

文章编号: 1000-7032(2021)06-0889-07

GaN 基光栅的干法刻蚀工艺

郭孝浩^{1,2}, 胡磊², 任霄钰², 吴思², 张立群², 张志军¹, 杨辉², 刘建平^{2*}

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444;

2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123)

摘要: 研究了基于 BCl_3/Cl_2 电感耦合等离子体(ICP)刻蚀对氮化镓基分布式反馈激光器中光栅的刻蚀,详细研究了刻蚀气体 BCl_3/Cl_2 流量比和压强对刻蚀台面侧壁的粗糙度、陡直度以及刻蚀速率的影响,发现以 SiO_2 作为硬掩膜,刻蚀速率、台面侧壁粗糙度以及陡直度随着刻蚀气体 BCl_3/Cl_2 流量比以及压强变化有着显著变化。保持 ICP 功率和射频功率分别为 300 W 和 100 W,当刻蚀气体 BCl_3/Cl_2 流量比为 1、压强为 1.33 Pa(10 mTorr),最终得到 200.6 nm/min 的可控制刻蚀速率、倾角 85.3°且光滑的台面侧壁,实现了在保证光栅侧壁光滑的同时提升侧壁倾角。陡直且光滑的光栅对于提升氮化镓基分布式反馈激光器的器件性能及其稳定性非常重要。

关键词: 氮化镓; 分布式反馈; 光栅; 电感耦合等离子体刻蚀; BCl_3/Cl_2

中图分类号: TN256 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20210037

Fabrication of GaN-based Grating by Optimized Inductively Coupled Plasma Etching

GUO Xiao-hao^{1,2}, HU Lei², REN Xiao-yu², WU Si², ZHANG Li-qun²,
ZHANG Zhi-jun¹, YANG Hui², LIU Jian-ping^{2*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics,

Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China)

* Corresponding Author, E-mail: jpli2010@sinano.ac.cn

Abstract: Inductively coupled plasma(ICP) etching parameters for GaN grating fabrication are investigated. The effects of etch parameters, including the etching gas BCl_3/Cl_2 flow ratio and pressure, on the roughness and steepness of the mesa sidewall and etching rate are discussed. It is found that by using SiO_2 as the hard mask, the roughness and steepness of the etching mesa sidewall was greatly influenced by the etching parameters. A controllable etching rate of 200.6 nm/min, angle of 85.3° and smooth mesa sidewall are obtained using BCl_3/Cl_2 ratio of 1:1, 1.33 Pa(10 mTorr) pressure, ICP power of 300 W and RF power of 100 W. Finally, the angle of the sidewall is increased while ensuring the smooth sidewall of the grating. Steep and smooth gratings are very important for improving the device performance and stability of GaN-based distributed feedback laser diode.

Key words: gallium nitride; distributed feedback; grating; inductively coupled plasma etching; BCl_3/Cl_2

收稿日期: 2021-01-23; 修订日期: 2021-02-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0131500,2017YFB0405000); 国家自然科学基金(61834008,61574160,61804164,61704184); 中国博士后科学基金(2018M630619); 江苏省自然科学基金(BK20180254)资助项目

Supported by National Key Research and Development Program of China(2017YFE0131500,2017YFB0405000); National Natural Science Foundation of China(61834008,61574160,61804164,61704184); China Postdoctoral Science Foundation(2018M630619); Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20180254)

1 引 言

氮化镓(Gallium nitride, GaN)基材料及其多元素合金将半导体光电子器件的发光波长扩展到可见光和紫外波段,其中激光器(Laser diode, LD)具有高纯度和高亮度特性,广泛应用于照明、显示、通信和存储等领域。GaN基激光器在可见光和海底通信及量子技术领域具有巨大的应用前景,这些应用需要窄线宽激光,因此 GaN 基分布式反馈(Distributed feedback, DFB)激光器近年来受到了极大的关注^[1-5]。GaN基DFB激光器相对于传统激光器的研制难度更大,因为光栅作为DFB的重要结构,它的陡直度、侧壁粗糙度、均匀性以及刻蚀深度直接影响 GaN 基DFB激光器单纵模特性,因此得到一个陡直、侧壁光滑、均匀且刻蚀深度可控的光栅非常重要。

