

p-GaN ICP 刻蚀损伤研究*

龚欣[†] 吕玲 郝跃 李培威 周小伟 陈海峰

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

摘要: 运用 Cl_2/N_2 等离子体系统, 系统研究了 ICP 刻蚀中 ICP 功率、RF 功率、反应室压力和 Cl_2 百分比对 p 型 GaN 材料的物理表面形貌和欧姆接触特性的影响. 原子力显微镜显示, 在文中所用的刻蚀条件范围内, 刻蚀并没有引起表面形貌较大的变化, 刻蚀表面的均方根粗糙度在 1.2nm 以下. 结果还显示, 已刻蚀 p-GaN 材料的电特性与物理表面形貌没有直观联系, 刻蚀后欧姆接触特性变差更多地是因为刻蚀中浅施主能级的引入, 使表面附近空穴浓度降低所致.

关键词: GaN; 感应耦合等离子体刻蚀; 等离子体损伤

PACC: 7280E; 6170

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)07-1097-07

1 引言

宽禁带半导体 GaN 是制备光电器件(LED, LD 等)和高温高功率电子器件(MESFET, HEMT, BJT, HBT 等)的理想材料. 由于 GaN 体晶生长的困难, 绝大多数的 GaN 材料都是采用在蓝宝石或半绝缘 SiC 衬底上异质外延的方法制成的, 因此在制造 GaN 器件时, 为了引出电极, 在 n 型或 p 型 GaN 上作欧姆接触, 台面刻蚀是必不可少的. GaN 化学稳定性较强, 目前还没有一种有效的湿法化学腐蚀液, 因此在器件制造过程中采用干法刻蚀^[1], 目前在 GaN 工艺中应用较多的是感应耦合等离子体(ICP)刻蚀^[2~4]. 但是干法刻蚀引入的刻蚀损伤给器件的光学特性和电学特性带来严重的不利影响, 例如, 刻蚀中高能离子的轰击造成大量的点缺陷及缺陷丛, 刻蚀产物及掩膜材料的污染, 表面粗糙化, H 以及其他杂质的引入等^[5], 都会影响器件的特性. 这些损伤对于 n 型 GaN 欧姆接触来讲是不足虑的, 因为刻蚀后 n-GaN 表面电阻率降低反而有利于 n 型欧姆接触的形成^[6], 但对于 p 型 GaN 欧姆接触却有着致命的影响. 因此优化刻蚀条件以尽可能地降低刻蚀表面(特别是 p 型 GaN 刻蚀表面)损伤在 GaN 器件制造中至关重要.

本文运用 Cl_2/N_2 等离子体系统, 系统研究了不同 ICP 刻蚀条件下 p 型 GaN 材料的物理特性和电特性, 并从物理化学刻蚀机理角度进行了阐述和说明, 得到了优化的刻蚀条件.

2 相关实验和方法

本文研究所采用的 GaN 材料由金属有机物化学气相淀积(MOCVD)技术生长获得: 在(0001)晶面的蓝宝石衬底上依次生长了 20nm 的低温 GaN 缓冲层, 900nm 厚的非掺杂 GaN 以及 360nm 的 p 型 GaN. 生长中分别以三甲基镓(TMGe)和氨气作为 Ga 和 N 的源, H_2 作为载气. Mg 作为 p 型掺杂剂, Mg 源采用双环戊二烯镁(Cp_2Mg). 生长完毕后, 样品在 N_2 气氛中 750°C 下退火以激活 Mg 杂质. 常温下对样品进行 Hall 测试, 得到 p 型载流子浓度为 $3.48 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 载流子迁移率为 $6.27 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.

研究中所用的 ICP 刻蚀机采用 Load-Lock 双室结构, 激励电源频率为 13.56MHz. 采用 Cl_2 作为反应气体, N_2 为辅助气体. 在低的反应室压力($<2.7 \text{Pa}$)及一定的偏置电压下, 等离子体以较低的离子能量从产生区域扩散并漂移到样片表面, 与样片同时发生物理轰击溅蚀和化学反应腐蚀两种作用, 以达到刻蚀样片的作用. 在众多的刻蚀技术中, ICP 刻蚀技术具有可以在低压强下获得高密度等离子体、等离子体密度和离子轰击能量单独可控等显著的优点, 相比于其他干法刻蚀技术更容易获得好的刻蚀结果. 为方便比较各种不同刻蚀条件下样品的表面, 本文采用相同的刻蚀时间.

