

# 感应耦合等离子体选择性刻蚀 GaN/AlGa<sub>0.73</sub>N

王冲, 冯倩, 郝跃, 杨燕

(西安电子科技大学 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 采用 Cl<sub>2</sub>/Ar 作为刻蚀气体, 研究了在感应耦合等离子体干法刻蚀 GaN、Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 材料中工艺参数对刻蚀速率及选择比的影响. GaN 与 Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 之间的刻蚀选择比随自偏压的增大而减小, 随感应耦合等离子体功率的增大变化不大. 在 Cl<sub>2</sub>/Ar 为 3:1 的刻蚀气体中加入 10% 的 O<sub>2</sub> 对 GaN 刻蚀速率影响不大, 却使 Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 刻蚀速率明显下降, 从而提高了 GaN 与 Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 之间的刻蚀选择比. 对比了采用不同自偏压刻蚀的 Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 材料肖特基的特性, 发现反向漏电流随自偏压的增大而增大.

**关键词:** 感应耦合等离子体; 刻蚀速率; 选择性刻蚀; 选择比; 刻蚀损伤

**中图分类号:** TN325<sup>+</sup>.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2006)04-0520-04

## Selective etching of GaN/ AlGa<sub>0.73</sub>N by Inductively coupled plasma

WANG Chong, FENG Qian, HAO Yue, YANG Yan

(Ministry of Edu. Key Lab. of Wide Band Gap Semiconductor Materials and Devices,  
Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A systematic study of etch rates and selectivities of GaN and Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N at different processing terms is performed using Cl<sub>2</sub>/Ar inductively coupled plasma. Selectivity between GaN and Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N decreases with the increasing DC bias and changes a little with ICP power. Adding O<sub>2</sub> (10%) to Cl<sub>2</sub>/Ar (3:1) gas mixture has little effect on etch rates of GaN, but leads to a great reduction in etch rates of Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N, thus improving selectivity between GaN and Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N. Schottky characteristics at different etching DC biases are contrasted, with the result that the leakage current increases with the enhanced DC bias.

**Key Words:** Inductively coupled plasma; etching rates; selective etch; selectivity; etching damage

基于 AlGa<sub>0.73</sub>N/GaN 异质结的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 在高温器件及大功率微波器件方面有非常好的应用前景<sup>[1]</sup>. 在 HEMT 结构中多采用槽栅结构<sup>[2]</sup>, 即在 AlGa<sub>0.73</sub>N/GaN 异质结上生长一层 n<sup>+</sup> GaN 层作为帽层有利于欧姆接触, 而在器件制作工艺中要刻蚀掉帽层, 在 AlGa<sub>0.73</sub>N 材料上制作肖特基栅来防止 n<sup>+</sup> GaN 层上的肖特基栅漏电过大, 这就要求对 GaN/AlGa<sub>0.73</sub>N 进行选择性的刻蚀. 由于 Ga-N 键能达到 8.92 eV, Al-N 键能达到 11.52 eV, 采用传统的湿法刻蚀 GaN/AlGa<sub>0.73</sub>N 材料很难获得满意的效果. 干法刻蚀技术具有各向异性、对不同材料选择比差别较大、均匀性与重复性好、易于实现自动连续生产等优点, 所以反应离子刻蚀 (RIE)<sup>[3]</sup>、电子回旋共振等离子体 (ECR)<sup>[4]</sup>、感应耦合等离子体 (ICP)<sup>[5]</sup> 等多种干法刻蚀方法被应用于 GaN 及相关材料的刻蚀中. ICP 以其廉价的等离子体和高刻蚀速率等特点在 GaN 基电子器件工艺中被广泛应用. ICP 工艺参数的优化及刻蚀气体配比对器件刻蚀工艺非常重要. 目前国内对于 AlGa<sub>0.73</sub>N/GaN HEMT 的槽栅刻蚀研究还未见报道, 笔者在分析了 ICP 工艺参数及 O<sub>2</sub> 的加入对 GaN、Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 刻蚀速率和选择比影响的基础上对 GaN/AlGa<sub>0.73</sub>N 选择性刻蚀的工艺条件进行了研究, 并对 AlGa<sub>0.73</sub>N 刻蚀前后肖特基特性的变化.

收稿日期: 2005-09-09

基金项目: 国家重大基础研究项目 (973) 资助 (2002CB311904); 国家部委预研项目资助 (41308060106)

作者简介: 王冲 (1978-), 男, 西安电子科技大学博士研究生.

# 1 实 验

GaN、Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 材料刻蚀研究采用国产 ICP 刻蚀机。该 ICP 系统具有两个独立的 13.56 MHz 射频功率源,其中一个连接到反应室外的电感线圈上使反应室内气体产生辉光放电,另一个连接在反应室底部的射频源提供了偏置电压,给等离子体提供一定的能量,达到垂直作用于基片的目的。在每次刻蚀之前,都保证反应室内的真空度达到 1×10<sup>-3</sup> Pa 以下。刻蚀材料选用 MOCVD 方法在(0001)面单面抛光蓝宝石衬底上生长的 GaN 和 Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 材料。Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 材料的 Al 组分由材料的透射谱曲线计算得出。对生长 AlGaIn/GaN 异质结选用 Al 组分为 27% 是最有利于提高 HEMT 特性的,不同的 Al 组分与本实验 27% 的 Al 组分实验结果大致相同,仅由于 Al 组分增大时 GaN/AlGaIn 选择比会略微增大,AlGaIn 刻蚀速率会略微减小。在刻蚀前采用 1:10 的 HCl 去除材料表面氧化层。刻蚀材料时采用等离子体辅助化学气象淀积(PECVD)法淀积 SiO<sub>2</sub> 作为掩模。刻蚀深度采用 Ambios XP-1 表面形貌分析仪进行测量,每个样品上至少测量 5 个点进行测量值平均后得到刻蚀深度。

对 Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 刻蚀前后制作肖特基二极管进行电特性的对比,肖特基结构采用环状结构,外环内外径分别为 140 μm 和 220 μm,电子束蒸发 Ti/Al/Ti/Au (30 nm/150 nm/50 nm/60 nm) 在 850℃ 的 N<sub>2</sub> 中退火 30 s 形成欧姆接触;内圆半径为 60 μm,电子束蒸发 Ni/Au (30 nm/200 nm) 形成肖特基接触。使用 HP4156B 精密半导体参数测试仪对肖特基二极管电特性进行测量。

# 2 结果及其分析

下面是 Cl 基等离子体刻蚀 GaN 材料的反应方程式:



第 1 步中,材料表面的 Ga-N 键在离子轰击下破裂,产生活性的 Ga 和 N 原子。第 2 步中 N 原子相互结合形成容易析出的 N<sub>2</sub>。第 3 步中 Ga 原子和 Cl 离子生成易挥发的 GaCl<sub>2</sub> 或 GaCl<sub>3</sub>。从这几步过程中也可以看出离子密度和能量对刻蚀速率的重要影响。

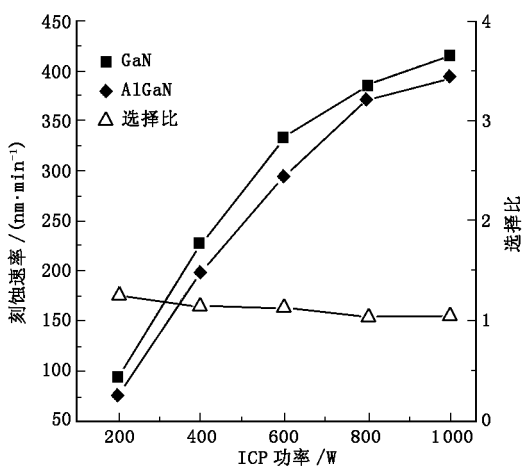


图 1 GaN 和 AlGaIn 刻蚀速率、选择比随 ICP 功率的变化

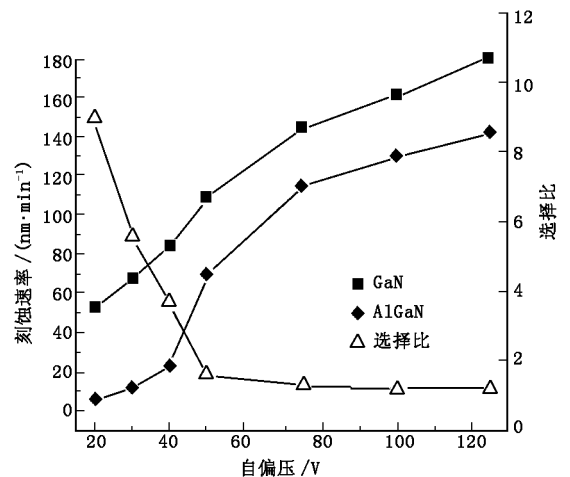


图 2 GaN 和 AlGaIn 刻蚀速率、选择比随自偏压的变化

从图 1 可看出,增大 ICP 射频功率,GaN 和 AlGaIn 刻蚀速率随之增加,这是由于反应物浓度的增加和溅蚀材料的离子流浓度的增加加强了材料化学键的断裂和对材料表面的溅蚀作用。从图 2 可看出,GaN 和

