

蓝宝石衬底 AlGa_N/Ga_N HFET 功率特性*

张志国^{1,2,†} 杨瑞霞¹ 李 丽¹ 冯 震² 王 勇² 杨克武^{1,2}

(1 河北工业大学信息工程学院, 天津 300130)
(2 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要: 通过台面隔离与注入隔离结合的方法, 解决了由于 GaN 外延材料缓冲层质量差造成的 AlGa_N/Ga_N HFET 击穿电压低的问题. 通过优化的 500 / 50s 栅退火条件, 改善 Ni-AlGa_N/Ga_N 二极管特性, 理想因子和势垒高度分别优化到 1.5 和 0.87eV. 通过改进 AlGa_N/Ga_N HFET 制备工艺, 得到提高器件输出功率的优化工艺, 采用这一工艺制备的蓝宝石衬底总栅宽为 1mm, 器件在频率为 8GHz 时输出功率达到 4.57W, 功率附加效率为 55.1%.

关键词: AlGa_N/Ga_N; HFET; 隔离; 整流特性; 退火; 输出功率

EEACC: 1350F; 2560P

中图分类号: TN304.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)07-1255-04

1 引言

目前, 宽禁带半导体器件以其优越的电学、光学和热学性能成为研究热点, GaN 材料具有 3.4eV 的禁带宽度, 大于 5×10^7 V/cm 的击穿场强, 非常适合功率器件的导电沟道材料.

1993 年 Khan^[1] 研制成功第一只 AlGa_N/Ga_N 异质结场效应晶体管(HFET)以后, 人们对 GaN 基器件的研究不断取得突破. 频率为 4GHz 时, 输出功率密度最高达到 32.2W/mm^[2], 总栅宽为 48mm 的 SiC 衬底器件输出功率达到 230W^[3]. 同时在器件的直流特性^[4]、微波小信号特性^[5]、击穿特性^[6]等方面均取得了长足的进展. 目前, 国内有关这一器件的研究也取得了一定的成果, 跨导达到 325mS/mm^[7], 蓝宝石衬底器件功率密度达到 2.23W/mm^[8].

本文在以蓝宝石为衬底的 GaN 外延材料上, 采用不同的工艺制备了栅长为 0.35 μ m 的 AlGa_N/Ga_N HFET 器件, 通过台面隔离与注入隔离相结合的方法, 增强了隔离特性, 栅宽为 0.1mm 器件源漏击穿电压由 1.8V 增加到 50V (电流密度为 1mA/mm). 采用优化的栅退火条件——500 / 50s, 对栅金属化后的器件进行快速退火处理, 实验显示退火后整流特性有所改善, 理想因子由 2.0 减小到 1.5, Ni-AlGa_N/Ga_N 势垒高度由 0.69eV 增加到 0.87eV. 分别对三种条件下制备的样品进行了特性测试, 发现通过对器件隔离特性和栅整流特性的改

善, 输出功率特性得到明显提高, 蓝宝石衬底总栅宽为 1mm 的 AlGa_N/Ga_N HFET 在频率为 8GHz 时输出功率达到 4.57W, 这是迄今为止国内有关蓝宝石衬底的 GaN 基 HFET 输出功率的最高报道.

2 器件制备

器件的外延材料为国产蓝宝石衬底的 GaN 外延材料, 结构为 sapphire/GaN/AlN/AlGa_N, 其中 AlGa_N 层 Al 的摩尔百分含量为 0.27. 源漏金属采用电子束蒸发的方法制备 Ti/Al/Ni/Au 金属层, N₂ 保护下快速退火形成欧姆接触, 传输线测试接触电阻为 $4.1 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 并且具有良好的形貌, 满足下一步的工艺要求, 电子束蒸发 Ni/Au 作为肖特基结金属, 栅长为 0.35 μ m, 通过空气桥连接源电极. 总栅宽为 1mm 器件的光学图像如图 1 所示.