光栅的特征尺寸较小,其刻蚀深度、形状尺寸、均匀性以及陡直度是很难控制的。GaN材料具有较强的化学稳定性^[6],因此湿法刻蚀并不是制作光栅的最佳方案。干法刻蚀具有相对可控的刻蚀速率以及相对高的各向异性而被广泛应用在 GaN 基器件制作工艺中,其中包括反应离子刻蚀(Reactive ion etching, RIE)^[7]、离子束刻蚀(Ion beam etching, IBE)^[8-9]和电感耦合等离子体(Inductively coupled plasma, ICP)刻蚀^[10-12]。RIE刻蚀速率低,工作压强高,离子污染大;IBE刻蚀选择比差,物理损伤大。相比于RIE和IBE刻蚀,ICP刻蚀具有相对高的刻蚀速率、选择比、各向异性以及更小的刻蚀损伤^[13],更适用于 GaN 基DFB激光器中光栅的刻蚀。在ICP刻蚀 GaN 的工艺中,气体的选择很重要,目前使用比较广泛的组合为 Cl_2/BCl_3 ^[14]、 Cl_2/Ar ^[15]、 Cl_2/H_2 ^[16]、 $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ ^[17]。相比于其他气体, BCl_3 能有效地调节等离子体中活性氯的浓度、控制刻蚀速率,还可通过形成惰性气体 BCl_xO_y 被真空泵抽走,有效去除腔室内的残余氧气,以防止形成自掩膜^[18],且气体组成成分相对简单,因此本研究采用 BCl_3/Cl_2 混合气体作为刻蚀气体。刻蚀 GaN 的原理是通过氯自由基与 GaN 表面反应生成具有挥发性的氯化镓化合物,刻蚀产物挥发并由真空泵抽走^[12]。除刻蚀气体外,ICP功率、射频(Radio frequency, RF)功率以及压强对 GaN 刻蚀结果都有较大影响。目前,国内外已经报道了不同参数对

刻蚀速率和表面粗糙度的影响^[11, 19-20],对于台面侧壁粗糙度和陡直度的研究很少。Rawal^[18]和Tahhan^[21]等刻蚀台面侧壁倾角分别为 80° 和 82° ,但是对侧壁的粗糙度并没有讨论。

本文使用 BCl_3/Cl_2 基 ICP 刻蚀, SiO_2 作为硬掩膜,研究了气体流量比以及压强对 GaN 台面侧壁的粗糙度、陡直度以及刻蚀速率的影响,通过调节刻蚀参数,在保证侧壁光滑的同时,提升侧壁的陡直度,最终得到了一个陡直、光滑且刻蚀深度可控的光栅。光滑且陡直的光栅对于提升氮化镓基分布式反馈激光器的器件性能及其稳定性非常重要。

2 实 验

本研究中使用的 GaN 样品是通过金属有机化学气相沉积(Metalorganic chemical vapor deposition, MOCVD)在 *c* 面 GaN 自支撑衬底上生长的外延结构,包括硅(Si)掺杂的 *n*-AlGaIn 下限制层、Si 掺杂的 *n*-InGaIn 波导层、两个周期的 InGaIn/GaN 多量子阱(Multiple quantum well, MQW)、非故意掺杂的 InGaIn 波导层、镁(Mg)掺杂的 *p*-AlGaIn 电子阻挡层、Mg 掺杂的 *p*-AlGaIn/GaN 超晶格上限制层和重掺杂的 *p*-InGaIn 接触层,如图 1 所示。



图 1 GaN 外延片结构示意图

Fig. 1 Schematic of the GaN epitaxial wafer structure

实验首先通过刻蚀脊形来确定刻蚀参数,确认刻蚀参数后再进行光栅刻蚀。丙酮/乙醇超声清洗样品表面后,采用电感耦合等离子体化学气相沉积(Inductively coupled plasma chemical vapor deposition, ICPCVD)方法沉积 100 nm 厚的 SiO_2 作为硬掩膜,如图 2(a)所示;样品表面旋涂一层 AZ5214 光刻胶, MA6 紫外接触式光刻机曝光出

