

Cl₂ 基气体感应耦合等离子体刻蚀 GaN 的工艺

刘北平^{1,2,†} 李晓良¹ 朱海波^{1,2}

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 采用 Cl₂/He 对 GaN 基片进行感应耦合等离子体刻蚀, 并比较了相同条件下使用 Cl₂/He, Cl₂/Ar 对 GaN 基片进行刻蚀的优劣. 实验中通过改变 ICP 功率、直流自偏压、气体总流量和气体组分等方式, 讨论了这些因素对刻蚀速率和刻蚀后表面粗糙度的影响. 实验结果表明, 用 Cl₂/He 气体刻蚀 GaN 材料可以获得较高的刻蚀速率, 最高可达 420nm/min. 同时刻蚀后 GaN 材料的表面形貌也较为平整, 均方根粗糙度 (RMS) 可达 1nm 以下. SEM 图像显示刻蚀后表面光洁, 刻蚀端面陡直. 最后比较了相同条件下使用 Cl₂/He, Cl₂/Ar 刻蚀 GaN 基片的刻蚀速率、表面形貌, 以及制作 n 型电极后的比接触电阻.

关键词: 干法刻蚀; 感应耦合等离子体; GaN; 刻蚀速率; Cl₂/He; Cl₂/Ar

EEACC:2550E

中图分类号: TN205

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)07-1335-04

1 引言

GaN 材料是一种宽带隙 ($E_g = 3.4\text{eV}$) 半导体材料, 它具有优良的物理和化学性质, 如大的热导率和介电常数, 高的电子饱和速率和化学稳定性等. 因而它在短波长发光器件、大功率微波器件和高温电子器件方面具有广阔的应用前景.

在 GaN 发光二极管器件制作过程中, 刻蚀是一项很重要的工艺, 因为需要刻蚀掉表面的一部分 p 型层, 露出 n 型层, 从而制作 n 型电极. 由于 GaN 在常温下化学性质非常稳定, 难于用湿法对其进行刻蚀, 所以对 GaN 材料大多采用干法刻蚀. 感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀手段与其他刻蚀手段如反应离子刻蚀 (RIE)、磁控反应离子刻蚀 (MIE)、电子回旋共振刻蚀 (ECR) 等相比具有反应离子密度高、均一性好、成本低、易于控制等优点而得到广泛应用^[1,2]. 通常使用 Cl₂ 基气体对 GaN 进行 ICP 刻蚀, 如: Cl₂/Ar, Cl₂/N₂, Cl₂/He 等^[3~5]. 例如 Kim 等人曾经采用 Cl₂/Ar 作为刻蚀气体, 可以获得 400nm/min 的刻蚀速率^[4]. Sheu 等人采用 Cl₂/N₂ 对 GaN 材料进行刻蚀, 最高可以得到 833nm/min 的刻蚀速率^[1]. 相对于 Cl₂/Ar 和 Cl₂/N₂, 使用 Cl₂/He 刻蚀 GaN, 会得到更加平整的表面. 因此在本文中我们主要采用 Cl₂/He 来对 GaN 进行 ICP 刻蚀, 并讨论了 ICP 功率、直流自偏压 (DC bias)、气体总流量以及气体组分对刻蚀速率和刻蚀后表面形貌的影响, 本文最后比较了相同条件下使用 Cl₂/He, Cl₂/Ar 刻

蚀 GaN 材料的刻蚀速率、表面形貌, 以及在刻蚀后表面上制作电极后的比接触电阻.

2 实验

2.1 掩膜的制作

刻蚀样品为 GaN 衬底, 表面的均方根粗糙度 (RMS) 为 0.3nm. 掩膜为 MgZnO (厚 750nm) 或 Ni (厚 200nm). 其中 MgZnO 采用电子束蒸发反应的方法沉积在 GaN 基片表面 (Ni 则采用电子束蒸发镀膜的方法). 然后光刻, 光刻胶采用正胶 S6809. 之后再把基片浸入磷酸中 3min (如掩膜为 Ni 则浸入浓硝酸 水 = 1 : 10 中 15min) 后取出, 用去离子水清洗干净.