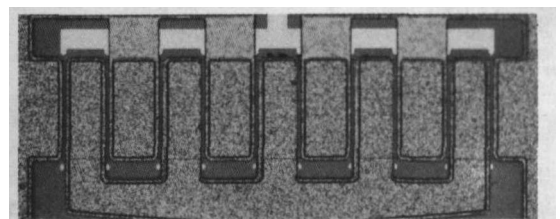


图 1 栅长为 0.35 μ m 的 1mm AlGa_N/Ga_N HFET 功率器件照片

Fig. 1 Photo of power device with total gate width 1mm and gate length 0.35 μ m

* 国家重点基础研究发展规划(批准号:51327030201)和国家自然科学基金(批准号:A1120060954)资助项目

† 通信作者. Email: flying200016@163.com

2005-11-16 收到, 2006-01-23 定稿

3 AlGaN/GaN HEMT 电学特性的改善

目前国内 GaN 外延材料存在缓冲层质量差的问题,表现为仅采用台面进行器件隔离时,器件的隔离特性差、击穿电压低、工作电压低、输出功率低。

通过试验发现,在隔离时先进行台面刻蚀,然后进行台面上源漏金属合金,最后加入离子注入工艺,进一步增强隔离效果.注入条件分别为能量 75keV 和 375keV 注入 As⁺;75keV 注入 He⁺,通过测试源漏开态击穿特性可知,器件夹断状态下源漏电流明显减少,如图 2 所示.曲线 1 为仅采用台面隔离时源漏关态击穿特性,曲线 2 为注入后源漏关态击穿特性.当源漏电压为 10V 时,源漏电流从 0.49mA 减小到 0.047mA,减小了一个数量级.同时随着源漏电压的增加,注入后器件在夹断状态下,源漏电流增加很小,说明通过增加注入工艺解决了隔离性能差的问题。

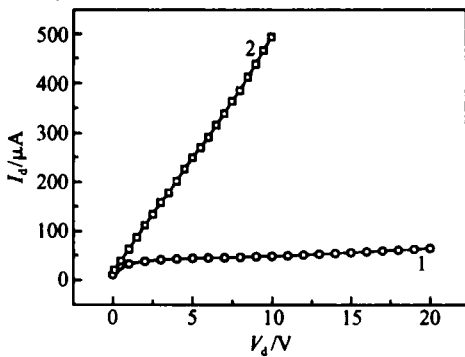


图 2 器件开态源漏击穿特性

Fig. 2 On-state breakdown performance between source and drain

高质量的栅特性是影响功率器件的另一个重要因素.对于中等掺杂的半导体材料,当 $V > 3kT/q$ 时,栅正向 $I-V$ 特性可表示为:

$$J = A^* T^2 \exp\left[-\frac{q\phi_b}{kT}\right] \exp\left[\frac{-qV}{nkT}\right] \quad (1)$$

其中 A^* 为 Richardson 常数; $q\phi_b$ 为栅势垒高度; n 为理想因子; k 为 Boltzmann 常数; T 为绝对温度.表征器件栅特性的两个重要参量经常采用 n 和 $q\phi_b$.

造成栅整流特性差的原因有两个:(1) 栅源电极之间和栅漏电极之间的漏电;(2) 栅金属的接触势垒.当栅源电极之间和栅漏电极之间存在漏电现象时,理想因子 n 偏离理论值大,反向击穿电压低,这是目前 AlGaN/GaN HFET 较为普遍存在的一个问题.势垒高度是影响栅整流特性的另一个重要参

数,金属与 AlGaN 材料形成良好的肖特基接触,势垒高;反之,势垒低,通常采用快速退火的方法增加势垒高度。

分别制备了三种样品,栅金属均为 Ni/Au,样品 1 为仅采用台面进行隔离的样品,样品 2 为台面隔离和注入隔离相结合的样品,样品 1 和 2 不经过退火处理,样品 3 为台面隔离和注入隔离后进行 500 /50s 退火处理的样品.图 3 为三种不同样品的栅源正向整流特性曲线,表 1 为与之对应的栅特性参数值.图 3 表明,退火后整流特性得到改善,其中样品 3 阈值电压为 1.1V,样品 1 由于存在漏电现象,整流特性差.采用(1)式分别计算三种样品的整流特性参数,如表 1 所示.文献[9]指出,Ni 与 AlGaN 形成肖特基接触时,势垒高度典型值在 0.66~