脊形图形,如图2(b)所示;然后使用RIE刻蚀将光刻胶图形转移到 SiO_2 上,如图2(c)所示;最后采用牛津仪器ICP-180刻蚀机在不同压强和不同气体比例条件下刻蚀GaN,如图2(d)所示。刻蚀完成后,氢氟酸去除硬掩膜 SiO_2 ,扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM) Quanta 400 FEG 观察脊形(或光栅)侧壁粗糙度以及倾角,台阶仪Dektak150测量刻蚀深度。

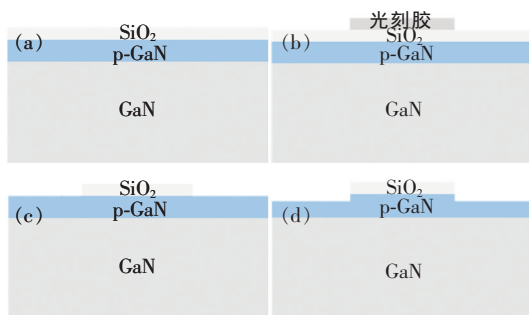


图2 ICP刻蚀实验工艺流程图

Fig. 2 Flow charts of ICP etching

3 结果与讨论

通过两组实验分别研究了不同刻蚀气体 BCl_3/Cl_2 比例和压强对刻蚀速率、刻蚀的各向异性以及侧壁粗糙度的影响。实验的ICP功率不超过500 W,压强不低于0.798 Pa(6 mTorr),以防刻蚀过程中设备间接性中断,使实验参数偏差过大。

3.1 BCl_3 占比对刻蚀的影响

BCl_3/Cl_2 基ICP刻蚀GaN过程中, Cl_2 通过化学反应起到刻蚀效果, Cl_2 的占比决定刻蚀速率的快慢, BCl_3 通过调节活性氯浓度,可有效调节刻蚀速率。 BCl_3 电离后形成 BCl_2^+ 和 BCl_3^+ 重离子,该离子不与GaN发生化学反应,通过物理溅射降低刻蚀表面粗糙度,且重离子可有效地去除残留物的附着,并提高刻蚀的各向异性^[13,18]。通过实验得到最佳的 BCl_3/Cl_2 气体比例,有利于得到陡直且光滑的台面侧壁以及可控的刻蚀速率。

GaN刻蚀速率以及直流偏压与 BCl_3 在混合气体中占比的关系如图3所示(ICP功率300 W,RF功率100 W,压强1.33 Pa(10 mTorr), BCl_3/Cl_2 总流量为35 mL/min)。 BCl_3 占比为0%时,刻蚀速率最快,而当 BCl_3 占比为100%(Cl_2 为0%)时,刻蚀速率从245.6 nm/min降到74.2

nm/min。随着混合气体 BCl_3 占比的增加,电离出的Cl离子浓度降低,刻蚀速率逐渐下降。直流偏压是等离子体和样品产生的电势差,它为反应离子提供加速能量^[22],先随 BCl_3 占比增加而略微上升,当占比为50%时,直流偏压达到最大值,然后随着 BCl_3 占比继续增加而略微下降。当 BCl_3 占比小于50%时, Cl_2 作为主要刻蚀气体,化学刻蚀占主导地位,且直流偏压略微上升,所以刻蚀速率随着 BCl_3 占比增加而缓慢下降;而当 BCl_3 占比高于50%后,导致物理刻蚀逐渐占据主导地位,且直流偏压略微下降,所以刻蚀速率随着 BCl_3 占比增加而迅速下降。

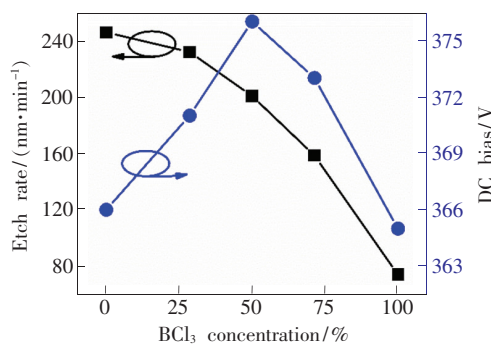


图3 GaN的刻蚀速率和直流偏压与 BCl_3 占比的关系
Fig. 3 GaN etch rate and DC bias variation with BCl_3 concentration