2.2 感应耦合等离子体刻蚀

ICP 刻蚀采用中国科学院微电子中心制造的 ICP-98C 型等离子刻蚀机. 反应室直径为 300mm; 射频 ICP 功率源和射频偏置 (RF chuck) 功率源均为 13.56MHz, 额定最大功率分别为 1500W 和 500W; 背景真空度为 2×10^{-3} Pa, 真空系统抽速固定^[6], 刻蚀时的反应室压强为 0.2 ~ 1Pa (随气体总流量变化). 采用 Cl₂/He 作为等离子气体在不同的 ICP 功率 (300 ~ 700W)、直流自偏压 (100 ~ 300V)、气体总流量 (10 ~ 50sccm) 和气体组分等条件下进行了刻蚀.

† 通信作者. Email: liubp@mail.sim.ac.cn

2005-12-26 收到, 2006-02-20 定稿

2.3 刻蚀后分析

采用 Taylor-Hopson 型台阶仪测定刻蚀深度,采用 AFM(Park Scientific Instruments cp)测量刻蚀表面粗糙度,利用 SEM(日立电器有限公司)观察样品的刻蚀端面.

2.4 制作 n 型电极

采用电子束蒸发法在刻蚀后的 GaN 表面上制作电极,结构为 Ti(20nm)/Al(20nm)/Ni(20nm)/Au(100nm),接着把样品放入快速退火炉中合金.实验中采用两步合金法,先在 550 的条件下合金 10min,然后在 800 的条件下退火 10s.这样既能使 Ti,Al,GaN 反应,消除表面的氧化层和玷污层,形成欧姆接触,又可以不破坏接触的表面形貌^[7,8].比接触电阻的测量采用圆环传输线方法(circular transmission line model)测出^[9].

3 结果与讨论

由于 Ar,N 的原子量大于 He,所以在相同条件下刻蚀 GaN 时,由于物理刻蚀的增强,会使得刻蚀

后表面粗糙度变大.实验中使用 Cl₂/Ar 刻蚀 GaN 材料,结果相同条件下所得到的刻蚀速率和表面平整度均劣于使用 Cl₂/He 所得到的,这可以与 InP 的刻蚀相比较,因为 InCl_x 较难脱附,所以使用 Cl₂/Ar 作为刻蚀气体将会得到更好的结果^[6].当 ICP 功率 = 500W,DC bias = 200V,Cl₂/Ar = 32sccm/8sccm 刻蚀 GaN 材料时,刻蚀速率为 370nm/min,RMS = 3.84nm.低于同等条件下用 Cl₂/He 刻蚀 GaN 材料所得到的刻蚀速率和表面平整度(分别为 380nm/min 和 0.68nm).在制作 GaN-LED 时,需刻蚀外延片,使其露出 n-GaN,从而制作 n 型电极.所以刻蚀的好坏直接关系到 n 型电极的优劣和器件的性能.选择 Cl₂/He 作为刻蚀气体将有助于提高发光管的性能.

标准的刻蚀条件是 ICP 功率为 500W,直流自偏压为 200V,气体流量 Cl₂/He 为 32sccm/8sccm.在未说明反应条件时,刻蚀条件均为标准条件.标准条件下,Ni,MgZnO 与 GaN 选择刻蚀比分别为 1:40和 1:10.

