用。尤其在半导体激光器的制备中, 该材料更是处于重要地位。GaAs 基 VCSEL 已广泛应用于三维成像、无人驾驶、物联网、数据通讯等领域, 同时在光电对抗、激光雷达、航空航天等高精尖领域也发挥着巨大的作用和潜能^[1-8]。随着半导体光电子技术的发展, 人们对其性能也提出了更高的要求。

GaAs 基 VCSEL 的刻蚀技术是制备过程中最关键的环节。刻蚀时掩膜的质量、刻蚀 GaAs 后的表面质量、VCSEL 的台面和侧壁形貌都会直接影响器件性能。在刻蚀过程中, 掩膜的好坏直接影响刻蚀的效果^[9-11]。VCSEL 侧壁如果过于粗糙, 就会影响载流子的复合效率, 也会使光发生散射效应。VCSEL 表面和侧壁不光滑、有残留时会增大其电阻值或击穿电流。如果 GaAs/AlGaAs 的刻蚀速率未能达到 1:1, 那么台面的侧壁会出现横向钻蚀的镂空现象, 不利于实现均匀电场和高效的器件隔离。

目前 VCSEL 刻蚀分为湿法刻蚀和干法刻蚀两种。为实现良好的形貌控制, GaAs 基 VCSEL 的刻蚀通常采用干法刻蚀技术^[12]。干法刻蚀具有精度高、可控性好、易于批量生产以及工艺清洁度高等优势。因此, 深入研究高精度的刻蚀技术, 尤其是高精度的干法刻蚀技术, 对制备高性能 VCSEL 具有重要意义。本文综述了 GaAs 基 VCSEL 干法刻蚀技术的发展与研究现状。

1 刻蚀中改善掩膜质量的研究现状

目前, VCSEL 刻蚀过程中的关键环节主要有以下几个方面: 控制台面的尺寸、刻蚀时掩膜的质量、刻蚀 GaAs 后的表面质量、VCSEL 台面和侧壁形貌。

刻蚀 VCSEL 之前要进行光刻。常用的掩膜有光刻胶软掩膜, 二氧化硅、氮化硅和金属硬掩膜^[13]。光刻胶掩膜通过前烘和坚膜之后

形状会改变。由于在刻蚀气体氛围中光刻胶的抗蚀性不能保证稳定的状态, 在刻蚀过程中高浓度的离子会使光刻胶掩膜变性或者碳化。另外, 光刻胶掩膜的形状在刻蚀过程中会转移给下方的晶圆片, 所以控制好掩膜的质量对刻蚀过程很重要。为了使光刻胶掩膜具有更好的形貌, 研究人员通过对光刻胶厚度的分析, 研究了不同厚度下光刻胶掩膜在烘烤后的变化规律。2012 年, 孙丽媛等人^[14]针对光刻胶掩膜对刻蚀 GaAs 材料侧壁的问题, 采用控制变量法研究了厚度不同的光刻胶对 GaAs 材料侧壁倾角产生的影响。他们用台阶仪测量旋涂不同厚度光刻胶烘烤之后的结果, 发现光刻胶的厚度越大, 高温烘烤后光刻胶变性越严重, 如图 1 所示。

通过优化光刻胶掩膜回流方法, 研究人员改善了光刻胶掩膜在回流后的形貌。2014 年, Porkolab G A 等人^[15]针对光刻胶掩膜回流时出现的坍塌变性问题, 采用等离子体辅助回流方法改善了传统加热回流法的坍塌现象, 如图 2 中的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图像所示。

2015 年, 焦庆斌等人^[16]发现了光栅顶部的光刻胶掩膜“顶角平台”现象(出现光刻胶掩膜占宽比过大的情况)。针对这一问题, 他们采用了改变光刻过程中的曝光时间和提高倒置热熔温度的方法。结果表明, 通过增加曝光时间和提高倒置热熔温度, 可明显减小占宽比以及光刻胶掩膜线条宽度。

2016 年, 乔辉等人^[17]针对在电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)干法刻蚀后光刻胶掩膜出现凸起和孔洞的异常现象, 采用探针式表面轮廓仪和激光共聚焦显微镜对其进行了分析。他们认为, 刻蚀时等离子体中的紫外线对掩膜的光刻胶进行曝光作用而释放出一定量的氮气, 在光刻胶内外形成了压强差, 使光刻胶局部表面微凸起。当光刻胶的强度无法阻止内部氮气膨胀时, 则会产生类似的孔洞状缺陷, 导致掩膜保护作用失效。