不同 BCl_3/Cl_2 混合气体占比对GaN的刻蚀结果如表1所示,SEM测试结果如图4所示。当 BCl_3 占比小于50%时,可以看到边缘和侧壁损伤严重,而且侵蚀明显,较为粗糙。如图4(a)、(b)所示,说明 Cl_2 组分通过化学反应控制了刻蚀过程,且Cl离子散射能量较大,导致边缘及侧壁损伤严重。当完全没有 BCl_3 的物理刻蚀时,清除刻蚀残留物较为困难,使得刻蚀残留物附着在侧壁底端,如图4(a)所示。随着 BCl_3 占比逐渐增加,边缘和侧壁损伤明显减小,表面较为光滑,如图4(c)、(d)、(e)所示,说明边缘和侧壁Cl离子散射变小。当 BCl_3 占比大于50%时, BCl_3 成为主导刻蚀气体,物理刻蚀增强,使台面侧壁变得粗糙,但粗糙程度小于 Cl_2 作为主导刻蚀气体的情况。当 BCl_3 占比为50%时,边缘和侧壁的损伤最小,表面最光滑。

另外,我们采用侧壁倾角来表示ICP刻蚀GaN的各向异性特性。由图4(f)~(j)可以看出,当 BCl_3 占比小于50%时,随着 BCl_3 占比的增

加,侧壁角度也随之增加; BCl_3 占比为 50% 时,侧壁角度达到最大 85.3° ; BCl_3 占比大于 50% 时,侧壁角度随之降低,具体表现如表 1 所示。在纯 Cl_2 的条件下,刻蚀速率较快,但由于纯 Cl_2 条件下的物理作用很小,因此台面刻蚀的各向异性较差。当刻蚀气体为纯 BCl_3 时,化学刻蚀作用较小,刻蚀速率很慢,台面倾斜的侧壁无法得到有效的刻蚀,刻蚀的各向异性比纯 Cl_2 条件下的更差。因此,合适的 BCl_3/Cl_2 混合气体比例才能使物理刻蚀和化学刻蚀达到一种平衡,刻蚀结果有更好的各向异性,使得台面侧壁更加陡直且光滑。

表 1 GaN 刻蚀速率、侧壁倾角和侧壁表面随混合气体中 BCl_3 占比变化的结果

Tab. 1 GaN etch rate, surface and angle of sidewall variation with BCl_3 concentration in BCl_3/Cl_2 mixture

编号	BCl_3 占比/%	刻蚀速率/ ($\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$)	侧壁 倾角/ $(^\circ)$	台面 侧壁
1	0.0	245.6	78.2	残渣,损伤
2	28.6	231.7	83.1	粗糙,损伤
3	50.0	200.6	85.3	光滑,平整
4	71.4	158.4	80.1	粗糙
5	100.0	74.2	72.4	轻微损伤

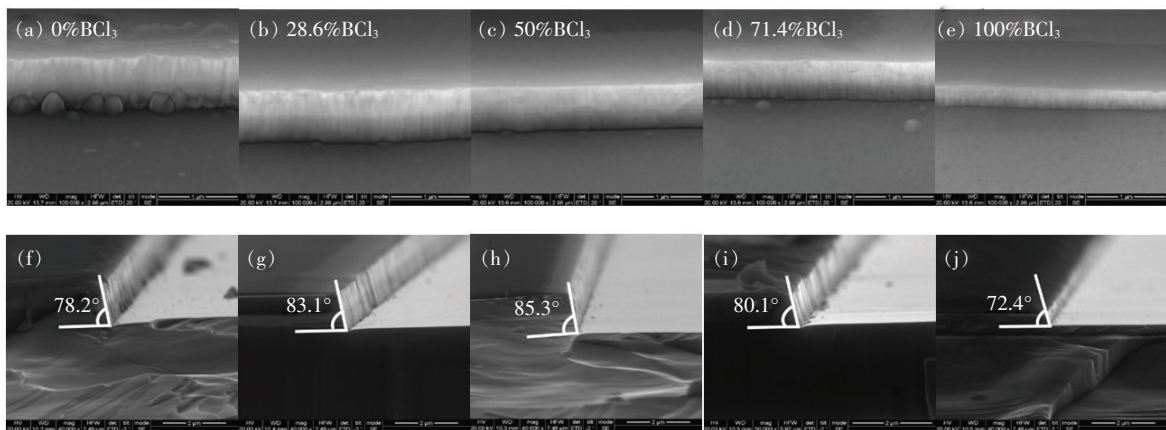


图 4 BCl_3 占比为 0% (a)、28.6% (b)、50% (c)、71.4% (d)、100% (e) 条件下侧壁粗糙度以及 BCl_3 占比为 0% (f)、28.6% (g)、50% (h)、71.4% (i)、100% (j) 条件下侧壁倾角 SEM 图像。