刻蚀后样品经过清洗、甩胶、光刻、显影、氧打底膜等工艺后送入电子束蒸发反应室进行金属蒸发,

* 国家重大基础研究发展规划资助项目(批准号:51327020301)

[†] 通信作者. Email: xgong@mail.xidian.edu.cn

2006-12-13 收到, 2007-01-26 定稿

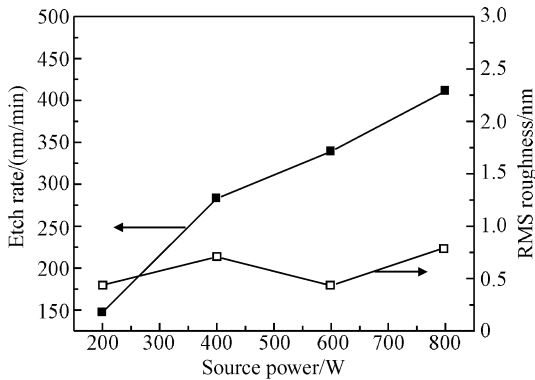


图 1 刻蚀速率和 RMS 粗糙度随 ICP 功率的变化

Fig. 1 Etch rates and RMS roughness as functions of ICP power

蒸发前样品浸入 BOE 30s 以去除表面氧化层. 沉积金属后, 在 550°C, 大气气氛中进行合金. 通过测量 CTLM 图形两电极间的 $I-V$ 特性来表征欧姆接触特性的好坏.

3 结果与讨论

图 1 给出了刻蚀速率和 RMS 粗糙度随 ICP 功率的变化关系. 图 2 是不同 ICP 功率刻蚀条件下的原子力显微镜照片. 在整个过程中, RF 功率保持在 50W 不变, 反应室压力为 1Pa, Cl_2 和 N_2 流量分别为 30 和 10sccm. 当 ICP 功率从 200W 增加到 800W

时, 直流自偏压从 -160V 降低到 -80V, 这是因为较高的 ICP 功率会产生较高浓度的等离子体. 从图中看出, ICP 功率对刻蚀速率影响较大, GaN 刻蚀速率由 200W 时的 147nm/min 增大到 800W 时的 411nm/min, 这说明刻蚀过程主要是化学反应过程, 刻蚀速率随着等离子体浓度的增加而增大, 而与离子能量的减小(即直流自偏压的减小)关系不大. 随着 ICP 功率的增加, RMS 表面粗糙度略有增大, 这可能是由于在较高的等离子体密度及较低的离子能量条件下, 反应产物的脱附不充分致使刻蚀样品表面存在薄层聚合物.

图 3 是不同 ICP 功率刻蚀的 p 型 GaN 欧姆接触的 $I-V$ 特性, CTLM 图形两个电极间的间距为 14 μm . 不同于文献[7]中 Ar ICP 刻蚀的 p 型 GaN 的薄层电阻与离子浓度关系不大的结论, 本文的实验结果显示:

随着 ICP 功率的增大, 欧姆接触特性变差. 该结果表明, 离子浓度在改变 p 型 GaN 电特性方面起着重要作用. 欧姆接触特性变差主要是因为刻蚀过程中在表面附近引入了大量的浅施主能级, 补偿了 p 型掺杂, 使刻蚀表面空穴浓度降低甚至反型. 虽然 ICP 功率增大, 自偏压会下降, 离子能量也会下降, 但较大浓度的离子密度仍然会引入较大浓度的浅施主缺陷(如 N 空位), 因此欧姆接触特性变差. 此外需要注意的一点是: 当 ICP 功率为 50W 时, 刻蚀速率急剧下降, 约为 14.6nm/min, 可见小 ICP 功率对