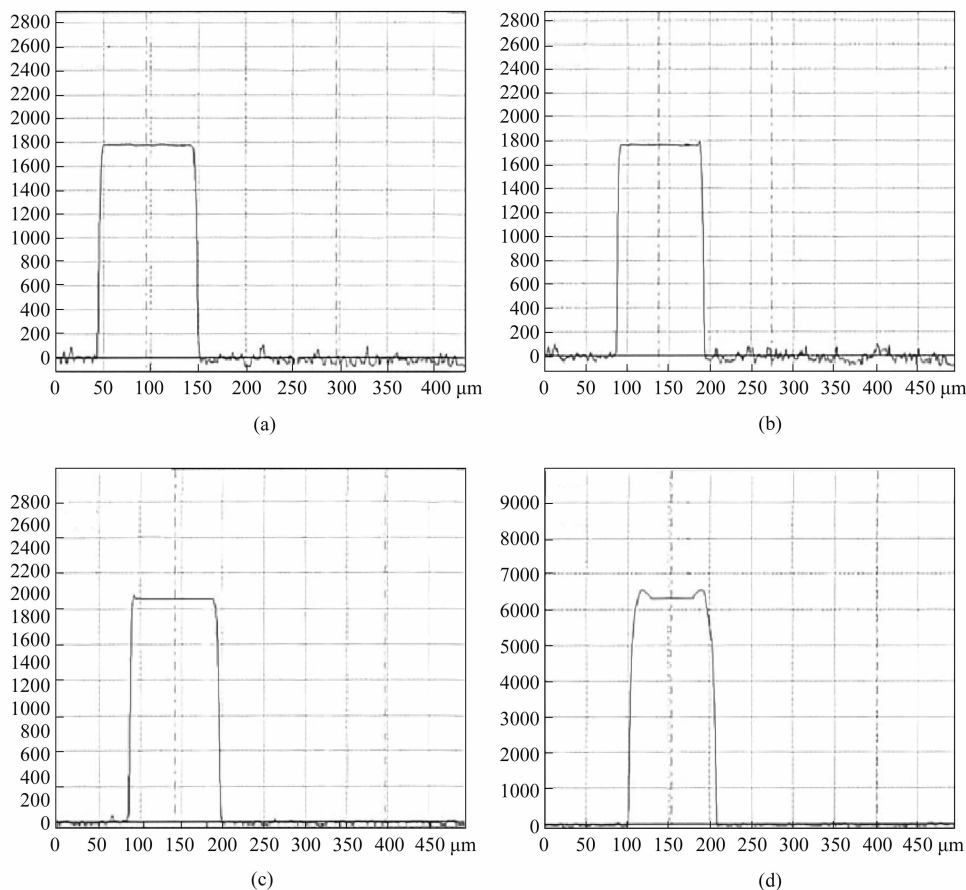


图 1 (a)厚度为 $1.4\ \mu\text{m}$ 的光刻胶掩膜样品(高温烘烤前); (b)厚度为 $1.4\ \mu\text{m}$ 的光刻胶掩膜样品(高温烘烤后); (c)厚度为 $6.2\ \mu\text{m}$ 的光刻胶掩膜样品(高温烘烤前); (d)厚度为 $6.2\ \mu\text{m}$ 的光刻胶掩膜样品(高温烘烤后)^[14]

随着刻蚀技术的发展,工艺精度不断提高。2016 年,艾骏等人^[18]针对光刻胶掩膜的光刻线条精度问题展开研究。他们分析了光刻时曝光时间长短(见图 3(a))、显影时显影液的浓度(见图 3(b))以及显影时显影的时间(见图 3(c))对光刻胶掩膜的光刻线条精度的影响,探究了各种不良形貌出现的原因,为今后光刻技术在复杂环境下的应用和发展打下了基础。

2018 年,Vigeneron P B 等人^[19]发现刻蚀 GaAs 时光刻胶掩膜出现了“微掩蔽”现象。光刻胶掩膜的四角出现坍塌和波纹,如图 4(a)所示。在刻蚀过程中会将这些波纹转移到下方的基片上,造成粗糙的侧壁,引起散射损伤。他们在 $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$ 刻蚀气体组合中加入极少量 N_2 后,微掩蔽现象消失,如图 4

(b)所示。

2018 年,杜立群等人^[20]针对较厚的光刻胶掩膜在曝光过程中胶膜内部曝光剂量分布不均匀使得光刻胶掩膜厚度过大的情况,尝试采用分次曝光显影法改善无法控制光刻图形精度的问题。通过对基准点预曝光的分次曝光显影法调整光刻胶掩膜的厚度,对光刻胶掩模的均匀性以及光刻胶掩模内部的曝光剂量进行调节(原理见图 5)。

分次曝光显影法的原理如下:首先去掉光刻胶顶部的掩膜,使光刻胶掩膜内部充分曝光;光刻胶掩膜顶部的线宽变小,底部掩膜的线宽变大,二者之间的差值变小。这种方法可以显著改善光刻图形的尺寸精度,对厚胶的曝光起到了优化的作用(见图 6)。

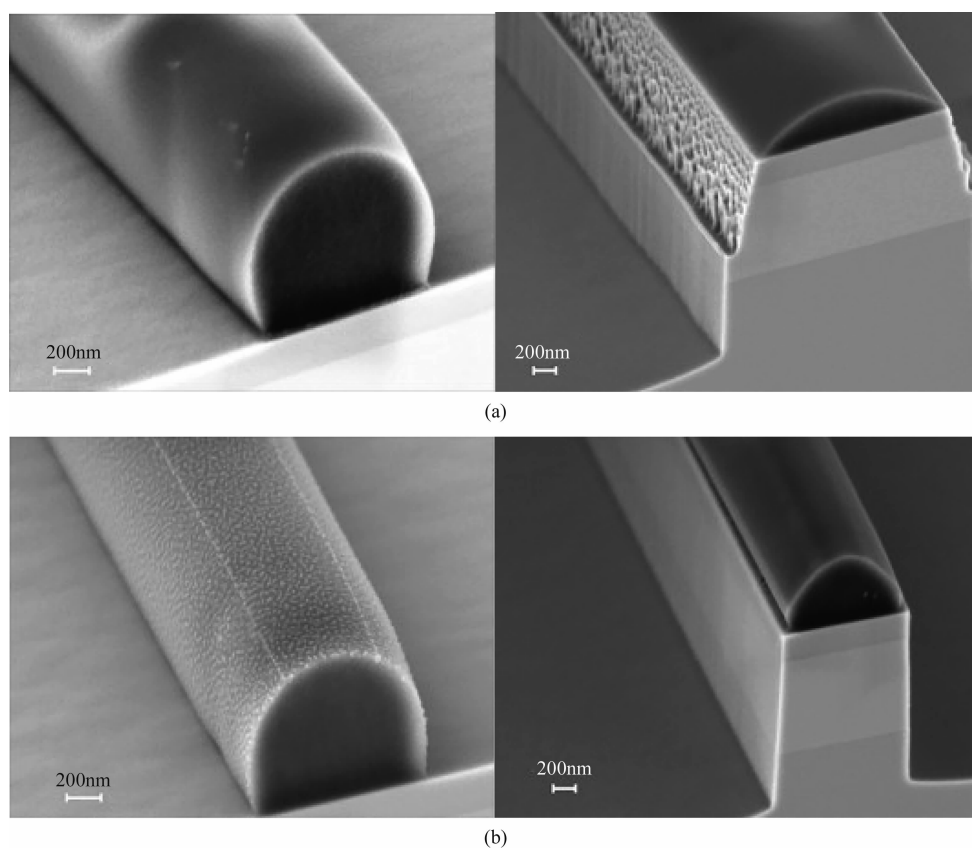


图 2 (a)采用传统回流法得到的 SEM 图像；(b)采用等离子体辅助回流法得到的 SEM 图像^[15]