Fig. 4 SEM image of the mesa sidewalls roughness at BCl_3 concentration 0% (a), 28.6% (b), 50% (c), 71.4% (d), 100% (e) and sidewalls angle at BCl_3 concentration 0% (f), 28.6% (g), 50% (h), 71.4% (i), 100% (j).

3.2 压强对刻蚀的影响

在 ICP 刻蚀 GaN 过程中,压强对于刻蚀速率、各向异性和侧壁粗糙度也起到关键性作用。压强越大,自由基 Cl 离子的平均自由程越小,离子碰撞频率增加,离子散射加剧,不利于刻蚀^[12,15]。

GaN 的刻蚀速率以及直流偏压与压强的关系如图 5 所示(ICP 功率 300 W, RF 功率 100 W, BCl_3 占比 50%, BCl_3/Cl_2 总流量为 35 mL/min), 压强从 0.798 Pa (6 mTorr) 到 2.66 Pa (20 mTorr) 变化。当压强为 0.798 Pa (6 mTorr) 时,刻蚀速率为 280.1 nm/min, 随着压强不断增大,刻蚀速率逐渐下降;当压强为 2.66 Pa (20 mTorr) 时,刻蚀速率降到 85.2 nm/min。刻蚀速率降低主要是因为离子碰撞频率增加,离子散射加剧,导致等离子体无法有效刻蚀 GaN 。同时,压强升高不利于反应产物挥发,刻蚀速率下降。

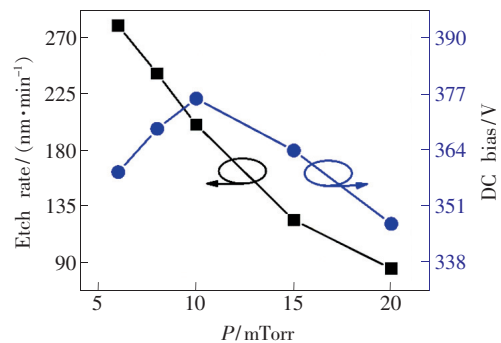


图 5 GaN 的刻蚀速率和直流偏压与压强的关系

Fig. 5 GaN etch rate and DC bias variation with chamber pressure

不同压强条件对 GaN 的刻蚀结果如表 2 所示, SEM 测试结果如图 6 所示。在压强为 0.798 Pa (6 mTorr) 时,刻蚀速率较快,但侧壁损伤严重,且比较粗糙,如图 6 (a) 所示。主要是因为压强

低, 粒子平均自由程长, 离子能量较高, 物理和化学刻蚀效果都比较明显, 从而导致图形边缘的掩膜损伤严重, 导致边缘处刻蚀不均匀。且离子散射能量较大, 侵蚀侧壁, 导致台面侧壁粗糙。随着压强升高, 离子能量降低, 物理和化学刻蚀达到一种平衡, 台面侧壁以及掩膜边缘变得光滑平整, 如图 6 (b) 所示。但当压强继续增大到 1.995 ~ 2.66 Pa (15 ~ 20 mTorr) 时, 侧壁粗糙度明显增加, 可能是因为在较高压强条件下, 离子碰撞加剧, 散射到台面侧壁。

表 2 GaN 刻蚀速率、侧壁倾角和侧壁表面随压强变化的结果

Tab. 2 GaN etch rate, surface and angle of sidewall variation with chamber pressure

编号	压强/Pa (mTorr)	刻蚀速率/ (nm · min ⁻¹)	侧壁 倾角/(°)	台面 侧壁
1	0.798(6)	280.1	73.4	损伤、侵蚀
2	1.33(10)	200.6	85.3	光滑、平整
3	1.995(15)	124.2	86.1	粗糙、残渣
4	2.66(20)	85.2	89.8	轻微损伤、残渣