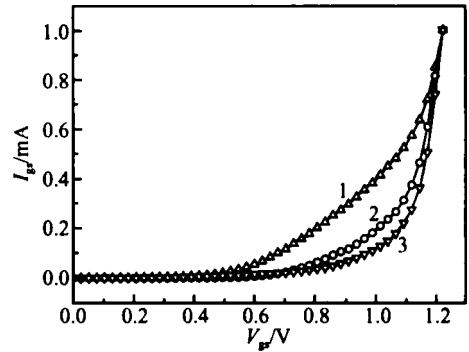


图 3 AlGaN/GaN HFET 栅正向整流特性

Fig. 3 Rectified performance of AlGaN/GaN HFET

0.99eV 之间.样品 1 由于存在漏电现象, n 和 $q\phi_b$ 与理想值有较大的偏差,显然(1)式不适合用于计算样品 1 的整流特性参数.解决漏电后,样品 2 的 n 减小,势垒高度增加,说明此时 Ni 与 AlGaN 材料已经形成整流接触,但 n 和 $q\phi_b$ 与理想值仍存在差距.样品 3 经过退火后,整流特性得到优化, n 值进一步减小,势垒高度增加.说明退火有助于改善 AlGaN/GaN HFET 栅整流特性.同时测试了三种样品的反向击穿特性,表 1 给出栅源电流密度为 1mA/mm 时的反向击穿电压,由于受测试仪器的限制,样品 3 电压加到 80V 时栅源电流仍未达到 1mA/mm,说明栅特性的改善同时有助于提高器件反向击穿电压。

表 1 三种样品的 Ni-AlGaN/GaN 整流特性参数

Table 1 Rectified parameter of Ni-AlGaN/GaN

样品	理想因子	势垒高度/eV	反向击穿电压/V
1	3.2	0.48	8
2	2.0	0.69	22.8
3	1.5	0.87	>80

4 AlGaIn/ GaN HEMT 输出功率特性

制备栅后,采用相同的工艺完成三个样品的流片.对于单指栅宽为 0.1mm,总栅宽为 1mm 的器件,源采用空气桥连接,分别测试了三个样品的电学特性参数(其中样品在跨导测试时,源漏电压均为 4.5V,进行直流测试时,源漏电压最大为 10V),如表 2 所示.器件隔离问题和栅特性的改善,有助于提高器件的功率增益和输出功率.样品 3 工作电压为 22V,输出功率达到 4.57W,这是目前国内有关蓝宝石衬底的这种器件的输出功率的最大值.样品 1 在输出功率测试时,工作电压仅为 15V,当工作电压进一步增加时,输出功率没有增加,并出现器件烧毁现象,输出功率仅为 1.9W.

表 2 三种样品的电学参数

Table 2 Electric parameter of three samples

样品	饱和电流 / mA	跨导 / (mS/mm)	测试频率 / GHz	线性增益 / dB	输出功率 / W
1	660	180	8	3.0	1.9
2	640	210	8	6.5	2.88
3	680	220	8	7.5	4.57

图 4 为样品 3 在频率为 8 GHz 时连续波测试的输出功率特性曲线,器件直流偏置点为 $V_{ds} = 22V$ 和 $I_{ds} = 170mA$,最大输出功率为 4.57W,最大功率附加效率为 55.1%.说明隔离问题和栅特性的改善提高了器件的输出功率.

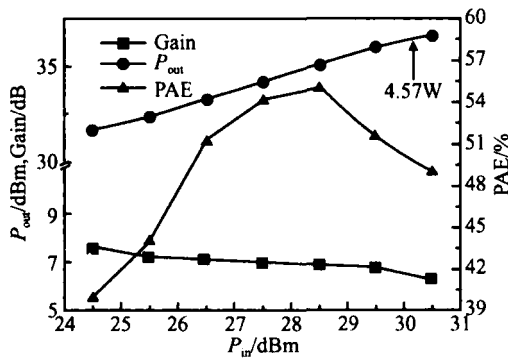


图 4 1mm 栅宽 AlGaIn/ GaN HFET 输出功率特性

Fig.4 Power performance of an 1 mm-wide AlGaIn/ GaN HFET at 8GHz

5 结论

AlGaIn/ GaN HFET 隔离和栅整流特性影响器

件的输出功率,本文通过台面隔离与注入隔离相结合的方式解决了隔离问题,提高了器件的击穿电压.通过优化栅退火条件,在 500 / 50s 条件下对 Ni-AlGaIn/ GaN 肖特基接触的栅进行处理,将理想因子 n 减小到 1.5,势垒高度增加到 0.87eV,改善了栅的整流特性.制备了三种 AlGaIn/ GaN HFET 样品,在频率为 8GHz 时分别测试连续波输出功率,结果显示隔离特性和栅特性的改善有助于提高器件的输出功率.在优化条件下制备的总栅宽为 1mm 器件的输出功率达到 4.57W.