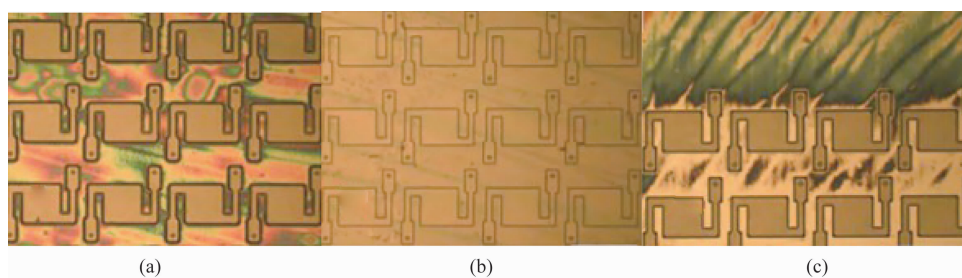


图 3 (a) 20 s 曝光时间下的光刻图形；(b)显影(0.5%显影液浓度)后的光刻图形；(c) 15 s 显影时间下的光刻图形^[18]

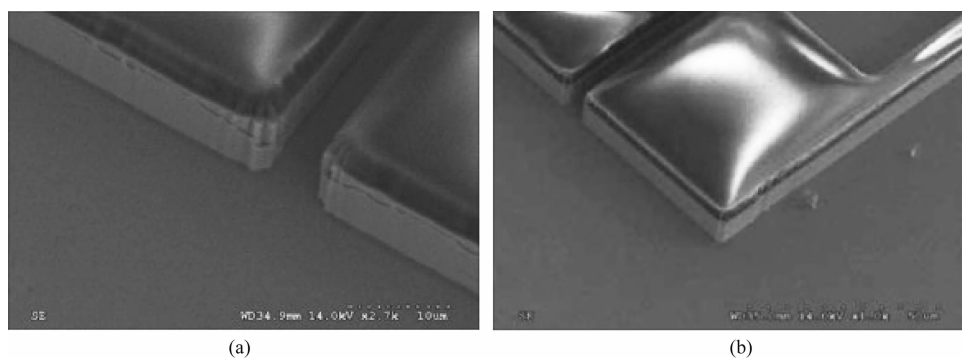
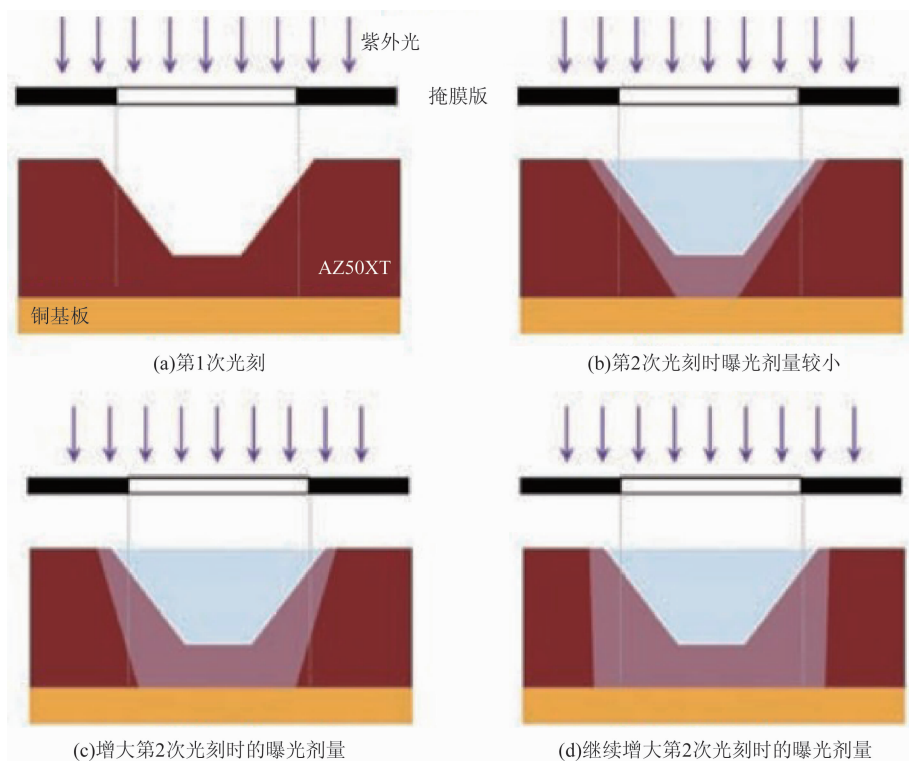
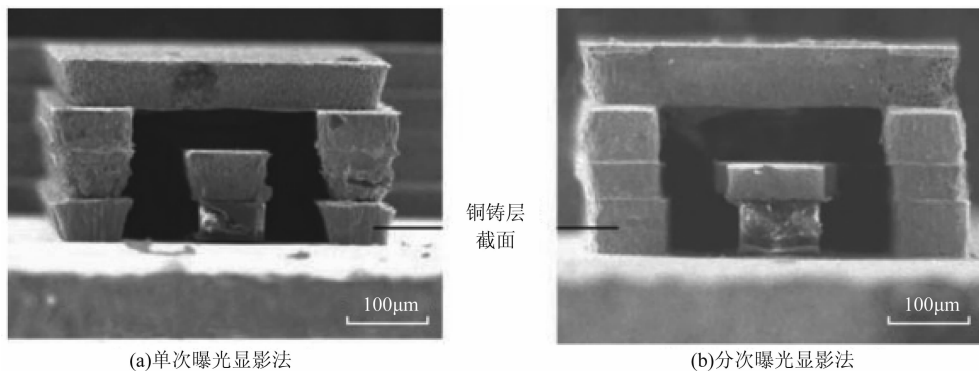