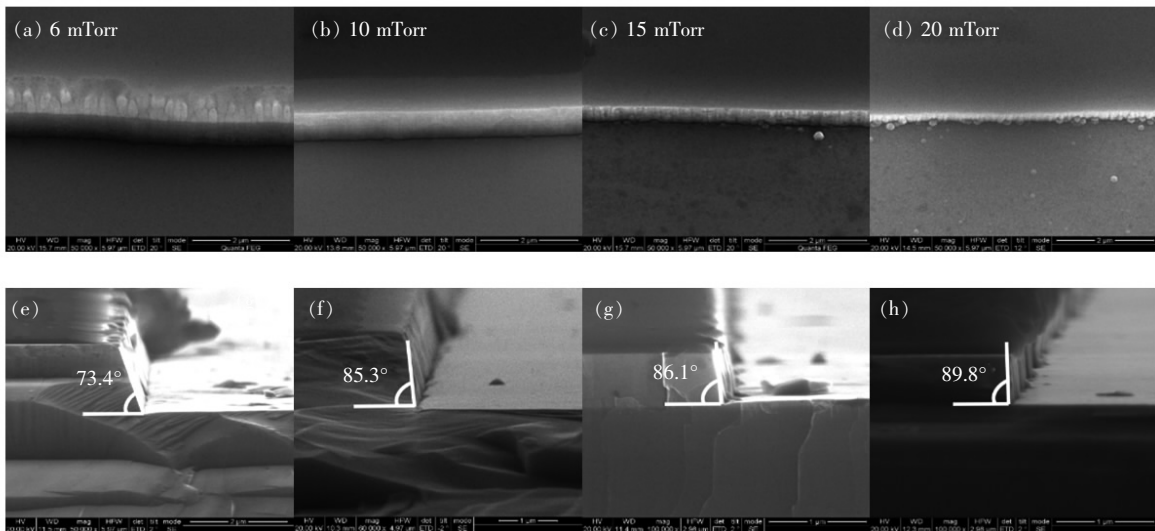


图 6 压强为 0.798 Pa(6 mTorr) (a)、1.33 Pa(10 mTorr) (b)、1.995 Pa(15 mTorr) (c)、2.66 Pa(20 mTorr) (d) 条件下侧壁粗糙度以及压强为 0.798 Pa(6 mTorr) (e)、1.33 Pa(10 mTorr) (f)、1.995 Pa(15 mTorr) (g)、2.66 Pa(20 mTorr) (h) 条件下侧壁倾角 SEM 图像。

Fig. 6 SEM image of the mesa sidewalls roughness at chamber pressure 0.798 Pa(6 mTorr) (a), 1.33 Pa(10 mTorr) (b), 1.995 Pa(15 mTorr) (c), 2.66 Pa(20 mTorr) (d) and sidewalls angle at chamber pressure 0.798 Pa(6 mTorr) (e), 1.33 Pa(10 mTorr) (f), 1.995 Pa(15 mTorr) (g), 2.66 Pa(20 mTorr) (h).

从图 6(e) ~ (h) 可以看出, 随着压强增大, 侧壁倾角从 73.4° 增加到 89.8°, 说明随着压强增大, 粒子密度增加, 离子碰撞加剧, 离子散射较强, 且尾气无法及时抽出腔室, 导致各向同性刻蚀增

强, 选择比提高, 使侧壁陡直度增加且变得粗糙。但压强大于 1.995 Pa(15 mTorr) 时, 刻蚀表面变得粗糙, 可能是压强较高条件下, 离子碰撞剧烈, 刻蚀均匀性变差, GaN 不能得到均匀的刻蚀, 使得样品表面形貌变差, 如图 7 所示。高压强条件下, 虽然陡直度高, 但侧壁粗糙度大且表面形貌差。

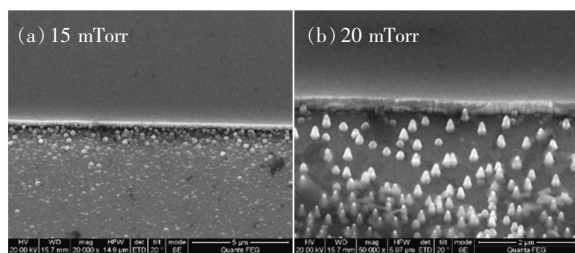


图 7 压强为 1.995 Pa(15 mTorr) (a)、2.66 Pa(20 mTorr) (b) 条件下 GaN 表面 SEM 图像。

Fig. 7 SEM image of the etched GaN surface at chamber pressure 1.995 Pa(15 mTorr) (a) and 2.66 Pa(20 mTorr) (b)