由图 1(a)可以看出,当其他条件为标准条件,改变 ICP 功率使其由 300W 增加到 700W 时,刻蚀

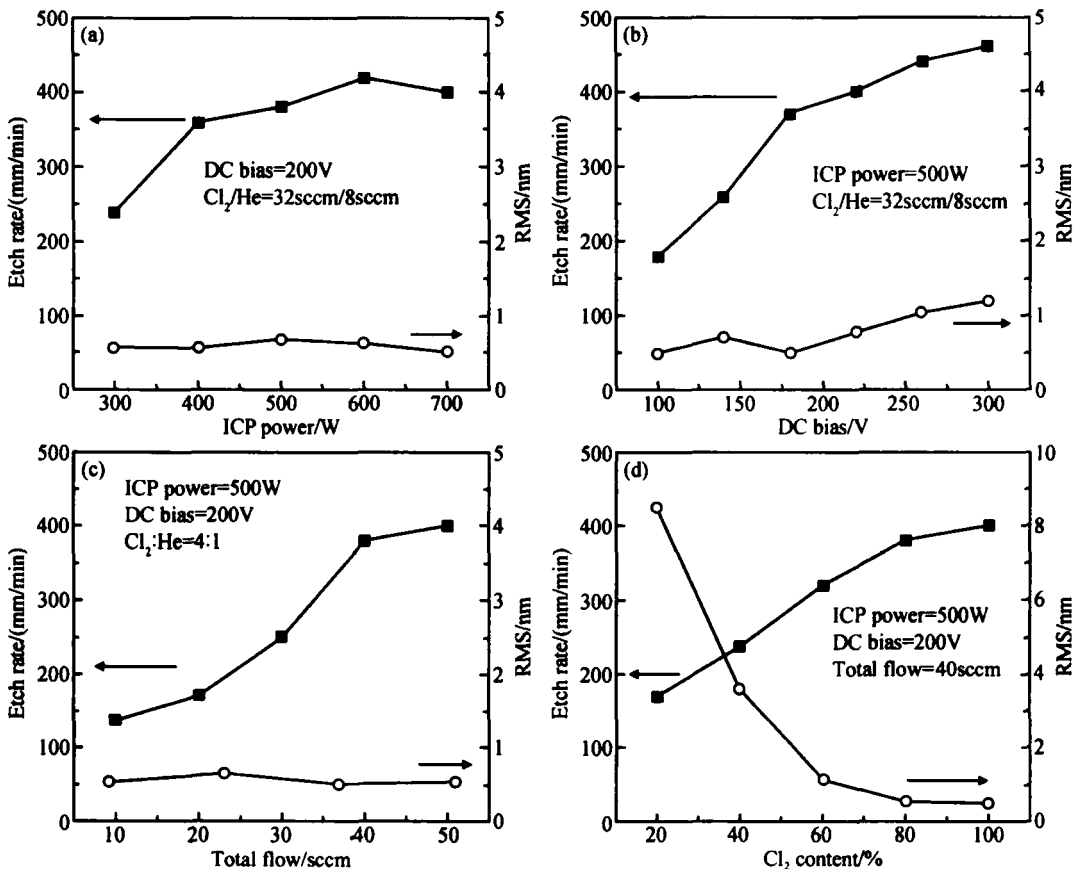


图 1 GaN 的刻蚀速率与 ICP 功率(a),直流自偏压(b),气体总流量(c)和 Cl₂/He 气体组分(d)的关系

Fig. 1 Etch rates of GaN as functions of ICP power (a),DC bias (b),total flow (c),content of Cl₂ in Cl₂/He (d)

速率先增大,最大的刻蚀速率约为 420nm/min. 这是因为当 ICP 功率增加时,反应室里的等离子体密度和活性 Cl 密度也随着增大,从而物理刻蚀和化学刻蚀作用都得到增强. 当 ICP 增加至 700W 时,刻蚀速率略有下降,这可能是 He 电离的增强使得反应室里活性 Cl 的浓度下降所导致的^[10]. 刻蚀后的表面形貌较为平整,均方根粗糙度均在 0.5nm 左右.

由图 1(b)可以看出,固定其他条件为标准条件而改变直流自偏压使其由 100V 增加到 300V 时,刻蚀速率随之增大. 这是因为离子的入射动能增大,增强了物理刻蚀,同时由于打断化学键的作用增强,也大大加速了化学刻蚀的速率^[8]. 当直流自偏压大于 180V 时,物理刻蚀严重影响了刻蚀后表面形貌的平整性,RMS 随着直流自偏压的增大而增大.

由图 1(c)可以看出,当固定其他条件不变,气体总流量从 10sccm 增加到 40sccm 时,刻蚀速率迅速增大,当气体总流量继续增加到 50sccm 后,刻蚀速率略有增大. 表面粗糙度随气体总流量的增加而变小. 这是活性 Cl 密度增大使得化学刻蚀增强所致.

由图 1(d)可以看出,当 Cl₂ 所占比例增加时,GaN 的刻蚀速率随之增大. 这主要是因为活性 Cl 的浓度和密度都随之增大,使得化学刻蚀大大增强,从而刻蚀速率上升,同时化学刻蚀的增强会使 Ga 优先刻蚀,从而会出现离子研磨效应^[2,11],引起表面粗糙度下降.

图 2 是刻蚀后 GaN 表面的 AFM 扫描图像,刻蚀条件为: ICP 功率 = 500W,直流自偏压 = 180V, Cl₂/ He = 32sccm/ 8sccm. 由图可见,表面很平整,均方根粗糙度为 0.36nm.