图 4 (a)光刻胶掩膜微掩蔽现象(深色部分边缘的波纹)；(b)在 $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$ 刻蚀气体组合中加入 N_2 后的掩膜 SEM 图像^[19]

图 5 分次曝光显影法的原理图^[20]图 6 射频同轴传输截面的 SEM 图^[20]

2 刻蚀 GaAs 的研究现状

在刻蚀 GaAs 方面, 2000 年 Lee J W 等人^[21]针对 GaAs 侧壁存在的钻刻现象, 引用 $\text{BCl}_3/\text{SF}_6/\text{N}_2/\text{He}$ 气体刻蚀 GaAs 结构, 并通过添加 N_2 来增强刻蚀过程中的侧壁钝化功能。结果表明, 刻蚀轮廓形貌得到了明显的改善, 增强了各向异性刻蚀(见图 7)。

2010 年, Volatier M 等人^[22]针对刻蚀 GaAs 侧壁出现的横向刻蚀现象, 在 $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{Ar}$ 中添加 N_2 以增加侧壁钝化保护。首先, 添加 N_2 后增加的钝化层可以减少过度的横向蚀

刻, 从而产生各向异性剖面。其次, 通过研究不同比例 N_2 相关数据可知, 加入 10%~13% 的 N_2 时能够获得接近理想的各向异性结构。一旦 N_2 比例超过 14%, GaAs 的底部就会变得很粗糙。此研究改善了刻蚀 GaAs 侧壁时出现横向钻蚀的情况, 如图 8 所示。

2010 年, Lee J W 等人^[23]针对 GaAs 在刻蚀后存在表面粗糙的问题, 研究了 BCl_3/N_2 和 BCl_3/Ar 两种组合的刻蚀机理。通过调节辅助气体 N_2 和 Ar 的比例来观察表面质量的好坏(见图 9)。研究发现, 添加过量的辅助气体会

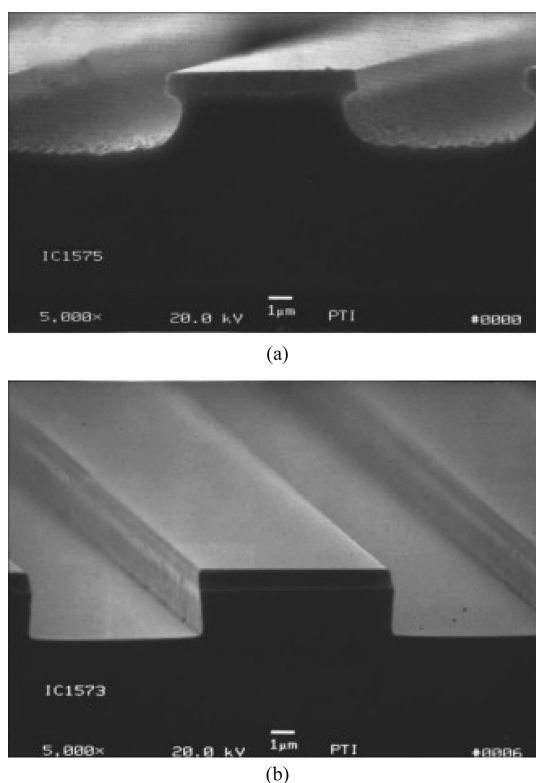


图 7 (a) GaAs 侧壁的钻刻现象; (b) 添加 N_2 钝化侧壁后的 GaAs 侧壁^[21]

降低等离子体刻蚀的速率和选择性, 从而对等离子体刻蚀产生负面影响, 最终出现表面粗糙的现象。

2015 年, Liu K 等人^[24] 针对用 Cl_2/Ar 刻蚀 GaAs 时表面粗糙的问题, 通过加入不同浓度的 O_2 来加以对比。他们分析了 $Cl_2/Ar/O_2$ 的刻蚀机理, 发现 O_2 的加入使 GaAs 的刻蚀速率减小, 但表面质量变高, 选择比变大, 改善了 GaAs 在 Cl_2/Ar 刻蚀下表面粗糙的问题 (见图 10)。

2019 年, Booker K 等人^[25] 针对刻蚀 GaAs 通孔时出现横向刻蚀的问题, 将 SiO_2 用作掩膜, 并通过在 Cl_2/Ar 组合中加入 $SiCl_4$ 来完成刻蚀。这将促进通孔侧壁上的硅基聚合物持续形成, 防止横向蚀刻再次破坏侧壁, 如图 11 所示。

2022 年, 杨晶晶等人^[26] 针对刻蚀以 SiO_2 为掩膜时 GaAs 外延片出现的长草现象 (见图 12(a)), 分析了刻蚀的机理, 找出了刻蚀的副

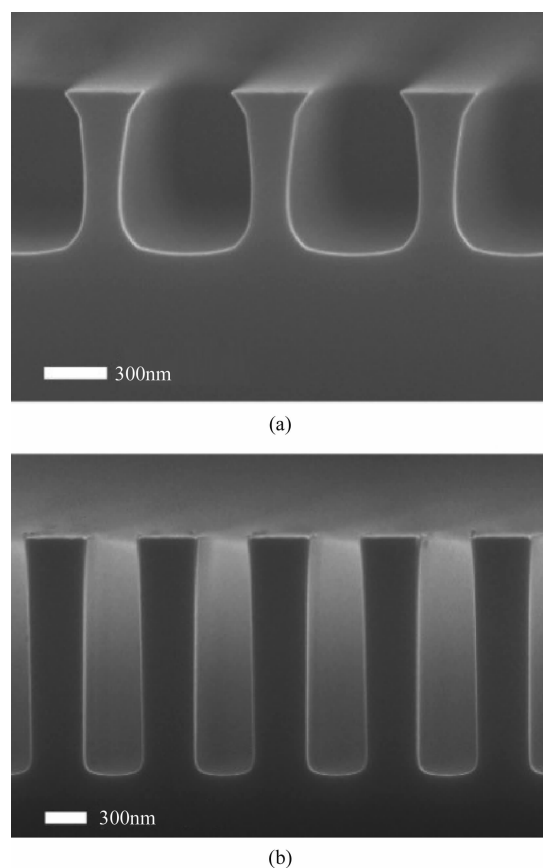


图 8 (a) 未加 N_2 时的刻蚀结果; (b) 加入 13% 的 N_2 时的刻蚀结果^[22]