3.3 优化刻蚀条件后刻蚀光栅

保持 ICP 功率和 RF 功率分别为 300 W 和 100 W 不变, 刻蚀气体 BCl₃ 占比为 50% (BCl₃/Cl₂ 总流量为 35 mL/min) 以及压强为 1.33 Pa(10 mTorr) 条件下, 能有效提高刻蚀的各向异性, 确保光栅的陡直度, 降低侧壁粗糙度, 保证图形边缘光滑平整。将优化后的 ICP 刻蚀参数用于 GaN 基

DFB 激光器的制作中,光栅采用 Raith (eLINE Plus) 电子束光刻机转移图形,光刻胶为聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethyl methacrylate, PMMA), 采用 SiO_2 硬掩膜, 得到了一个平整、光滑且陡直的光栅, 光栅周期 $1.4 \mu\text{m}$, 占空比 72%, 侧壁倾角为 85.3° , 刻蚀深度为 400 nm。该工艺应用于 GaN 基 DFB 激光器中光栅的刻蚀, 如图 8 所示。

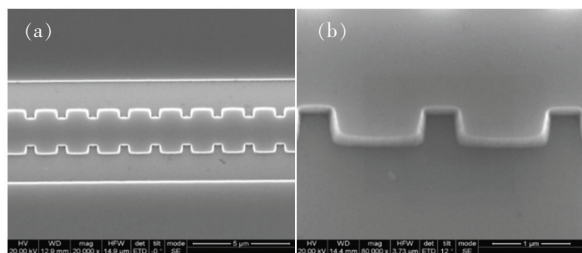


图 8 优化后的刻蚀工艺刻蚀的光栅 SEM 图像

Fig. 8 SEM image of the GaN grating by optimized ICP etching

4 结 论

本文研究了 ICP 刻蚀工艺参数, 包括 ICP 功率、RF 功率、刻蚀气体比例以及压强对刻蚀 GaN 的影响。主要研究了刻蚀气体比例和压强对刻蚀的各向异性、台面侧壁粗糙度以及刻蚀速率的影响。最后, 保持 ICP 功率和 RF 功率分别为 300 W 和 100 W 不变, 在 BCl_3/Cl_2 流量比为 1 和 1.33 Pa (10 mTorr) 的压强条件下, 化学刻蚀和物理刻蚀可以达到一种平衡, 得到较好的各向异性且侧壁光滑的刻蚀台面。在该参数条件下, 刻蚀速率为 $200.6 \text{ nm}/\text{min}$, 侧壁倾角为 85.3° , 得到了相对陡直、光滑且深度可控的刻蚀台面。该优化工艺对于氮化镓基分布式反馈激光器中光栅的刻蚀具有重要意义, 刻蚀深度可控、陡直且光滑的光栅对于提升氮化镓基分布式反馈激光器的器件性能及其稳定性非常重要。

参 考 文 献:

