

SiC 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 的 ICP 通孔刻蚀

任春江[†] 陈堂胜 柏 松 徐筱乐 焦 刚 陈 辰

(南京电子器件研究所, 单片集成电路与模块国家重点实验室, 南京 210016)

摘要: 利用 ICP 对研制的 SiC 衬底上 AlGaIn/GaN HEMT 刻蚀获得了深度为 50 μm 的接地通孔. 器件通孔制作前首先用机械研磨的方法将衬底减薄至 50 μm , 在背面蒸发 Ti/Ni 并电镀 Ni 至 3 μm 作为刻蚀阻挡层; 之后利用 SF₆/O₂ 混合气体的电感耦合等离子体对 SiC 衬底进行了刻蚀; 最后将 Cl₂ 和 BCl₃ 混合气体的 ICP 刻蚀技术运用于 AlGaIn/GaN 外延材料的刻蚀, 完成了深度为 50 μm 的 AlGaIn/GaN HEMT 通孔制作, 通孔侧壁具有一定的斜率, 适合良好的金属覆盖以形成器件正面和背面的连接. 这一技术非常适合 AlGaIn/GaN HEMT 及其单片集成电路的研制.

关键词: 碳化硅; 六氟化硫; 电感耦合等离子体刻蚀

PACC: 5275R **EEACC:** 2550E; 2550G

中图分类号: TN205 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)12-2408-04

1 引言

作为第三代宽禁带化合物半导体器件的 AlGaIn/GaN HEMT 在功率输出、频率特性等方面具有优良的特性, 使其在高温、高频、大功率器件方面有着很好的应用前景, 目前在国内外得到了广泛的研究. 由于缺少单晶作为衬底, 目前 AlGaIn/GaN 异质结材料都采用异质外延得到, 所用的衬底材料主要有蓝宝石、Si 和 SiC. 蓝宝石热导率低, 无法满足 AlGaIn/GaN HEMT 大功率器件的散热要求, 限制了器件的功率输出能力; 而 Si 则无法实现半绝缘, 制约了 Si 上 AlGaIn/GaN HEMT 的频率特性, 无法满足器件的高频应用要求; SiC 由于与 GaN 具有较小的晶格失配, 在 4H 或者 6H-SiC 半绝缘衬底上容易生长获得低缺陷密度的 GaN 外延材料, 结合 SiC 高的热导率, 将有助于发挥 AlGaIn/GaN HEMT 的微波性能, 因而 SiC 是 AlGaIn/GaN HEMT 进行高性能应用时首选衬底材料.

GaAs 微波器件中, 普遍采用通孔接地的形式以减小源端的寄生电感, 提升器件在高频工作时的增益, 同时通孔接地也是实现基于 GaAs 器件的微波单片集成电路所不可或缺的结构形式. 对于 AlGaIn/GaN HEMT, 同样也需要通孔接地, 以改善器件的频率特性, 方便微波单片集成电路的设计制作. 但由于 SiC 和 GaN 材料本身的惰性, 使室温下一般的化学物质无法对它们进行快速有效地腐蚀, 只能采用基于等离子体的干法刻蚀技术刻蚀形成所需的接地通孔. 目前对于 SiC 上进行通孔的干法刻蚀研究已有很多文献报道^[1,2], 且 SF₆/O₂ 混合气体是常用的刻蚀气体, 而对于 SiC 衬底上的 AlGaIn/GaN HEMT 通孔的制作报道则不多. 本文则利用 SF₆/O₂ 混合气体对研制的 6H-SiC 衬底上 AlGaIn/

GaN HEMT 进行了 ICP 通孔刻蚀的研究.

2 实验

实验中的材料为采用 MOCVD 技术生长了 AlGaIn/GaN 异质外延结构的半绝缘 6H-SiC 衬底, 其中 GaN 外延层的厚度为 2 μm , AlGaIn 势垒层的厚度为 25nm, 势垒层的 Al 组分为 0.25. AlGaIn/GaN HEMT 器件工艺中首先是源漏欧姆接触制作, 采用电子束蒸发 Ti/Al/Ni/Au 多层金属, 并在 870 $^{\circ}\text{C}$, N₂ 气氛中进行了 30s 快速热退火, 以形成良好的欧姆接触; 之后采用硼离子注入实现了器件间的隔离; 栅条制作中采用了电子束刻写, 肖特基势垒接触采用 Ni/Au; 最后用 PECVD 淀积一层 100nm 的 SiN 介质, 以实现器件的钝化和保护, 电镀 Au 层对器件各电极进行加厚并完成空气桥制作, 从而完成了器件的正面工艺.

为实现通孔刻蚀, 器件正面工艺完毕后利用机械研磨的方法将衬底减薄至 50 μm , 之后在背面光刻并蒸发 Ti/Ni(20nm/100nm) 后进行剥离得到所需图形. 其中 Ni 作为刻蚀的阻挡层, Ti 的作用是增强金属与半导体的粘附性. 在通孔刻蚀过程中, 100nm 的 Ni 阻挡层是不够厚的, 为此进行电镀将其加厚到了 3 μm . 实验中 SiC 衬底利用 SF₆/O₂ 混合气体的 ICP 进行刻蚀, 而鉴于氟基气体与 GaN 反应的产物具有低挥发性, AlGaIn/GaN 异质外延层采用 Cl₂/BCl₃ 混合气体的 ICP 进行刻蚀^[3]. 研究表明, SiC 刻蚀中 SF₆ 与 O₂ 的流量比控制在 4:1 左右能够得到最佳的刻蚀速率^[2,4], 故在实验中将固定 SF₆ 和 O₂ 的流量比为 4:1, 刻蚀过程中 ICP 功率为 200~800W, 衬底的直流自偏压则在 -100~-700V 之间, SF₆ 和 O₂ 总气体流量为在 10~100sccm 之间, 反应室内压力固定为 0.665Pa, 样品放置在采用

[†] 通信作者. Email: rencj@tom.com
2008-06-11 收到, 2008-08-13 定稿

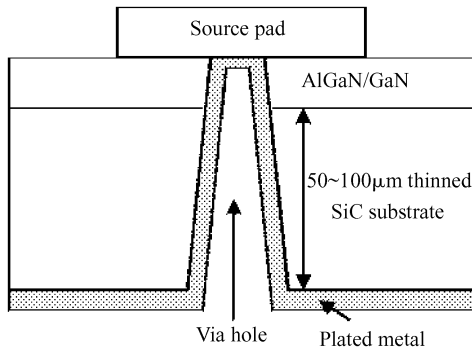


图 1 AlGaIn/GaN HEMT 接地通孔示意图

Fig.1 Schematic of via hole for AlGaIn/GaN HEMT

He 气冷却的卡盘上,卡盘由金属铝制成.刻蚀过程中刻蚀速率为刻蚀深度与刻蚀时间的比值,而刻蚀选择比则由刻蚀深度与刻蚀去除掩模厚度的比值获得.

3 结果与讨论

图 1 所示为 AlGaIn/GaN HEMT 源电极采用通孔接地后的情形,SiC 衬底被减薄至 50~100µm 后再通过刻蚀 SiC 衬底和 GaN 缓冲层获得接地通孔,并在通孔侧壁覆盖金属使器件源电极与背面金属层相连,通孔侧壁需要具有一定的斜率,以保证金属层能形成良好的覆盖. AlGaIn/GaN HEMT 通孔刻蚀中需要克服的问题,首先是如何在 SiC 衬底上获得具有高深宽比的图形并保证其刻蚀速率;其次是如何提高刻蚀的选择比,以保证电镀的 Ni 掩模起到掩蔽作用;最后就是如何对 AlGaIn/GaN 异质外延层进行快速刻蚀.由于氟基等离子体与 III 族氮化物形成的反应物具有低挥发性,无法对 AlGaIn/GaN 异质外延层形成有效的刻蚀,而氯基气体可对 III 族氮化物形成快速刻蚀,故本实验中先用 SF₆/O₂ 混合气体的等离子体完成对 SiC 衬底刻蚀,再利用 Cl₂/BCl₃ 混合气体的等离子体对 AlGaIn/GaN 异质外延层进行刻蚀.

图 2 所示为固定衬底直流自偏压 -400V、反应室压力 0.665Pa 时,刻蚀 SiC 速率与 ICP 功率的关系,刻蚀还针对不同的气体流量进行.增加 ICP 功率将增加反应室中反应离子的密度,加速了反应离子与 SiC 的反应,

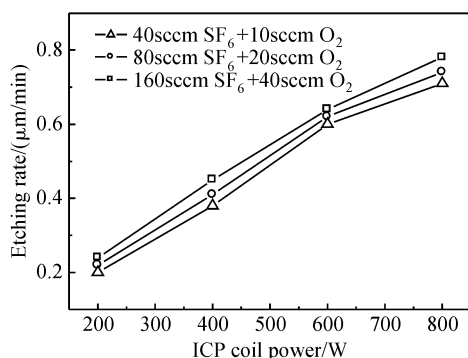


图 2 SiC 刻蚀速率与 ICP 功率的关系

Fig.2 SiC etching rate as a function of ICP coil power

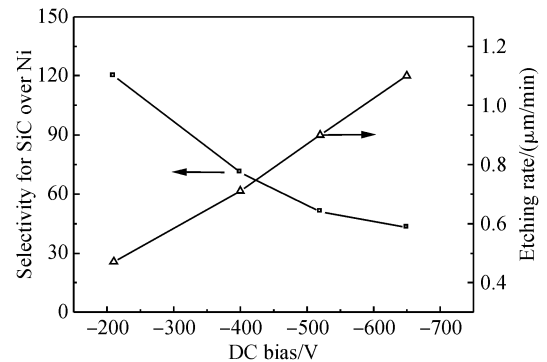


图 3 刻蚀 SiC 与 Ni 的选择比及 SiC 刻蚀速率与衬底直流自偏压的关系
Fig.3 Selectivity for SiC over Ni and SiC etching rate as a function of DC self-bias

从而出现图中刻蚀速率随着 ICP 功率的增加而逐步增长的情况.刻蚀还与气体流量有关,增加气体流量也就同时增加了参与反应物质的数量,从而加快了刻蚀速率,但由于通孔刻蚀需要较长的时间,将消耗大量的气体,实际应用中还需要考虑费效比来选择合适的气体流量.

图 3 所示为 ICP 功率为 800W、反应室压力为 0.665Pa 以及 SF₆ 和 O₂ 气体总流量为 20sccm 时,刻蚀 SiC 与 Ni 的选择比及 SiC 刻蚀速率与衬底直流偏压的关系.图中 SiC 的刻蚀速率随着直流自偏压的提高而逐步增加,而 SiC 与 Ni 的刻蚀选择比则逐步下降,这是因为随着直流自偏压的升高,等离子体的能量也相应增长,从而同时加快了对 SiC 和 Ni 的刻蚀速率,但由于 Ni 刻蚀速率的增加快于 SiC 刻蚀速率的增加,导致 SiC 与 Ni 刻蚀选择比下降.直流自偏压为 -650V 时,刻蚀 SiC 速率达到了 1.1µm/min,而此时选择比依然达到 43,图 3 的结果表明了利用实验中电镀的 Ni 掩模完全胜任 100µm 通孔的刻蚀.

图 2 和图 3 中的刻蚀速率是在刻蚀深度不大于 20µm 的情况下获得的.实验表明,当刻蚀进一步增加时,特别是在具有高深宽比通孔的刻蚀过程中,随着刻蚀深度增加,刻蚀速率呈缓慢下降趋势.这是因为随着刻蚀深度的增加,增加了等离子体进入通孔以及反应生成物被输运走的难度,从而导致刻蚀速率随着刻蚀深度增加而下降.图 4 所示为刻蚀速率与刻蚀深度的关系,刻蚀中 ICP 功率 800W,衬底直流自偏压 -650V,反应室压力 0.67Pa, SF₆ 和 O₂ 总气体流量 20sccm.

图 5 所示为利用图 4 中的条件在未减薄的 SiC 衬底上利用前面电镀的 3µm 厚的 Ni 作为阻挡层刻蚀得到的 100µm 深通孔剖面的扫描电镜图.从图中可以看出通孔侧壁具有一定的斜率且侧壁表面光滑,完全能够保证在其上形成良好的金属覆盖以形成器件正面与背面的连接.

前面利用基于 SF₆/O₂ 混合气体的 ICP 刻蚀方法在 SiC 衬底上获得了快的刻蚀速率和高的选择比,但要实现对 AlGaIn/GaN HEMT 的通孔刻蚀,除刻蚀衬底外还需要对 AlGaIn/GaN 外延层进行刻蚀.刻蚀 Al-

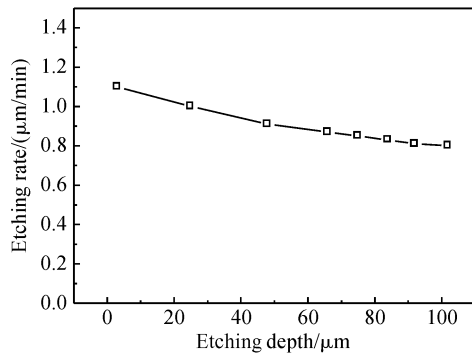


图 4 刻蚀速率与刻蚀深度的关系 ICP 功率 800W, 衬底直流自偏压 -650V, 反应室压力 0.67Pa, SF_6/O_2 气体流量 20sccm.

Fig.4 Etch depth dependence of etching rate ICP coil power = 800W, substrate bias = -650V, chamber pressure = 0.67Pa, SF_6/O_2 gas flow rate = 20sccm.

GaN/GaN 外延层中采用的条件如下: Cl_2 和 BCl_3 的流量比为 4 : 1, ICP 功率 600W, 衬底直流自偏压 -250V, 反应室内压力 1.07Pa, Cl_2 和 BCl_3 总气体流量为 100sccm. 刻蚀结果表明, 这一条件下 AlGaIn 和 GaN 的刻蚀选择比接近 1, 而刻蚀速率为 0.3~0.4 $\mu\text{m}/\text{min}$, 对于 2~3 μm 的 AlGaIn/GaN 外延层, 在这一刻蚀速率下只需 10min 左右的刻蚀时间, 因而这一速率是可以接受的. 刻蚀过程中同时还发现 Cl_2/BCl_3 混合气体的电感耦合等离子体对 Ti 和 Ni 等金属也形成较快的刻蚀速率, 不过幸运的是它对 SiC 的刻蚀速率较慢 (<0.2 $\mu\text{m}/\text{min}$), 在对 AlGaIn/GaN 外延层刻蚀的过程中刻蚀 SiC 的厚度不会大于 3 μm , 对衬底的总厚度将不会造成太大的影响, 因而不需要额外的掩膜来保护 SiC 衬底.

图 6 为最终在衬底减薄了的 AlGaIn/GaN HEMT 背面刻蚀得到的通孔金属化后的扫描电镜图. 其中 SiC 衬底刻蚀过程中采用的 ICP 上电极功率为 800W, 衬底

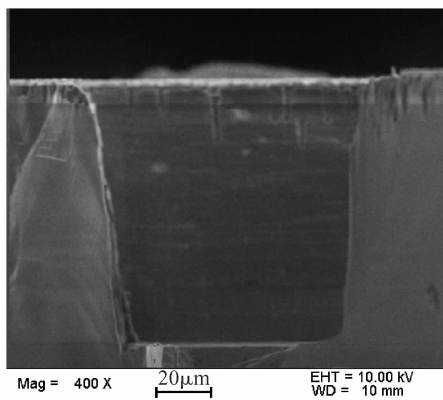


图 5 SiC 衬底上 100 μm 深通孔剖面的扫描电镜图

Fig.5 SEM micrograph for 100 μm deep via hole on SiC substrate

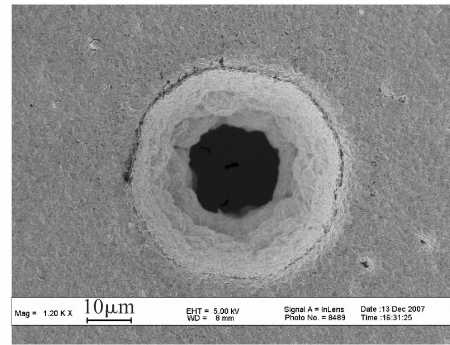


图 6 AlGaIn/GaN HEMT 中 50 μm 深通孔金属化后的扫描电镜图
Fig.6 SEM micrograph of metalized 50 μm deep via hole for an AlGaIn/GaN HEMT

直流自偏压 -200V 左右, 反应室压力 0.67Pa, SF_6 和 O_2 总气体流量 20sccm, 此时刻蚀 SiC 的速率约为 0.4 $\mu\text{m}/\text{min}$. 采用这一较低的刻蚀速率将增加通孔刻蚀的时间, 但是相应的刻蚀过程中产生的热量也将减小, 有助于保护正面的器件不受破坏.

4 结论

对研制的 SiC 衬底上 AlGaIn/GaN HEMT 进行了衬底减薄和接地通孔的刻蚀. 通孔制作中对 SiC 衬底采用了 SF_6/O_2 混合气体的电感耦合等离子体刻蚀技术, 并利用了电镀的 Ni 作为阻挡层, 通过对刻蚀条件的优化, 使得对 SiC 刻蚀速率可达 1.1 $\mu\text{m}/\text{min}$, 刻蚀 SiC 与 Ni 的选择比在 40 以上, 并利用 3 μm 厚 Ni 阻挡层在 SiC 衬底上刻蚀形成了 100 μm 深的通孔, 通孔侧壁具有一定的斜率, 完全能保证金属的良好覆盖, 这一技术非常适合 AlGaIn/GaN HEMT 及其单片集成电路的研制. 最后利用 SF_6/O_2 的电感耦合等离子体和 Cl_2/BCl_3 的电感耦合等离子体分别对 SiC 衬底和其上的 AlGaIn/GaN 外延材料进行了刻蚀, 完成了深度为 50 μm 的 AlGaIn/GaN HEMT 通孔制作.

参考文献

- [1] Cho H, Lee K P, Leerungnawarat P, et al. High density plasma via hole etching in SiC. *J Vac Sci Technol A*, 2001, 19(4): 1878
- [2] Jiang Liudi, Cheung R. Impact of Ar addition to inductively coupled plasma etching of SiC in SF_6/O_2 . *Microelectronic Engineering*, 2004, 73/74: 306
- [3] Kima H S, Yeomb G Y, Lee J W, et al. Characteristics of inductively coupled Cl_2/BCl_3 plasmas during GaN etching. *J Vac Sci Technol A*, 1999, 17(4): 2214
- [4] Khan F A, Adesida I. High rate etching of SiC using inductively coupled plasma reactive ion etching in SF_6 -based gas mixtures. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(15): 2268

Inductively Coupled Plasma via Hole Etching of AlGaIn/GaN HEMTs on SiC Substrate

Ren Chunjiang[†], Chen Tangsheng, Bai Song, Xu Xiaole, Jiao Gang, and Chen Chen

(National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules, Nanjing Electron Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrate were fabricated and through-wafer via holes up to 50 μm deep were etched by inductively coupled plasma (ICP). The SiC substrate was thinned to 50 μm , and 3 μm thick Ni mask with openings was patterned followed by SF_6/O_2 gas mixture etching of SiC substrate. Through-wafer via holes with a slightly sloped via sidewall to facilitate subsequent metal coverage to complete the front-to-back electrical connection were finished by Cl_2/BCl_3 gas mixture based ICP etching of AlGaIn/GaN heterostructure. The method exhibited is suitable for AlGaIn/GaN HEMTs and MMICs fabrication.

Key words: SiC; SF_6 ; ICP

PACC: 5275R **EEACC:** 2550E; 2550G

Article ID: 0253-4177(2008)12-2408-04

[†] Corresponding author. Email: rencj@tom.com

Received 11 June 2008, revised manuscript received 13 August 2008