产物。这些副产物会产生“微掩膜”效应, 从而影响刻蚀的结果。通过调整射频 (Radio Frequency, RF) 功率, 增大了等离子体副产物粘附在基片的概率, 减少了长草现象的发生, 如图 12(b) 所示。

3 刻蚀中改善 GaAs/AlGaAs 选择性刻蚀的研究现状

在 GaAs/AlGaAs 的刻蚀方面, 1995 年 Constantine C 等人^[27] 针对 GaAs 和 AlGaAs 刻蚀速率有明显差异的问题, 采用 1:10 的 BCl_3/Ar 气体组合, 发现 BCl_3 可以去除铝氧化物, 并在反应腔室内吸收水蒸气, 防止 AlGaAs 的再次氧化, 获得了更均匀的非选择性刻蚀。

2018 年, Vigneron P B 等人^[28] 针对 GaAs/AlAs 异质结刻蚀过程中出现的横向钻蚀问题 (见图 13), 在 $BCl_3/Cl_2/Ar$ 刻蚀气体组合中加入 N_2 诱导的钝化层, 可以防止横向钻

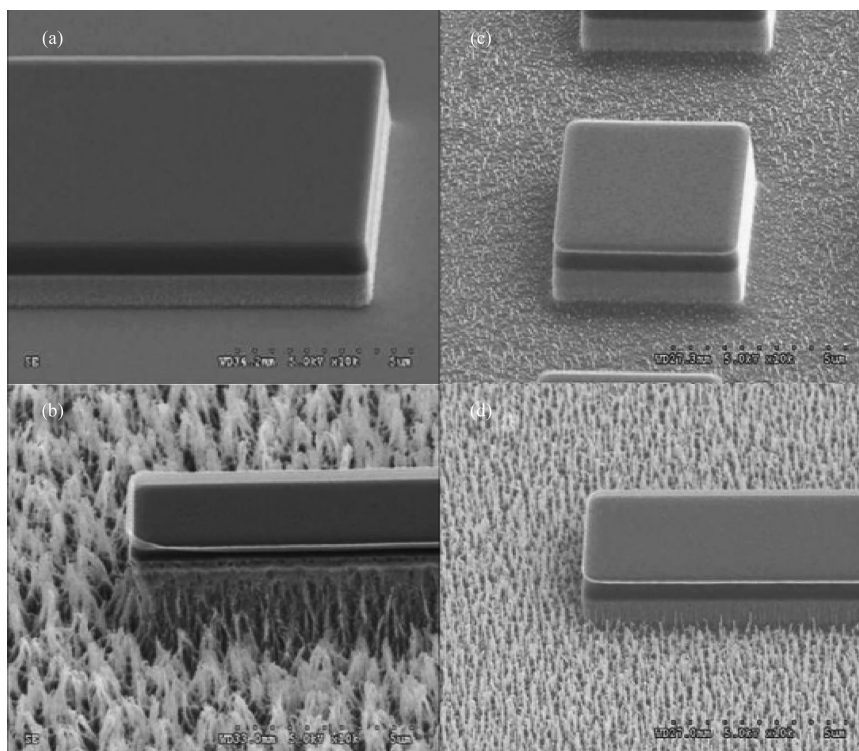


图 9 (a)在 16 sccm BCl_3 /4 sccm N_2 条件下蚀刻的 GaAs 表面非常光滑,蚀刻的侧壁垂直且无咬边现象;(b) 在 8 sccm BCl_3 /12 sccm N_2 条件下蚀刻的样品显示出较差的表面形态和侧壁以及明显的咬边现象;(c)在 16 sccm BCl_3 /4 sccm Ar 条件下蚀刻的 GaAs 表面形貌;(d)在 12 sccm BCl_3 /8 sccm Ar 条件下蚀刻的 GaAs 表面形貌(等离子体蚀刻使 GaAs 表面更粗糙) [23]