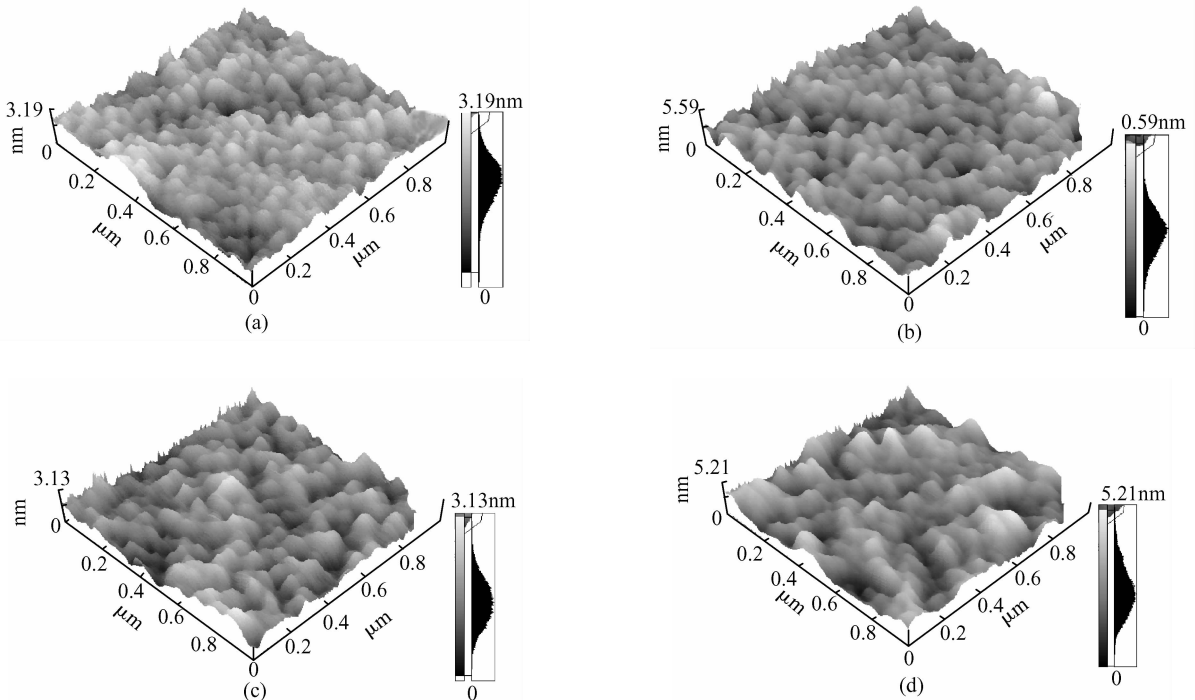


图 2 不同 ICP 功率刻蚀条件下的原子力显微镜照片 (a) 200W; (b) 400W; (c) 600W; (d) 800W

Fig. 2 AFM images of etched p-GaN at various ICP powers (a) 200W; (b) 400W; (c) 600W; (d) 800W

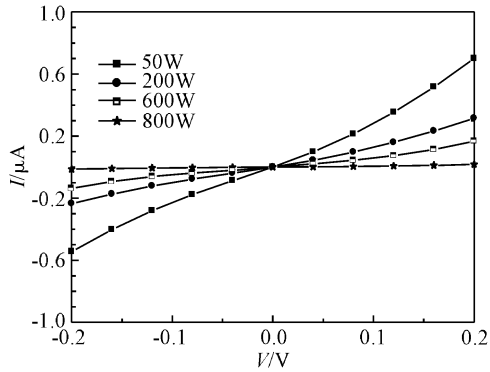


图 3 不同 ICP 功率刻蚀的 p-GaN 欧姆接触 *I-V* 特性
 Fig. 3 *I-V* curves of ohmic contact on etched p-GaN at various ICP powers

于刻蚀深度贡献不大,但却可以改善刻蚀表面的电特性,这说明既能实现一定刻蚀深度,又能使表面损伤较小的两步法刻蚀是可以实现的,即先以大功率较快的刻蚀速率刻蚀到要求的深度,再以小功率刻蚀出较低损伤的 p 型 GaN 表面,以实现较好的欧姆接触。

刻蚀速率和 RMS 粗糙度随 RF 功率的变化如图 4 所示.图 5 是不同 RF 功率刻蚀条件下的原子力显微镜照片. ICP 功率保持 300W 不变,反应室压力为 1Pa,Cl₂ 和 N₂ 流量分别为 30 和 10sccm. GaN 刻蚀速率随 RF 功率的增大而增大,主要因为随着

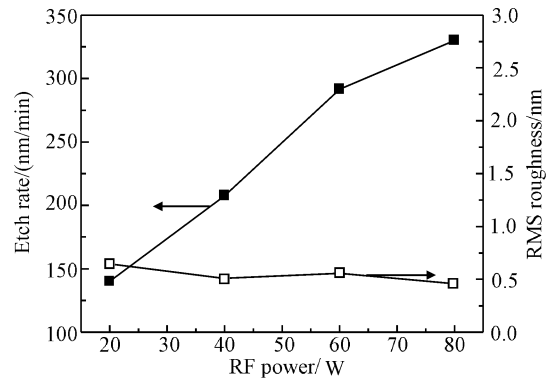


图 4 刻蚀速率和 RMS 粗糙度随 RF 功率的变化
 Fig. 4 Etch rates and RMS roughness as functions of RF power

RF 功率的增大,直流自偏压增大(从 20W 时的 -40V 增大到 80W 时的 -190V),等离子体能量增大,离子的物理轰击作用增强,对反应产物的溅蚀脱附作用也随之增强. RF 功率较大时,表面变得略平可能是因为在高自偏压下等离子体刻蚀与角度有关,有突起的地方刻蚀的速度快而平坦的地方刻蚀的速度慢,因此会有比较平的刻蚀表面^[8].

图 6 是不同 RF 功率刻蚀的 p 型 GaN 欧姆接触的 *I-V* 特性.结果显示出与 ICP 功率实验相同的趋势.在 ICP 功率一定的情况下,等离子体密度不变,RF 功率越大,离子能量越大,将会在更深的表

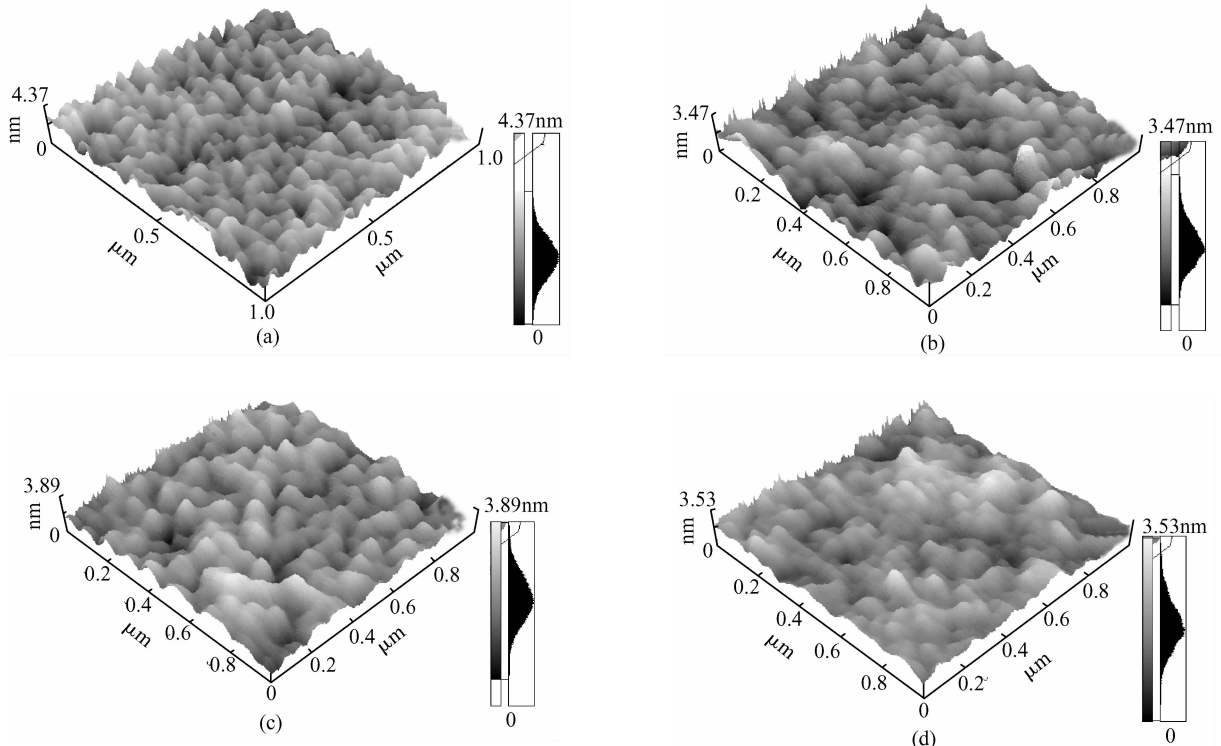


图 5 不同 RF 功率刻蚀条件下的原子力显微镜照片 (a) 20W;(b) 40W;(c) 60W;(d) 80W
 Fig. 5 AFM images of etched p-GaN at various RF powers (a) 20W;(b) 40W;(c) 60W;(d) 80W

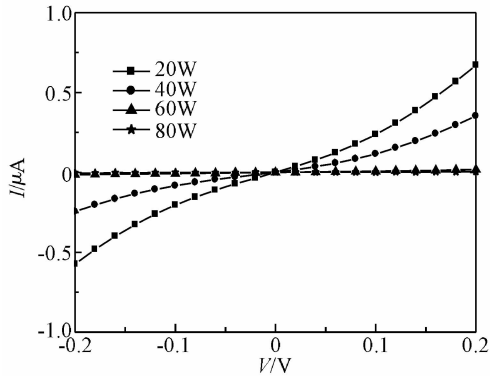


图 6 不同下电极功率刻蚀的 p-GaN 欧姆接触 $I-V$ 特性
Fig. 6 $I-V$ curves of ohmic contact on etched p-GaN at various RF powers

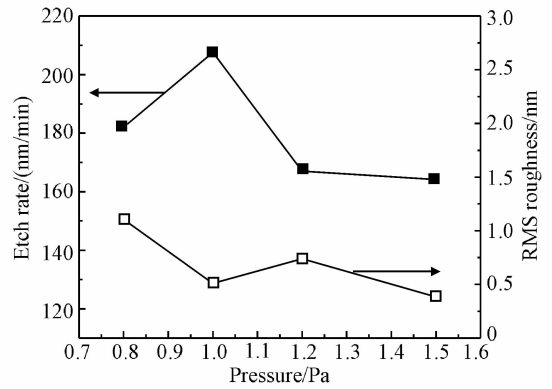


图 7 刻蚀速率和 RMS 粗糙度随反应室压力的变化
Fig. 7 Etch rates and RMS roughness as functions of pressure

面区域造成更多的点缺陷,因此欧姆接触就会越差.

虽然在较大的 ICP 功率和较大的 RF 功率下,欧姆接触特性都变差,但作者认为,两种情况是有差别的.前一种情况下,离子能量较小,损伤局限于表面附近,但由于离子浓度较大,因此表面处产生较大浓度的 N 空位,此种情况下的点缺陷可能大部分属于肖特基缺陷^[9],即由于 N 原子的优先逸出,晶体表面只形成了 N 空位而无 N 间隙原子;而后一种情况是因为离子能量较大,不仅表面,在表面以下较深的位置也会有损伤,不过,表面以下较深区域的缺陷可能大部分属于弗仑克耳缺陷^[9],即在产生空位的同时也会有间隙原子出现,即产生晶格混乱.对于后一种情况,快速热退火对于刻蚀损伤的恢复是有效

果的,因为高温下随着空位和间隙原子的复合,晶格发生重组,因此材料的电特性有所恢复,正如文献[10]所提及的.而对于后一种情况,快速热退火对刻蚀损伤的恢复作用不大甚至会起反作用,因为高温下会引起表面处 N 原子的进一步逸出,造成更偏离化学计量比的表面.一些文献报道了快速热退火无益于刻蚀损伤恢复,可能对应此种情况^[11].

从图 3 和图 6 看出,在较小的功率范围内欧姆接触的变化也是非常明显的,因此工艺中应认真控制等离子体密度和能量,以尽可能地降低刻蚀损伤.

图 7 是刻蚀速率和 RMS 粗糙度随反应室压力的变化曲线.图 8 是不同反应室压力刻蚀条件下的

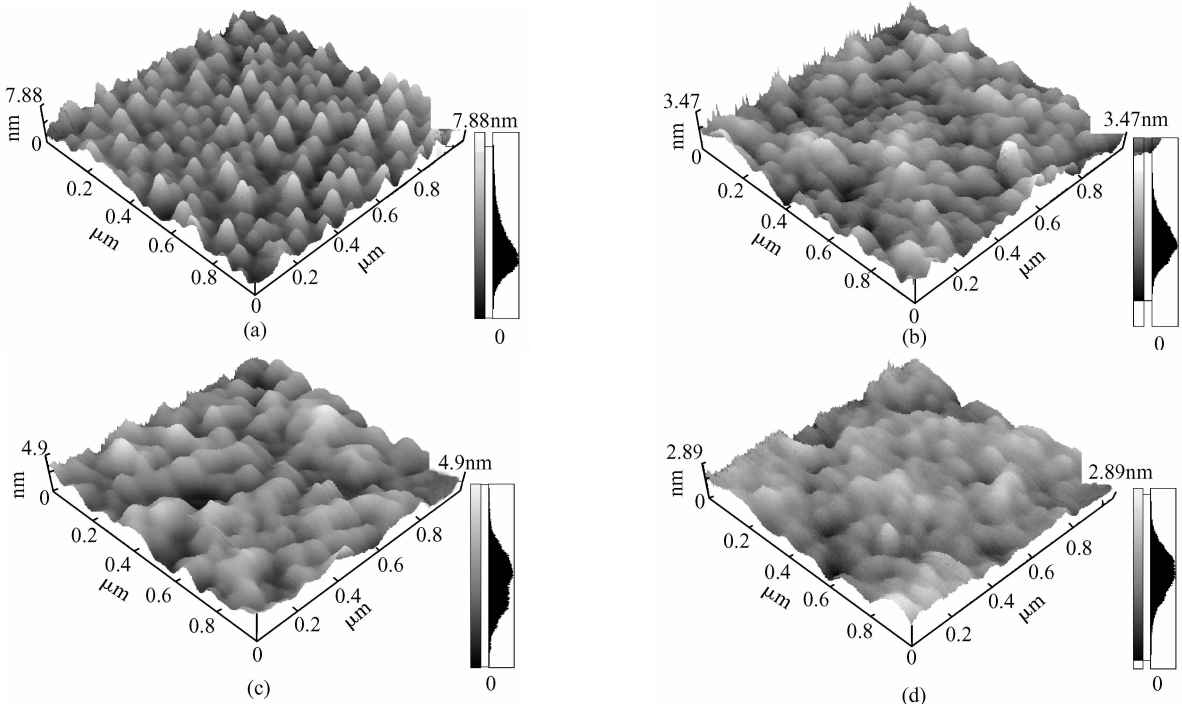


图 8 不同反应室压力刻蚀条件下的原子力显微镜照片 (a) 0.8Pa; (b) 1Pa; (c) 1.2Pa; (d) 1.5Pa
Fig. 8 AFM images of etched p-GaN at various pressures (a) 0.8Pa; (b) 1Pa; (c) 1.2Pa; (d) 1.5Pa

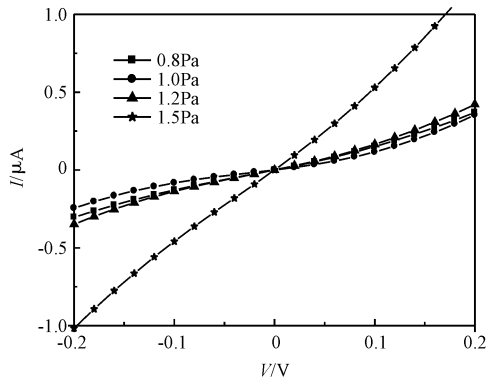


图 9 不同反应室压力刻蚀的 p-GaN 欧姆接触 $I-V$ 特性
Fig. 9 $I-V$ curves of ohmic contact on etched p-GaN at various pressures

原子力显微镜照片. ICP 功率和 RF 功率分别为 300 和 40W, Cl_2 和 N_2 流量分别为 30 和 10sccm. 可以看到, GaN 刻蚀速率随气体压力的增加先增大后减小, 这是因为当压力较小时, 随着气压的增大, 离子的平均自由程缩短, 离子间由于碰撞复合引起的等离子体浓度的减小会使得自偏压变大, 离子轰击能力增强, 因此刻蚀速率增大. 当气压继续增大, 刻蚀速率反而下降, 这可能是由于等离子体的浓度太低或者高压下反应产物的再沉积造成的.

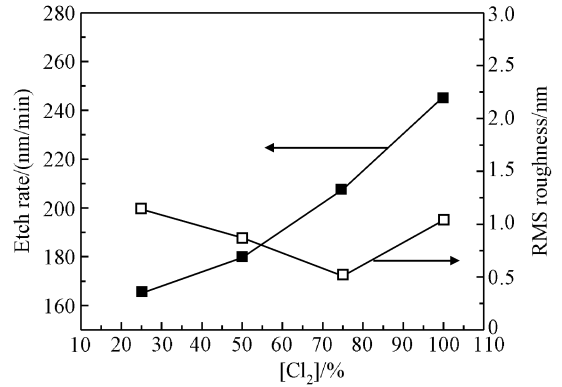


图 10 刻蚀速率和 RMS 粗糙度随 Cl_2 含量的变化
Fig. 10 Etch rates and RMS roughness as functions of Cl_2 percentage

图 9 为不同反应室压力下刻蚀的 p-GaN 欧姆接触的 $I-V$ 特性. 结果显示压力较大时, 欧姆接触特性较好. 如上所述, 这可能是因为, 当反应室压力较大时, 离子间由于碰撞复合会引起等离子体浓度的减小, 因此在表面造成的 N 空位会减少. 因此材料的电特性较好.

图 10 示出了刻蚀速率和 RMS 粗糙度随 Cl_2 百分比的变化曲线. 图 11 是不同 Cl_2 含量刻蚀条件下的原子力显微镜照片. ICP 功率和 RF 功率分别保

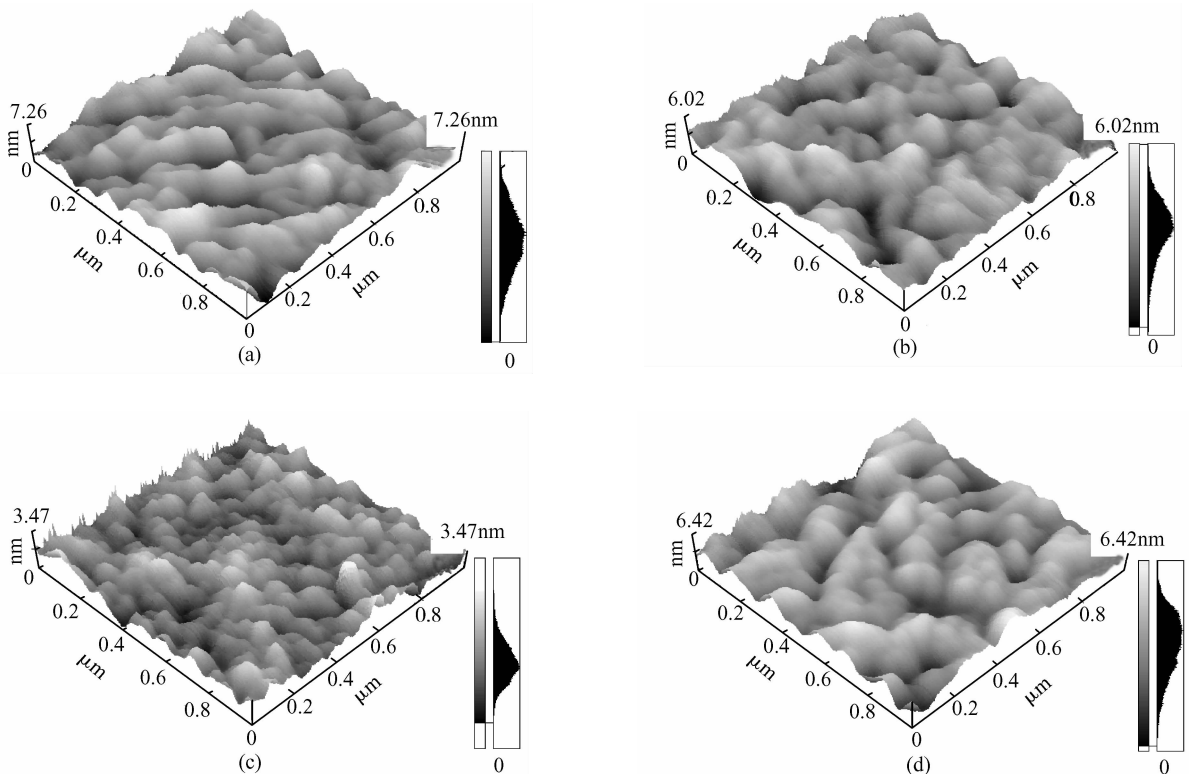


图 11 不同 Cl_2 含量刻蚀条件下的原子力显微镜照片 (a) 25%; (b) 50%; (c) 75%; (d) 100%
Fig. 11 AFM images of etched p-GaN at various Cl_2 percentages (a) 25%; (b) 50%; (c) 75%; (d) 100%

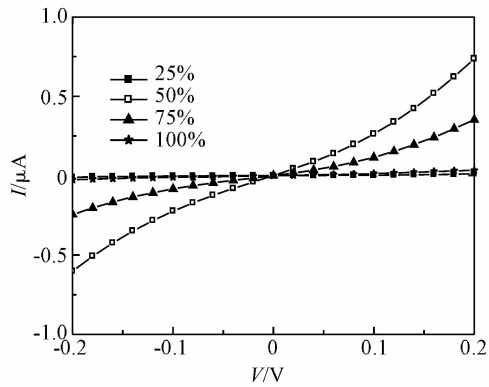


图 12 不同 Cl_2 含量刻蚀的 p-GaN 欧姆接触 I - V 特性

Fig. 12 I - V curves of ohmic contact on etched p-GaN at various Cl_2 percentages

持在 300W 和 40W 不变,反应室压力为 1Pa, Cl_2 和 N_2 的总流量为 40sccm. 结果显示:随着刻蚀气体 Cl_2 含量的加大,刻蚀速率明显增大;RMS 表面粗糙度先减小后增大. 其原因为:根据 Cl 基等离子体刻蚀 GaN 材料反应过程方程式:



第一步中,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.第二步中 N 原子相互结合形成容易析出的 N_2 .第三步中 Ga 原子和 Cl 离子生成易挥发的 GaCl_2 或 GaCl_3 .

可见,刻蚀是离子物理轰击溅蚀和化学反应腐蚀两种过程共同作用的结果:物理溅蚀是等离子体中被加速的高能离子对材料表面进行轰击从而溅蚀材料,它是与衬底偏压有关的物理过程,有利于刻蚀的各向异性,但是无弹性的离子轰击会对表面造成损伤,并且使刻蚀表面变得粗糙;而化学腐蚀是等离子体与材料表面发生化学反应,生成可挥发的刻蚀产物从而达到刻蚀目的.但在较低的离子能量下,化学反应不仅向下而且向两侧腐蚀,是各向同性的刻蚀,有利于表面平整.反应气体含量的增加会促进刻蚀过程中可挥发性刻蚀产物的生成,因此刻蚀速率随着 Cl_2 含量的增大而增大.当 Cl_2 含量从 25% 逐渐增大到 75% 时,化学反应腐蚀作用不断增强,因此表面趋于平坦,而当 Cl_2 含量为 100% 时,打断 Ga—N 键的离子轰击必须全部由 Cl_2 等离子体来完成,而 Cl_2 等离子体比 Cl_2/N_2 等离子体有更大的质量,轰击作用更强,因此均方根表面粗糙度增大.

图 12 是不同 Cl_2 含量刻蚀的 p-GaN 欧姆接触 I - V 特性.可以看出当 Cl_2 中等含量的时候,欧姆接触特性最好,这可能是由于,当 Cl_2 含量较低时,离子的物理轰击溅蚀为主要过程,而离子轰击会造成

更多 N 空位;当 Cl_2 含量较高时,主要由 Cl_2 等离子体来完成轰击作用,而撞击离子的质量是影响被刻蚀材料的电特性的重要因素,较大的离子质量会使材料的电特性严重退化.

4 结论

本文运用 Cl_2/N_2 等离子体系统,系统研究了 ICP 刻蚀中的 ICP 功率、RF 功率、反应室压力和 Cl_2 百分比对 p 型 GaN 材料的物理表面形貌和欧姆接触特性的影响.主要结论如下:

(1)随着 ICP 功率增大,虽然自偏压下降,离子能量也下降,但较大浓度的离子密度仍然会引入较大浓度的浅施主缺陷(如 N 空位),因此欧姆接触特性变差.

(2)原子力显微镜显示,在本文所用的刻蚀条件范围内,刻蚀并没有引起表面形貌较大的变化,刻蚀表面的方均根粗糙度分布在 0.384~1.142nm 范围内(未刻蚀表面的方均根粗糙度为 0.21nm).

(3)已刻蚀 p-GaN 材料的电特性与物理表面形貌(表面粗糙度)没有直观联系,刻蚀后欧姆接触特性变差更多地是因为刻蚀中浅施主能级的引入使表面附近空穴浓度降低所致.

(4)得出较优化的 p 型 GaN 刻蚀条件为:ICP 功率 200W,RF 功率 20W,反应室压力为 1.5Pa, Cl_2 和 N_2 流量均为 20sccm.该条件可直接应用于 GaN 双极晶体管(BJT 或 HBT)及台面整流器的台面刻蚀.

(5)既能实现一定刻蚀深度,又能使表面损伤较小的两步法刻蚀是可以实现的.即先以大功率较快的刻蚀速率刻蚀到要求的深度,再以小功率刻蚀出较低损伤的 p 型 GaN 表面,以实现较好的欧姆接触.

参考文献

- [1] Hao Yue, Peng Jun, Yang Yintang. SiC wide bandgap semiconductor technology. Beijing: Science Press, 2000: 259 (in Chinese)[郝跃,彭军,杨银堂.碳化硅宽带隙半导体技术.北京:科学出版社,2000:259]
- [2] Ren F, Han J, Hickman R, et al. GaN/AlGaIn HBT fabrication. Solid-State Electron, 2000, 44: 239
- [3] Lee K P, Zhang A P, Dang G, et al. Self-aligned process for emitter- and base-regrowth GaN HBTs and BJTs. Solid-State Electron, 2001, 45: 243
- [4] Cao X A, van Hove J M, Klaassen J J, et al. High temperature characteristics of GaN-based heterojunction bipolar transistors and bipolar junction transistors. Solid-State Electron, 2000, 44: 649
- [5] Rong B, Cheung R, Gao W, et al. Effects of reactive ion etching on the electrical characteristics of GaN. J Vac Sci Technol B, 2000, 18(6): 3467

- [6] Cao X A, Zhang A P, Dang G T, et al. Schottky diode measurements of dry etch damage in n- and p-type GaN. *J Vac Sci Technol A*, 2000, 18(4):1144
- [7] Shul R J, Zhang L, Baca A G, et al. High-density plasma-induced etch damage of GaN. *Proceedings of Materials Research Society Symposium*, 1999, 573:271
- [8] Pearton S J, Abernathy C R, Ren F, et al. Ar⁺ ion milling characteristics of III-V nitrides. *J Appl Phys*, 1994, 76(2):1210
- [9] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng, et al. *Physics of semiconductors*. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1997; 45 (in Chinese) [刘恩科, 朱炳升, 罗晋生, 等. 半导体物理学. 北京: 国防工业出版社, 1997: 45]
- [10] Cao X A, Zhang A P, Dang G T, et al. Plasma damage in p-GaN. *J Electron Mater*, 2000, 29(3):256
- [11] 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 N₂ plasma. *J Appl Phys*, 2000, 87(11):7667

Study on ICP Etching Induced Damage in p-GaN*

Gong Xin[†], Lü Ling, Hao Yue, Li Peixian, Zhou Xiaowei, and Chen Haifeng

(Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Institute of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The plasma-induced damage for p-GaN by inductively coupled plasma(ICP) etching with Cl₂/N₂ gas chemistry was studied. Effects of ICP power, RF power, chamber pressure, and Cl₂ percentage on the physical and electrical characteristics of p-GaN were investigated. The results show that the surface roughness is relatively independent of these etching conditions and shows fairly smooth morphology (RMS<1.2nm); the surface morphology has no direct effect on the electrical characteristics of p-GaN, and the deterioration of ohmic contact to the etched p-GaN is due to a decrease in hole concentration in the near-surface region through the creation of shallow donor states rather than surface roughening.

Key words: GaN; inductively coupled plasma etching; plasma damage

PACC: 7280E; 6170

Article ID: 0253-4177(2007)07-1097-07

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 51327020301)

[†] Corresponding author. Email: xgong@mail.xidian.edu.cn

Received 13 December 2006, revised manuscript received 26 January 2007