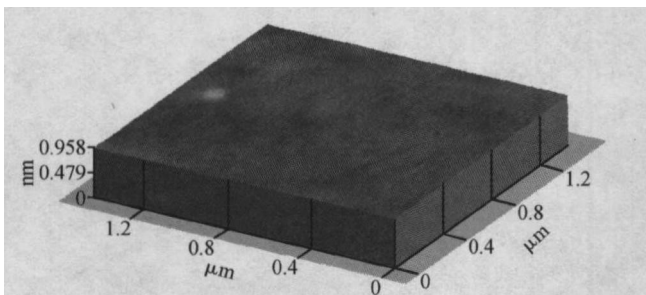


图 2 ICP 功率为 500W,DC bias = 180V, Cl₂/ He = 32sccm/ 8sccm 条件下,刻蚀后 GaN 的 AFM 图像
Fig.2 AFM image of the surface of GaN etched at the condition of ICP power = 500W,DC bias = 180V, and Cl₂/ He = 32sccm/ 8sccm

图 3 给出了 GaN 样品刻蚀后(掩膜已去除)的 SEM 形貌照片. 照片显示被刻蚀面比较平整光洁,刻蚀侧壁陡直.

图 4 给出了电极的 I-V 特性,实验中我们采取了圆环传输线方法来测比接触电阻. 经过计算, Cl₂/

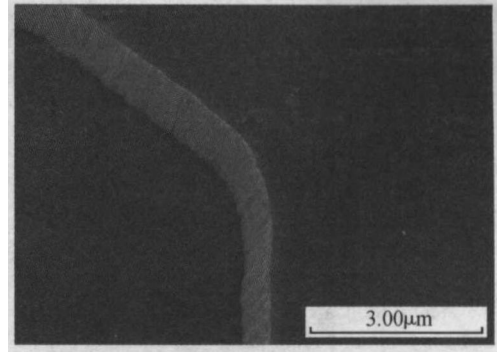


图 3 500W ICP 功率,200V 自偏压, Cl₂/ He = 32sccm/ 8sccm 条件下,刻蚀后 GaN 的 SEM 照片
Fig.3 SEM photograph of GaN etched in 500W ICP power,200V DC bias, Cl₂/ He = 32sccm/ 8sccm

He, Cl₂/ Ar 刻蚀后的表面上电极比接触电阻分别为 $8.9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ 和 $1.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$.

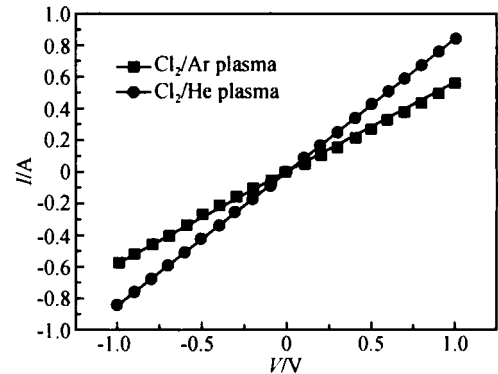


图 4 Cl₂/ Ar, Cl₂/ He 刻蚀后表面上电极的 I-V 特性
Fig.4 I-V curves of the GaN contact in Cl₂/ Ar and Cl₂/ He plasma etched samples

4 结论

本文探讨了 Cl₂/ He 和 Cl₂/ Ar 感应耦合等离子体刻蚀 GaN 材料的优劣,并得出了在使用 Cl₂/ He 刻蚀 GaN 时, ICP 功率、直流自偏压、气体总流量和 Cl₂/ He 气体组分等因素对刻蚀速率和粗糙度的影响. 实验结果表明,使用 Cl₂/ He 刻蚀 GaN 材料可以得到较高的刻蚀速率和较平整的表面形貌,最高刻蚀速率可达 420nm/min,最小 RMS 为 0.36nm. 深宽比和各向异性度也较好. 此外,在刻蚀后的表面镀电极,比接触电阻较小(略小于使用 Cl₂/ Ar 刻蚀的情况),可用于 GaN 器件工艺.

参考文献

[1] Sheu J K, Su Y K, Chi G C, et al. Inductively coupled plasma etching of GaN using Cl₂/ Ar and Cl₂/ N₂ gases. J Appl Phys, 1999, 85(3) :1970

- [2] Shul R J ,McClellan G B,Casalnuovo S A ,et al. Inductively coupled plasma etching of GaN. *Appl Phys Lett* ,1996 ,69(8) : 1119
- [3] Im Y H ,Park J S ,Hahn Y B ,et al. Cl₂-based dry etching of GaN films under inductively coupled plasma conditions. *J Vac Sci Technol A* ,2000 ,18(5) :2169
- [4] Kim H S ,Yeom G Y,Lee J W ,et al. A study of GaN etch mechanisms using inductively coupled Cl₂/ Ar plasmas. *Thin Solid Films* ,1999 ,341(2) :180
- [5] Lin Y C,Chang S J ,Su Y K ,et al. Inductively coupled plasma etching of GaN using Cl₂/ He gases. *Materials Science and Engineering B* ,2003 ,98(1) :60
- [6] Zhu Haibo ,Li Xiaoliang. Inductively coupled plasma etching of InP in Cl₂/ Ar chemistries. *Journal of Functional Materials and Devices* ,2005 ,11(3) :433 (in Chinese) [朱海波,李晓良. Cl₂/ Ar 感应耦合等离子体刻蚀 InP 工艺研究. *功能材料与器件学报* ,2005 ,11(3) :433]
- [7] Chen Zhizhong ,Qin Zhixin ,Hu Xiaodong. Study of Ti/ Al/ Ni/ Au Ohmic contact to n-type GaN. *Chinese Press of Hi-tech* ,2004 ,11(2) :36 (in Chinese) [陈志忠,秦志新,胡晓东. Ti/ Al/ Ni/ Au 与 n 型 GaN 的欧姆接触研究. *高技术通讯* ,2004 ,11(2) :36]
- [8] Guan Zhibin ,Wang Li ,Jiang Fengyi ,et al. Study of two-step depositing Ti/ Al/ Ti/ Au Ohmic contact to n-type GaN. *Journal of Functional Materials and Devices* ,2003 ,9(3) :347 (in Chinese) [管志斌,王立,江风益,等. 两步镀膜 Ti/ Al/ Ti/ Au 的 n 型 GaN 欧姆接触研究. *功能材料与器件学报* ,2003 ,9(3) :347]
- [9] Hua Wenyu ,Chen Cunli. Improved test pattern for measuring contact specific resistance of metal/ thin semiconductor layer. *Chinese Journal of Semiconductors* ,1997 ,18(11) :872 (in Chinese) [华文玉,陈存礼. 用改进的图形结构测量金属/ 薄层半导体的接触电阻率. *半导体学报* ,1997 ,18(11) :872]
- [10] Cho B C ,Im Y H ,Hahn Y B ,et al. Inductively coupled plasma etching of doped GaN films with Cl₂/ Ar discharges. *J Electrochem Soc* ,2000 ,147(10) :3914
- [11] Cheung R ,Rong B ,van der Drift E ,et al. Etch mechanism and etch-induced effects in the inductively coupled plasma etching of GaN. *J Vac Sci Technol B* ,21(4) :1268

Cl₂-Based Dry Etching of GaN Using Inductively Coupled Plasma

Liu Beiping^{1,2,†}, Li Xiaoliang¹, and Zhu Haibo^{1,2}

(1 *State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)
(2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract : Inductively coupled plasma (ICP) etching of GaN is carried out with Cl₂/ He and Cl₂/ Ar. The effects of ICP power, DC bias, total flow rate, and Cl₂/ He ratio on the etch rate and surface morphology are discussed when etching GaN using Cl₂/ He. Experimental results indicate that the etching rate is very high, and the maximum reaches 420nm/ min. The etched surface is very smooth, with an RMS less than 1nm. An SEM photo shows a smooth etched surface and vertical sidewall. The difference between Cl₂/ He and Cl₂/ Ar etching under the same conditions, including etch rate, surface morphology, and the effect of the n-type contact on the etched surface, is investigated.

Key words : dry etch; ICP; GaN; etch rate; roughness; Cl₂/ He; Cl₂/ Ar

EEACC : 2550E

Article ID : 0253-4177(2006)07-1335-04

† Corresponding author. Email :liubp@mail.sim.ac.cn

Received 26 December 2005, revised manuscript received 20 February 2006