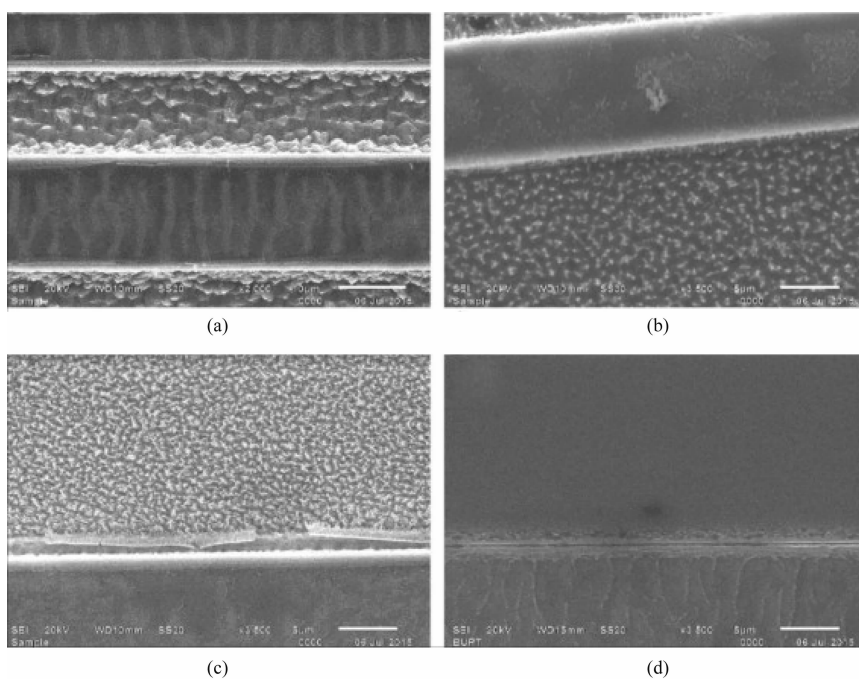


图 10 (a)在 $\text{Cl}_2:\text{Ar}=3:1$ 的条件下, GaAs 衬底和掩膜都很粗糙;(b)在 $\text{Cl}_2:\text{Ar}=2:1$ 的条件下, GaAs 衬底很粗糙;(c)加入少量 O_2 后改善了掩膜的粗糙度;(d)加入 13% 的 O_2 后,掩膜和 GaAs 衬底表面的粗糙度明显降低 [24]

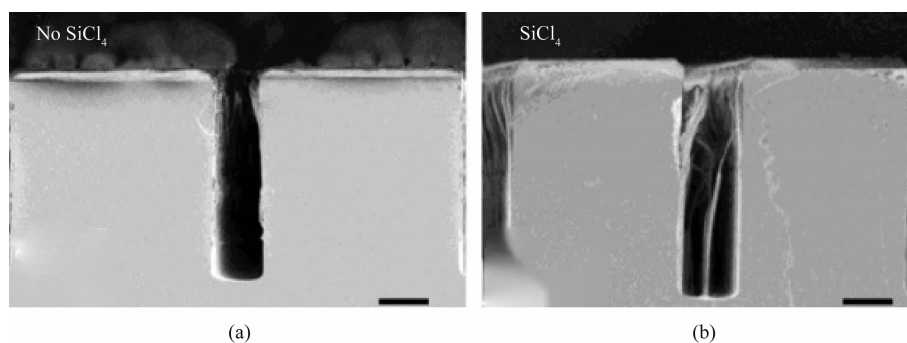


图 11 (a)刻蚀过程中无 SiCl_4 ; (b)刻蚀过程中加入 SiCl_4 (通孔里倾斜的透明物质)^[25]

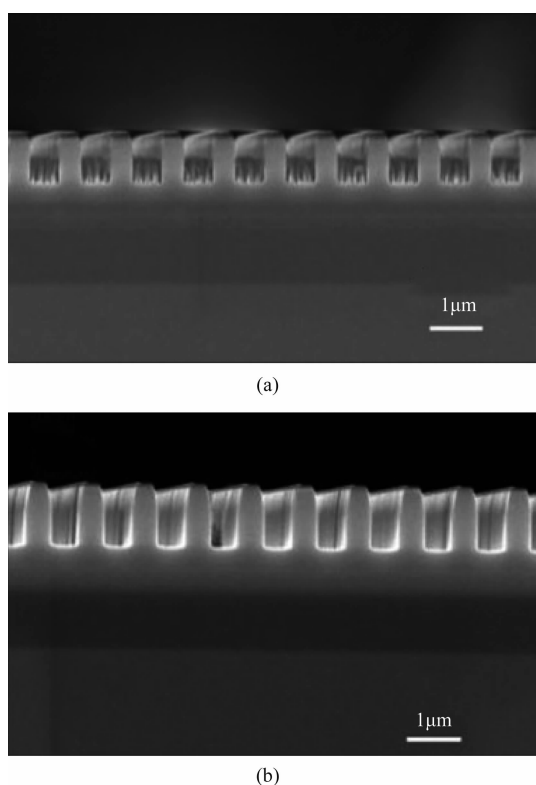


图 12 (a) GaAs 基外延片的长草现象; (b)增大 RF 功率后 GaAs 基外延片长草现象消失^[26]

刻, 从而产生光滑且几乎理想的垂直侧壁。针对金属掩膜和光刻胶掩膜的微掩膜效应, 通过加入 Ar 气带走这些反应副产物。为了解决损伤问题, 他们加入 N_2 作为辅助气体, 结果是微掩膜效应完全消失。等离子体中的 N_2 浓度提高了刻蚀剖面的平滑性。接着增加 BCl_3 气体以降低腐蚀速率, 同时增加压力以提高选择性, 得到了侧壁垂直且光滑的形貌。

2019 年, 王宇等人^[29]针对 GaAs/AlAs 侧壁的横向钻蚀问题和 VCSEL 基脚不平坦问题,

采用 SiO_2 硬掩膜并调整 ICP 源功率和 RF 功率两个参数, 在保证高刻蚀速率的条件下, 得到了侧壁角度为 $60^\circ \sim 70^\circ$ 且侧壁光滑的形貌。调节腔室内压强的大小, 减少了反应的副产物, 改善了台面的平坦度, 降低了基脚效应(见图 14)。

2020 年, 张秋波等人^[30]针对 ICP 刻蚀氧化限制型 VCSEL 时出现的选择性刻蚀(镂空)现象(见图 15), 用 SiO_2 掩膜刻蚀 VCSEL, 通过调整 RF 功率增强刻蚀中的物理效应; 通过调整 BCl_3 气体的流量组分, 使 VCSEL 的侧壁钝化效果增强; 采用 ICP 刻蚀时增强了 RF 功率, 使反应腔室内达到化学和物理效应的动态平衡; 增强的物理刻蚀轰击掉镂空的部分, 如图 16 所示。