AlGa<sub>N</sub> 的刻蚀速率随着偏压或离子能量的增加单调地增长,刻蚀速率的增加是由于高能量的离子能更有效地击破材料的化学键,同时更有利于刻蚀产物从表面被溅蚀去除.图 1 和 2 所示刻蚀过程中其他刻蚀参数为:Cl<sub>2</sub> 流量 30 ml/min,Ar 流量 10 ml/min;压力 1 Pa;自偏压 150 V;ICP 功率 500 W.由于 GaN 材料中 Ga—N 的键能为 8.92 eV,而 AlGa<sub>N</sub> 中 Al—N 的键能为 11.52 eV,所以在相同刻蚀条件下 AlGa<sub>N</sub> 比 GaN 的刻蚀速率慢.图 1 中 GaN 和 AlGa<sub>N</sub> 的选择比随 ICP 功率的增大基本不变,而图 2 中两者的选择比在自偏压由 20V 增大到 50V 的过程中由 9 逐渐减小到 1.5,在自偏压由 50 V 增大到 120 V 过程中逐渐接近 1.选择比随自偏压变化是由于 AlGa<sub>N</sub> 材料刻蚀速率在自偏压小于 50 V 时随自偏压的增大速率增加缓慢,当自偏压大于 50 V 时刻蚀速率迅速增大,而 GaN 的刻蚀速率从 20 V 到 120 V 一直随自偏压增大而增大.

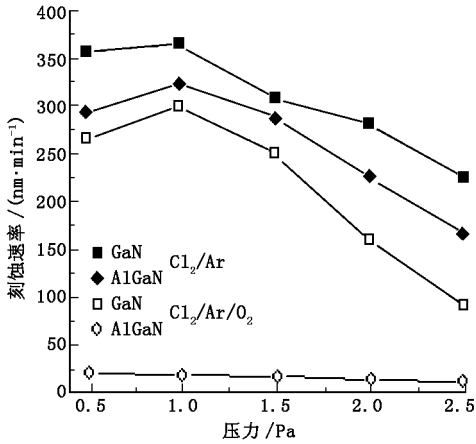


图 3 无 O<sub>2</sub> 和有 O<sub>2</sub> 参与下 GaN 和 AlGa<sub>N</sub> 的刻蚀速率随反应室压力的变化

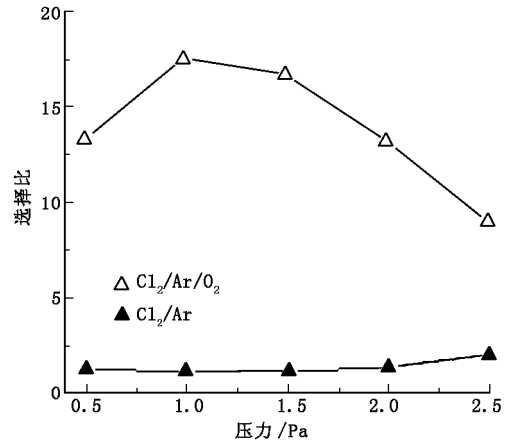


图 4 无 O<sub>2</sub> 和有 O<sub>2</sub> 参与下 GaN 和 AlGa<sub>N</sub> 的选择比随反应室压力的变化

图 3 和 4 是在无 O<sub>2</sub> 和有 O<sub>2</sub> 参与条件下 GaN 和 AlGa<sub>N</sub> 的刻蚀速率及选择比随反应室压力的变化情况.刻蚀条件为:Cl<sub>2</sub> 流量 30 ml/min,Ar 流量 10 ml/min,O<sub>2</sub> 流量 4 ml/min;ICP 功率 500 W;自偏压 150 V.刻蚀气体中加入 O<sub>2</sub> 前 GaN 和 AlGa<sub>N</sub> 刻蚀速率相差不大,压力小于 1 Pa 时的速率增加表明在低压下反应物的增加主要影响刻蚀速率提高,在压力大于 1 Pa 后刻蚀速率都随压力的增大而下降,这是由于气体分子的平均自由程变小及二次淀积和聚合物的形成降低了刻蚀速率.O<sub>2</sub> 的加入使得 AlGa<sub>N</sub> 的刻蚀速率大大下降而 GaN 的刻蚀速率下降较少,明显增加了刻蚀选择比.当有氧气参与反应时,反应室压力为 1 Pa 时选择比达到最大值 17.8.由于 Al—O 的键能高达 21.2 eV,在刻蚀 AlGa<sub>N</sub> 材料时加入 O<sub>2</sub> 会生成氧化层,高键能的 Al—O 键明显降低了 AlGa<sub>N</sub> 的刻蚀速率,而 O<sub>2</sub> 的加入对 GaN 的刻蚀速率影响要比 AlGa<sub>N</sub> 小得多.

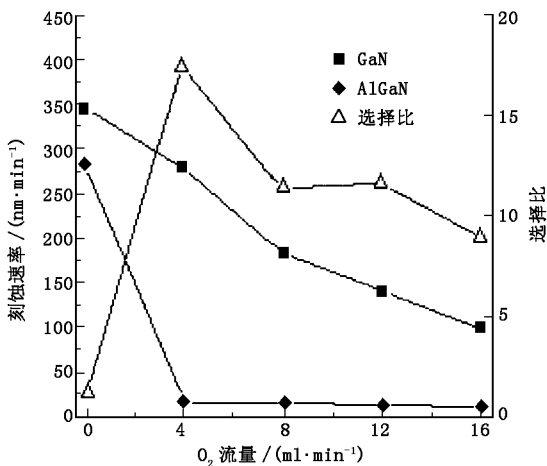


图 5 GaN 和 AlGa<sub>N</sub> 的刻蚀速率及选择比随 O<sub>2</sub> 流量的变化

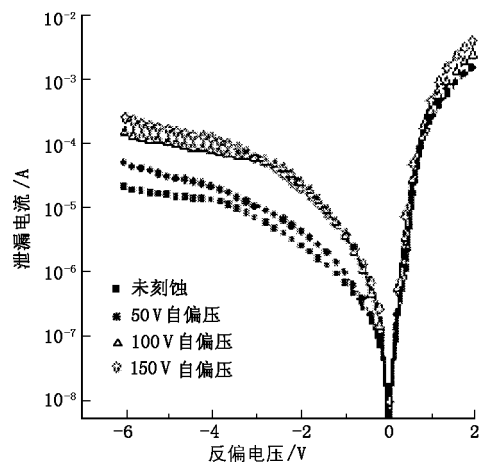


图 6 AlGa<sub>N</sub> 上肖特基反向漏电随自偏压变化的比较

图 5 为 GaN 和 AlGa<sub>N</sub> 的刻蚀速率及选择比随 O<sub>2</sub> 流量的变化关系,刻蚀条件为:Cl<sub>2</sub> 流量 30 ml/min,

Ar 流量 10 ml/min, O<sub>2</sub> 流量从 0~16 ml/min; ICP 功率 500 W; 自偏压 150 V. 当 O<sub>2</sub> 的流量大于 4 ml/min 后 AlGa<sub>N</sub> 的刻蚀速率迅速减小到 20 nm/min 左右并随流量增大基本不变; 而 GaN 的刻蚀速率随 O<sub>2</sub> 流量的增大逐渐下降, 这是由于反应室压力增大以及 Cl 离子百分比下降所引起的速率下降. GaN 和 AlGa<sub>N</sub> 的刻蚀选择比在 O<sub>2</sub> 的流量为 4 ml/min 时达到最大值 17.2.

等离子体引起的刻蚀损伤对化合物半导体器件的电特性和光特性<sup>[6]</sup>都有着显著的影响. 由于 GaN 材料稳定的化学性质, 相比其他材料在刻蚀 GaN 中所使用的刻蚀条件要求有更高的功率、偏压和等离子体密度, 这样就更容易发生刻蚀损伤. 材料被刻蚀后会造成材料的组成元素的比例失配, GaN 材料在 Cl 基 ICP 刻蚀后, 材料表面处的 Ga 和 N 的比例会发生明显的变化, N 的含量显著减小, 形成大量 N 空位<sup>[7]</sup>. 形成元素比失配的主要原因是刻蚀过程中高能离子的轰击下, N 元素更容易形成可挥发的物质而流失, 轰击能量越高, Ga 和 N 的比例失配越大. 刻蚀中产生的大量 N 空位, 使得肖特基特性变坏, 泄漏电流增大, 击穿电压减小<sup>[8]</sup>. 肖特基的二极管反向饱和电流的大小可以用公式  $J_{ST} = A * T^2 \exp(-q \phi_{Bn} / (KT))$  来表示. 刻蚀损伤情况越严重肖特基的反向漏电也越大, 势垒高度及理想因子都会受到影响. 图 6 表示肖特基在刻蚀前后及不同自偏压刻蚀下的反向漏电比较, 反向漏电随自偏压的增大逐渐增大, 其他刻蚀参数为: Cl<sub>2</sub> 流量 30 ml/min, Ar 流量 10 ml/min, O<sub>2</sub> 流量 4 ml/min; ICP 功率 500 W; 反应室压力 1 Pa. 未刻蚀材料肖特基反向漏电 -6 V 时为 16 μA, 在 50 V 自偏压刻蚀后漏电增大 3 倍, 而 100 V 和 150 V 刻蚀后材料肖特基反向漏电增大了两个数量级.

### 3 结 论

以上分析了 ICP 功率、自偏压、压力几个关键工艺参数及 O<sub>2</sub> 加入反应气体对 GaN、Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 刻蚀速率及选择比的影响. GaN 和 AlGa<sub>N</sub> 的选择比受 ICP 功率影响较小, 受自偏压影响较大, 在自偏压 20 V 为最大值 9, 在 50 V 为 1.5; O<sub>2</sub> 的加入提高了两者的选择比, 在压力为 1 Pa 时达到最大值 17.8, O<sub>2</sub> 流量增大到 4 ml/min 时选择比达到最大, 而后随 O<sub>2</sub> 流量继续增大逐渐减小. 对采用不同偏压刻蚀下材料肖特基反向漏电与未刻蚀材料作了对比, 反向漏电随自偏压的增大逐渐增大. 刻蚀气体中 O<sub>2</sub> 的加入能明显提高 HEMT 槽栅刻蚀中 GaN/AlGa<sub>N</sub> 的选择性, 为了更好地控制刻蚀过程, 同时保证速率, 氧流量采用 4 ml/min, 刻蚀中选择较低的自偏压 40 V, 适中的 ICP 功率 500 W, 压力 1 Pa 左右, 能获得较高的选择比和较小的刻蚀损伤.

#### 参考文献:

- [1] Wang Chong, Hao Yue, Zhang Jincheng. Development and Characteristics of AlGa<sub>N</sub>/GaN HEMT[J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(2): 234-236.
- [2] Egawa T, Ishikawa H, Umeno M, et al. Recessed Gate AlGa<sub>N</sub>/GaN MODFET on Sapphire[J]. Appl Phys Lett, 1999, 76(1): 121-126.
- [3] Adesida I, Mahajan A, Andideh E, et al. Reactive Ion Etching of Gallium Nitride in Silicon Tetrachloride Plasmas[J]. Appl. Phys. Lett, 1993, 63(3): 2777-2781.
- [4] Pearton S J, Abernathy C R, Ren F, et al. Dry and Wet Etching Characteristics of InN, AlN and GaN Deposited by Electron Cyclotron Resonance Molecular Beam Epitaxy[J]. J Vac Sci Technol A, 1993, (11): 1772.
- [5] Shul R J, McClellan G B, Casalnuovo S A, et al. Inductively Coupled Plasma Etching of GaN[J]. Appl. Phys. Lett, 1996, 69(4): 1119-1123.
- [6] Lee J M, Chang K M, Kim S W, et al. Dry Etch Damage in n-type GaN and Its Recovery by Treatment with an N<sub>2</sub> Plasma[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(11): 7667-7670.
- [7] Buttari D, Chini A, Meneghesso G, et al. Systematic Characterization of Cl<sub>2</sub> Reactive Ion Etching for Improved Ohmics in AlGa<sub>N</sub>/GaN HEMTs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2002, 23(2): 76-78.
- [8] Shul R J, Zhang L, Baca A G, et al. Inductively Coupled High-density Plasma-induced Etch Damage of GaN MESFETs[J]. Solid-State Electronics, 2001, 45(1): 13-17.