- [1] HOLGUÍN-LERMA J A, NG T K, OOI B S. Narrow-line InGaN/GaN green laser diode with high-order distributed-feedback surface grating [J]. *Appl. Phys. Express*, 2019, 12(4):042007-1-4.
- [2] DENG Z J, LI J Z, LIAO M L, *et al.*. InGaN/GaN distributed feedback laser diodes with surface gratings and sidewall gratings [J]. *Micromachines*, 2019, 10(10):699.
- [3] KANG J H, WENZEL H, FREIER E, *et al.*. Continuous-wave operation of DFB laser diodes based on GaN using 10th-order laterally coupled surface gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(4):935-938.
- [4] ZHANG H J, COHEN D A, CHAN P, *et al.*. Continuous-wave operation of a semipolar InGaN distributed-feedback blue laser diode with a first-order indium tin oxide surface grating [J]. *Opt. Lett.*, 2019, 44(12):3106-3109.
- [5] SLIGHT T J, STANCZYK S, WATSON S, *et al.*. Continuous-wave operation of (Al, In)GaN distributed-feedback laser diodes with high-order notched gratings [J]. *Appl. Phys. Express*, 2018, 11(11):112701.
- [6] LI X L, MA P, JI X L, *et al.*. Implementation of slow and smooth etching of GaN by inductively coupled plasma [J]. *J. Semicond.*, 2018, 39(11):113002-1-6.
- [7] NAHHAS A M. Review of GaN nanostructured based devices [J]. *Am. J. Nanomater.*, 2018, 6(1):1-14.
- [8] LI Z C, HUANG R, CHEN X, *et al.*. The significant effect of carbon and oxygen contaminants at Pd/p-GaN interface on its Ohmic contact characteristics [J]. *Phys. Status Solidi(A)*, 2020, 218(4):2000603.
- [9] TU Z Z, LV L L, SONG R X, *et al.*. Etch tapered angle on the influence of GaN membrane grating reflectance spectra [J]. *Optik*, 2018, 165:351-355.
- [10] ZHOU S J, CAO B, LIU S. Dry etching characteristics of GaN using Cl_2/BCl_3 inductively coupled plasmas [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, 257(3):905-910.
- [11] DOUGLAS E A, SANCHEZ C A, KAPLAR R J, *et al.*. Inductively coupled $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$ plasma etching of Al-rich AlGaIn [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2017, 35(2):021305.
- [12] ZHAO Y F, WANG H, ZHANG W, *et al.*. Controllable process of nanostructured GaN by maskless inductively coupled plasma (ICP) etching [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2017, 27(11):115004.
- [13] SUN Y, KANG X W, ZHENG Y K, *et al.*. Optimization of mesa etch for a quasi-vertical gan schottky barrier diode (SBD) by inductively coupled plasma (ICP) and device characteristics [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(4):657-1-13.

- [14] LI W Y, LUO Y, XIONG B, *et al.*. Fabrication of GaN-based ridge waveguides with very smooth and vertical sidewalls by combined plasma dry etching and wet chemical etching [J]. *Phys. Status Solidi (A)*, 2015, 212(10):2341-2344.
- [15] YU C C, CHU C F, TSAI J Y, *et al.*. Gallium nitride nanorods fabricated by inductively coupled plasma reactive ion etching [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, 41(8B):L910-L912.
- [16] ROSLI S A, AZIZ A A, HASHIM M R. ICP-RIE dry etching using Cl_2 -based on GaN [J]. *Sains Malays.*, 2011, 40(1):79-82.
- [17] HAN Y J, XUE S, GUO W P, *et al.*. Highly selective dry etching of GaN over AlGaIn using inductively coupled $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ plasmas [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, 42(10A):L1139-L1141.
- [18] RAWAL D S, SEHGAL B K, MURALIDHARAN R, *et al.*. Effect of BCl_3 concentration and process pressure on the GaN mesa sidewalls in BCl_3/Cl_2 based inductively coupled plasma etching [J]. *Vacuum*, 2012, 86(12):1844-1849.
- [19] QIU R F, LU H, CHEN D J, *et al.*. Optimization of inductively coupled plasma deep etching of GaN and etching damage analysis [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, 257(7):2700-2706.
- [20] LIU Z, WANG Y J, XIA X X, *et al.*. Fabrication of GaN hexagonal cones by inductively coupled plasma reactive ion etching [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2016, 34(4):041226-1-4.
- [21] TAHHAN M, NEDY J, CHAN S H, *et al.*. Optimization of a chlorine-based deep vertical etch of GaN demonstrating low damage and low roughness [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2016, 34(3):031303.
- [22] ZHOU S J, CAO B, LIU S. Optimized ICP etching process for fabrication of oblique GaN sidewall and its application in LED [J]. *Appl. Phys. A*, 2011, 105(2):369-377.



郭孝浩(1996-),男,河南信阳人,硕士研究生,2018年于江南大学获得学士学位,主要从事 GaN 基激光器件与工艺的研究。

E-mail: xhguo2019@sinano.ac.cn



刘建平(1976-),男,江西上饶人,博士,研究员,博士研究生导师,2004年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事氮化物半导体材料与器件以及 MOCVD 外延生长的研究。

E-mail: jpliu2010@sinano.ac.cn