4 结束语

本文对 VCSEL 干法刻蚀关键技术的进展和研究现状进行了综述(主要包括刻蚀时掩膜的质量、刻蚀 GaAs 后的表面质量、VCSEL 的表面和侧壁形貌)。目前, 国际上对 VCSEL 刻蚀技术进行了广泛而深入的研究, 在制备掩膜、增强 GaAs 的各向异性刻蚀以及实现多层分布式布拉格反射器(Distributed Bragg Reflection, DBR)的非选择性刻蚀方面取得了重要进展。但针对介质掩膜的优化和去残胶工艺、刻蚀气体与材料的作用机理及规律、刻蚀过程中出现的副产物问题等研究较少。随着各个领域对 VCSEL 的需求增大, 对 VCSEL 刻蚀技术的精度也会提出更高的要求。

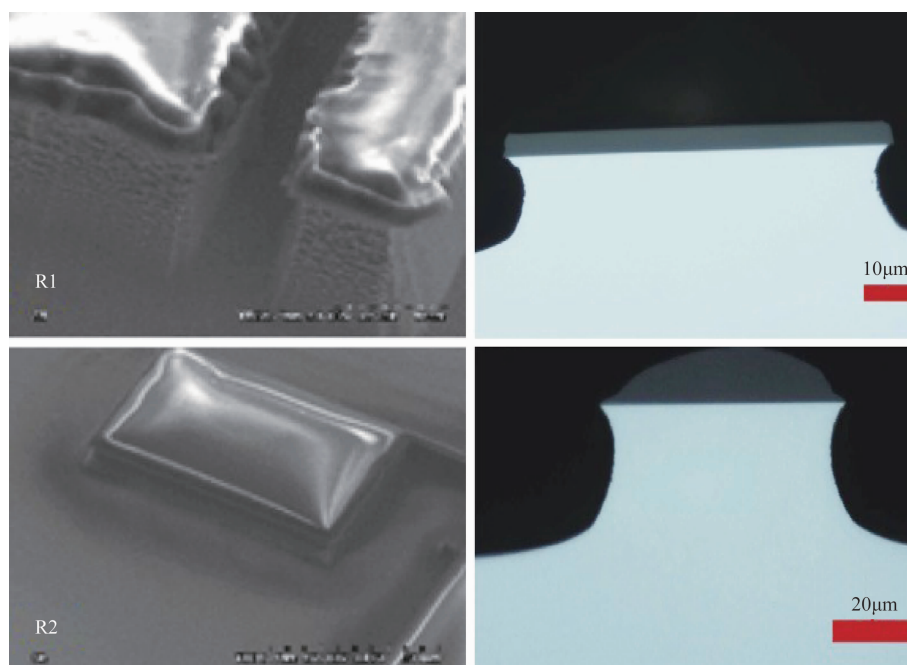
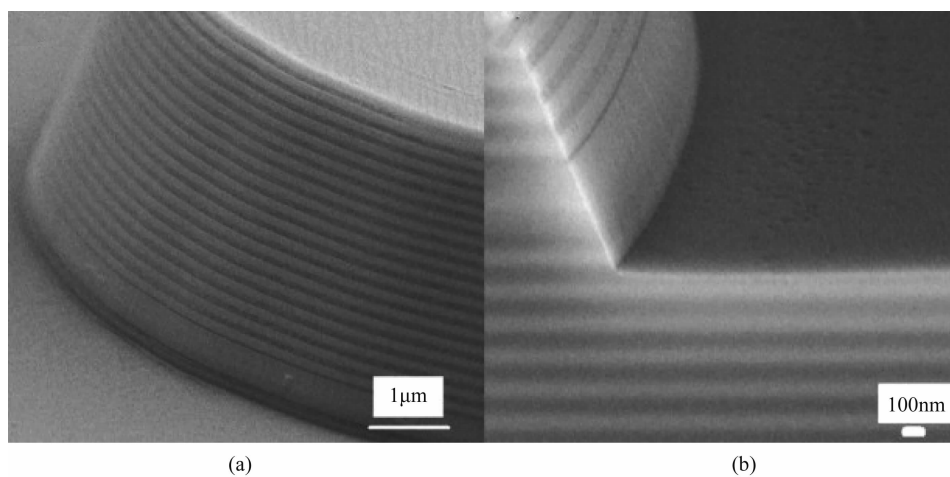
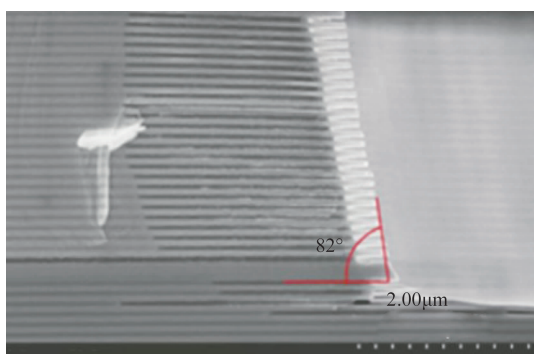
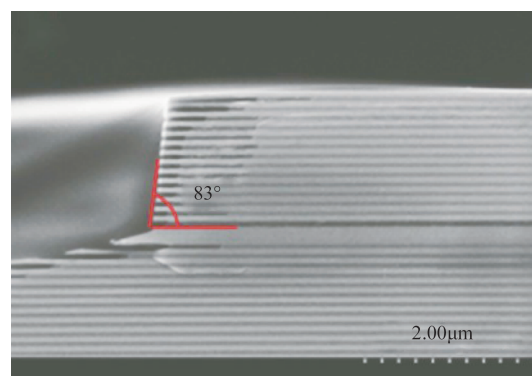
图 13 GaAs/AlAs 侧壁的 SEM 图像^[28]图 14 优化后的侧壁和基脚^[29]

图 15 GaAs/AlGaAs 镂空现象(浅色部分与深色部分)

图 16 消除了镂空现象的 GaAs/AlGaAs 侧壁 SEM 图像^[30]

参考文献

- [1] Goldschmidt V M. Crystal Structure and Chemical Constitution [J]. *Transactions of The Faraday Society*, 1929, **25**(1): 253–283.
- [2] Whelan J M, Wheatley G H. The Preparation and Properties of Galliumarsenide Single Crystals [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1958, **6**(2–3): 169–172.
- [3] Esaki L. New Phenomenon in Narrow Germanium p-n Junctions [J]. *Physical Review*, 1958, **109**(2): 21–29.
- [4] Knight J R, Effer D, Evans P R. The Preparation of High Purity Gallium Arsenide by Vapour Phase Epitaxial Growth [J]. *Solid-State Electronics*, 1965, **8**(2): 178–180.
- [5] Nelson H. Epitaxial Growth from the Liquid State and its Application to the Fabrication of Tunnel and Laser Diodes [J]. *RCA Review*, 1963, **24**(4): 603–615.
- [6] Kuru I, Robson P N, Kino G S. Some Measurements of the Steady-state and Transient Characteristics of High-field Dipole Domains in GaAs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1968, **15**(1): 21–29.
- [7] Hirasawa M, Ichikawa N, Egashira Y, et al. Synthesis of GaAs Nanoparticles by Digital Radio Frequency Sputtering [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, **67**(23): 3483–3485.
- [8] Nayak J, Sahu S N. Orthorhombic-phase GaAs Nanoparticles Prepared by an Electrochemical Technique [J]. *Applied Surface Science*, 2004, **229**(1–4): 97–104.
- [9] Ganeev R A, Rysanyanskiy A I, Usmanov T. Optical and Nonlinear Optical Characteristics of the Ge and GaAs Nanoparticle Suspensions Prepared by Laser Ablation [J]. *Optics Communications*, 2007, **272**(1): 242–246.
- [10] Javan M B. First Principles Study of the Electronic and Optical Properties of GaAs Nanoparticles under the Influence of External Uniform Electric Field [J]. *Physics Letters A*, 2012, **376**(45): 321–327.
- [11] Malik M A, Afzaal M, O'Brien P, et al. Single Molecular Precursor for Synthesis of GaAs Nanoparticles [J]. *Metal Science Journal*, 2013, **20**(8): 959–963.
- [12] 陈磊, 张靖, 毛谦. ICP 干法刻蚀技术在 III-V 族化合物中的应用 [C]. 武汉: 湖北省通信学会 2006 年学术年会, 2006.
- [13] 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.
- [14] 孙丽媛, 高志远, 张露, 等. GaAs 材料 ICP 刻蚀中光刻胶厚度及刻蚀条件对侧壁倾斜度的影响 [J]. *功能材料与器件学报*, 2012, **18**(4): 283–290.
- [15] Porkolab G A, Apiratikul P, WANG B. Low Propagation Loss AlGaAs Waveguides Fabricated with Plasma-assisted Photoresist Reflow [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2014, **22**(7): 33–77.
- [16] 焦庆斌. 小顶角平台硅中阶梯光栅光刻胶掩模制备工艺研究 [J]. *长春工业大学学报*, 2015, **36**(3): 288–292.
- [17] 乔辉, 刘诗嘉, 刘向阳, 等. 感应耦合等离子体干法刻蚀中光刻胶掩模的异常性 [J]. *半导体光电*, 2016, **37**(1): 59–62.
- [18] 艾骏, 曾晓雁, 刘建国. 一种耐高温紫外正型光刻胶及光刻工艺 [J]. *科学通报*, 2016, **61**(6): 610–617.
- [19] Vigneron P B, Joint F, Isac N, et al. Advanced and reliable GaAs/AlGaAs ICP-DRIE etching for optoelectronic, microelectronic and microsystem applications [J]. *Microelectronic Engineering*, 2018, **202**: 42–50.
- [20] 杜立群, 李爱琪, 齐磊杰, 等. 高精度 AZ 厚胶光刻及在微型射频同轴器制作中的应用 [J]. *航空制造技术*, 2018, **61**(9): 26–31.
- [21] Lee J W, Dever M W, Reelfs B H. Advanced Selective Dry Etching of GaAs/AlGaAs in High Density Inductively Coupled Plasmas [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2000, **18**(4): 1220–1224.
- [22] Volatier M, Duchesne D, Morandotti R, et al.

- Extremely High Aspect ratio GaAs and GaAs/Al-GaAs Nanowaveguides Fabricated Using Chlorine ICP Etching with N_2 -promoted Passivation [J]. *Nanotechnology*, 2010, **21**(13): 13–14.
- [23] Lee J W, NOH H S, LEES H. Dry Etching Process of GaAs in Capacitively Coupled BCl_3 -based Plasmas [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2010, **518**(22): 6488–6491.
- [24] Liu K, Ren X M, Huang Y Q, et al. Inductively Coupled Plasma Etching of GaAs in Cl_2/Ar , $Cl_2/Ar/O_2$ Chemistries with Photoresist Mask [J]. *Applied Surface Science*, 2015, **356**(2): 776–779.
- [25] Booker K, Mayon Y O, Jones C, et al. Deep, Vertical Etching for GaAs Using Inductively Coupled Plasma/reactive Ion Etching [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2020, **38**(1): 12–26.
- [26] 杨晶晶, 范杰, 马晓辉, 等. 基于多层抗蚀剂的 GaAs 基微纳光栅深刻蚀工艺 [J]. *中国激光*, 2022, **49**(3): 169–176.
- [27] Constantine C. Etching of GaAs/AlGaAs Rib Waveguide Structures Using $BCl_3/Cl_2/N_2/Ar$ Electron Cyclotron Resonance [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1995, **13**(5): 20–25.
- [28] Vigneron P B. Advanced and Reliable GaAs/AlGaAs ICP-DRIE Etching for Optoelectronic, Microelectronic and Microsystem Applications [J]. *Microelectronic Engineering*, 2018, **356**(2): 776–779.
- [29] 王宇. GaAs 基 VCSEL 器件的 ICP 刻蚀工艺研究 [D]. 长春: 长春大学, 2020.
- [30] 张秋波, 冯源, 李辉, 等. 垂直腔面发射激光器中 GaAs/AlGaAs 的选择性刻蚀技术研究 [J]. *中国激光*, 2020, **47**(4): 29–34.