我们制备的器件的功率特性与国外器件相比仍存在一定的差距,功率附加效率值偏低,这一方面需要优化 GaN 外延材料结构,采用导热性能更好的 SiC 衬底材料降低热损耗,同时需通过场板结构进一步提高击穿电压和工作电压,这是今后工作和研究的重点.

参考文献

[1] Khan M A ,Bhattarai A ,Kuznia J N ,et al. High electron mobility transistor based on a GaN-AlGaIn heterojunction. Appl Phys Lett ,1993 ,63(9) :1214

[2] Wu Y F ,Saxler A ,Moore M ,et al. 30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization. IEEE Electron Device Lett ,2004 ,25(3) :117

[3] Okamoto Y ,Ando Y ,Hataya K ,et al. Improved power performance for recessed-gate AlGaIn-GaN heterostructure FET with a field modulating plat. IEEE Trans Microw Theory Tech ,2004 ,52(11) :2536

[4] Chini A ,Coffie R ,Meneghesson G ,et al. 2.1A/mm current density AlGaIn/ GaN HEMT. Electron Lett ,2003 ,39(7) :625

[5] Kumar V ,Lu W ,Schwindt R ,et al. AlGaIn/ GaN HEMTs on SiC with f_t of over 120GHz. IEEE Trans Electron Devices ,2002 ,23 :455

[6] Xing H L ,Dora Y ,Chini A ,et al. High breakdown voltage Al-GaN/ GaN HEMTs achieved by multiple field plate. IEEE Electron Device Lett ,2004 ,25(4) :161

[7] Zhang Zhiguo ,Yang Ruixia ,Wang Yong ,et al. Research on AlGaIn/ GaN HFET with transconductance of over 325mS/mm. Chinese Journal of Semiconductors ,2005 ,26(9) :1789 (in Chinese) [张志国,杨瑞霞,王勇,等.跨导为 325mS/mm 的 AlGaIn/ GaN HFET 器件研究. 半导体学报,2005 ,26(9) :1789]

[8] Wang Xiaoliang ,Liu Xinyu ,Hu Guoxin ,et al. X-band GaN power HEMTs with power density of 2.23W/mm grown on sapphire by MOCVD. Chinese Journal of Semiconductors ,2005 ,26(10) :1865

[9] Pearton S J ,Zolper J C ,Shui R J ,et al. GaN :Processing ,defects ,and devices. J Appl Phys ,1999 ,86(1) :1

Output Power of an AlGaN/GaN HFET on Sapphire Substrate *

Zhang Zhiguo^{1,2,†}, Yang Ruixia¹, Li Li¹, Feng Zhen², Wang Yong², and Yang Kewu^{1,2}

(1 School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(2 No 13 Research Institute, China Electronic Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract : The low breakdown voltage of AlGaN/GaN HFETs, which is caused by the poor buffer layer of GaN epitaxial wafer, is improved through mesa isolation and implantation isolation. Annealing at 500 °C for 50s after the gate metal deposition yields the best performance for an Ni-AlGaN/GaN diode. In particular, the ideality factor and barrier height reach 1.5 and 0.87eV, respectively. Optimization is achieved by comparing the performance of the gate and output power of AlGaN/GaN HFETs fabricated under different conditions. The output power of a 1mm-gate-wide AlGaN/GaN HFET on sapphire substrate is 4.57W, with a power added efficiency of 55.1% at 8GHz.

Key words: AlGaN/GaN; HFET; isolation; rectified performance; annealing; output power

EEACC: 1350F; 2560P

Article ID: 0253-4177(2006)07-1255-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 5132703021) and the National Basic Research of China (No. A1120060954)

† Corresponding author. Email: flying200016@163.com

Received 16 November 2005, revised manuscript received 23 January 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics