

高击穿电压的 AlGaIn/GaN FP-HEMT 研究与分析*

郭亮良 冯倩 郝跃 杨燕

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

(2006 年 8 月 17 日收到 2006 年 10 月 18 日收到修改稿)

就蓝宝石衬底上制备的 AlGaIn/GaN 场板(field plate)HEMT 器件、常规 HEMT 器件性能进行了分析对比. 结果证明两种结构的器件直流参数变化不大, 但是采用场板后器件的击穿电压从 52 V 提高到了 142 V. 在此基础上利用 Silvaco 软件对两种器件进行模拟仿真, 深入分析了 FP 对器件击穿电压的影响.

关键词: AlGaIn/GaN, HEMT, 场板, 击穿电压

PACC: 7280E, 7340Q

1. 引言

宽禁带 GaN 基 HEMT 被广泛认为是下一代高频高功率器件的领导者. AlGaIn-GaN 异质结 HEMT 器件适用于高电压、高功率应用领域, 展现出数十倍于 GaAs 与 Si 技术的功率特性^[1,2]. 然而, 当 GaN 基 HEMT 技术从实验室迈向市场, 可靠性成为一个必须解决的最重要环节之一, 而击穿电压不仅是影响可靠性的重要因素之一, 而且限制着 GaN HEMT 在大功率方面的应用.

一般用来提高击穿电压的方法为增加栅漏间距, 但是这样也增加了漏串联电阻, 因此也使器件功率特性退化. 此外, 增加栅漏间距仅仅在一定的长度范围内有效, 超过了这个范围, 再增加栅漏间距, 就不再会提高击穿电压^[3]. 为此, 必须寻找新的提高击穿电压的方法. 场板的作用是调制电场分布并且减小其峰值, 因此降低了陷阱效应, 提高了击穿电压^[4]. Zhang 等人^[5]报道了利用重叠栅结构(也是场板结构的一种)的 GaN HEMT, 击穿电压达到了 570 V. 接着, Karmalkar 等人^[6]对场板结构进行了模拟, 揭示了在击穿电压上至少可提高 5 倍, 达到了 1900 V. 然而, 那时候, 制造的器件因为截止频率较低, 不适于微波应用. Ando 等人^[7]使用类似的较小栅长场板结构, 得到了在频率 2 GHz 下输出功率 10 W 的结果. Chini 等人^[8]采用了一种新的场板设计进一步

减小了栅长, 在 4 GHz 下获得了 12 W/mm 的功率密度. Xing 等人^[9]报道了利用多层场板结构的 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 当栅长为 1.5 μm , 栅漏间距从 4 μm 到 28 μm 变化时, 最大击穿电压为 900 V. Wu 等人^[10]报道了利用单层场板结构, 当器件工作电压为 120 V 时, 4 GHz 时的连续波输出功率密度 32.2 W/mm, 最大功率附加效率(PAE)为 54.8%.

本文对蓝宝石衬底上制备的 AlGaIn/GaN 场板 HEMT(FP-HEMT)器件、常规 HEMT 器件性能进行了分析对比. 并在实验的基础上利用 Silvaco 软件对两种器件进行模拟仿真, 深入分析了场板对器件击穿电压的影响.

2. 场板对器件性能的影响

我们首先利用 Silvaco 软件对 FP-HEMT 器件和常规 HEMT 进行了模拟仿真, 详细讨论了 FP 对器件性能的影响. 模拟所用的 FP-HEMT 结构如图 1 所示. 器件栅长为 1 μm , 栅源间距 1.5 μm , 栅漏间距 2.5 μm , 场板长度为 0.7 μm .

图 2 给出了 FP-HEMT 与常规 HEMT 输入输出特性比较. 可以看出, 当 $V_g < -2$ V 时, 两种器件的 I_d-V_d 曲线基本重合; 但是, 当 $V_g > -1$ V 时, FP-HEMT 的电流值小于常规 HEMT 器件. 那是因为当栅压很负(< -2 V)时, 栅下二维电子气深度耗尽, 而 FP 下二维电子气的耗尽作用相对而言可以忽略

* 国家重大基础研究发展计划(973)批准号: 51327020301, 2002CB311904)和西安应用材料创新基金(批准号: XA-AM-200616)资助的课题.

不计, 沟道电阻相对于无 FP 时, 变化不大, 故 I_d-V_d 输出曲线基本重合. 而当栅压接近 0 甚至大于 0 时, 栅下二维电子气的耗尽有所减弱, 故 FP 二维电子气的耗尽作用的影响逐渐加强, 沟道电阻相对无 FP 时增大, 故在相同漏压下电流值变小.

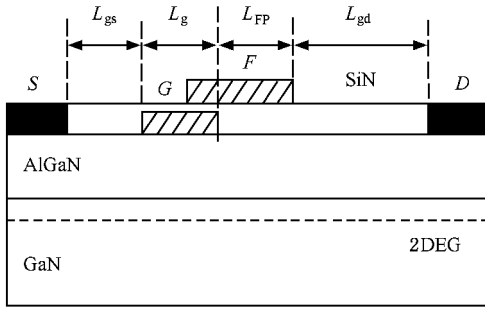


图 1 用于 Silvaco 模拟的 FP-HEMT 结构

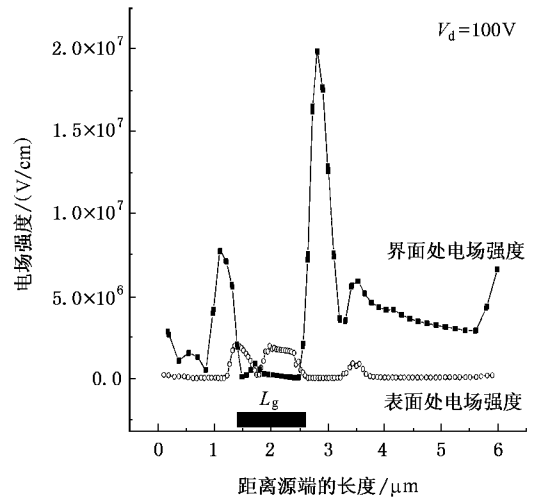


图 3 AlGaIn/GaN HEMT 界面处与耗尽层中的电场分布 ($V_d = 100\text{ V}$)

通过对比, 可以得出, AlGaIn/GaN 界面处的电场强度明显高于耗尽层中的电场强度, 故界面处更容易击穿, 而不是像 GaAs MESFET 器件, 击穿发生在耗尽层中^[3].

因为对于 AlGaIn/GaN HEMT 来说, AlGaIn 层中的电荷分布包括 n_i, n_{p-}, n_{p+}, n_d : 其中 n_i 是 SiN 和 AlGaIn 层间的界面电荷, n_{p-}, n_{p+} 是极化电荷, n_d 是 AlGaIn 的掺杂浓度^[11], 见图 4(a).

由于 SiN 的厚度 (~200 nm) 基本上是 AlGaIn 层厚度 (30—50 nm) 的数倍, 因此在 AlGaIn/GaN FP HEMT 结构中, n_{p-}, n_{p+}, n_i, n_d 的空间分离对场板附近二维电势分布没有很明显的影 响, 因此, 在仿真过程中将 AlGaIn 层中所有电荷近似为界面处的一薄层正电荷 n_s (如图 4(b) 所示).

另外一方面, 对于 AlGaIn/GaN HEMT 来说, 由于极化效应, 在 AlGaIn/GaN 界面处产生大量电荷

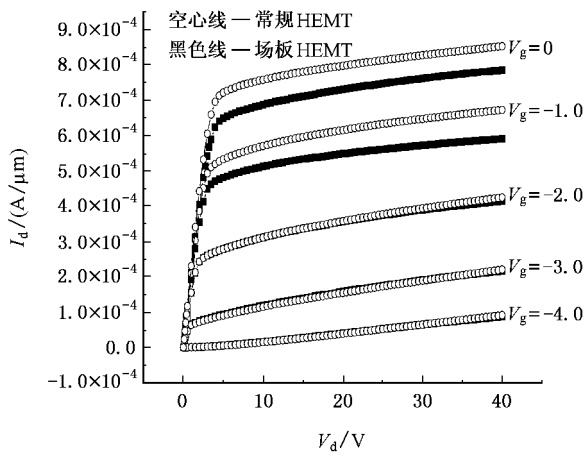


图 2 FP-HEMT 与常规 HEMT 输入输出特性比较

图 3 是 HEMT 界面处与耗尽层中的电场分布, 可以看出峰值均出现在栅边缘附近, 最高电场发生在近漏栅边缘处.

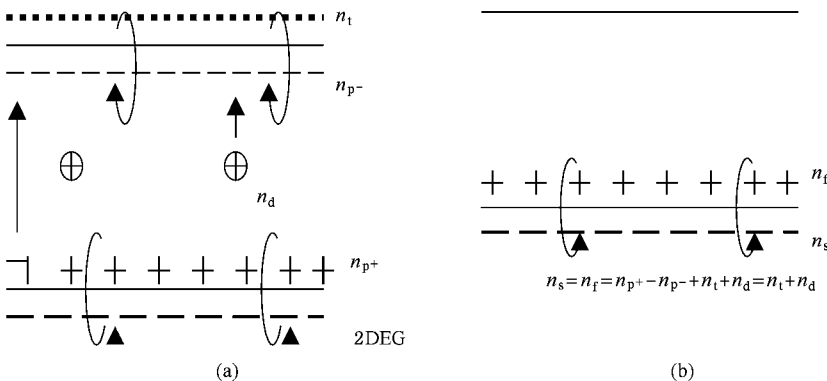


图 4 AlGaIn 层中的电荷分布 (a) AlGaIn 层中电荷的详细分布; (b) AlGaIn 层中电荷的简易分布

($10^{13}/\text{cm}^2$)。当 AlGaIn 层不掺杂或轻掺杂时,这些电荷会在 AlGaIn 层上表面感应出可移动的正电荷,这些正电荷产生指向 2DEG 的电场,从而部分补偿了极化电场 E_p ,使得总电场强度有所减小,如图 5 所示。这些可移动电荷,在栅上加负压而没有场板的情况下,会引起漏侧栅边缘电场梯度增大,电场进一步增加变大,从而降低了器件的击穿电压。而 GaAs MESFET 却随着栅上所加电压进一步加大(绝对值)耗尽层位置不断展宽;而在 AlGaIn/GaN HEMT 结构中,当栅压进一步增加到该区域的 2DEG 完全耗尽时,才使得耗尽层展宽,因此电场峰值发生在 AlGaIn-GaN 界面处。

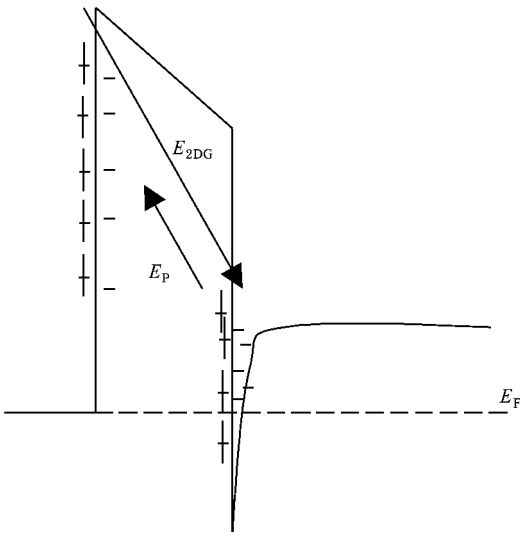


图 5 AlGaIn-GaN 能带电场分布

常规 HEMT 的电场分布,可以看出,FP-HEMT 有效降低了栅两侧的电场峰值,尤其是靠近漏极的栅边缘电场,并在 FP 边缘处有一个电场峰值。从而可以得知,采用了 FP 结构的 HEMT 器件拥有更高的击穿电压。

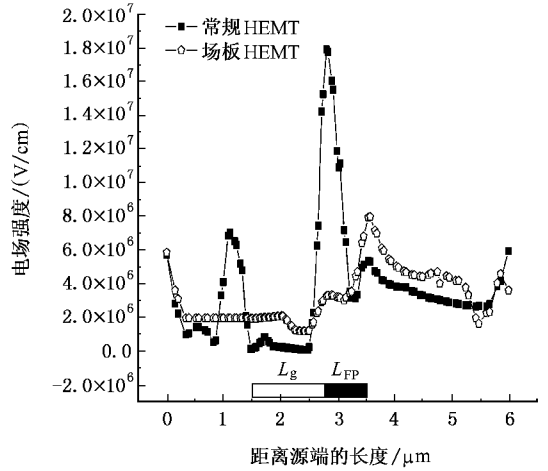


图 6 FP-HEMT 和常规 HEMT 的电场分布($V_d = 100\text{ V}$)

3. 器件制造及其性能

实验中 AlGaIn/GaN 异质结材料样片是 MOCVD 制备的,衬底为(0001)面单面抛光蓝宝石,先在 520°C 下生长厚度约为 30 nm 的 GaN 成核层,接着在高温下依次生长厚度约为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的 GaN 缓冲层, 8 nm 厚的未掺杂 AlGaIn 层以及 16 nm 厚的 Si 掺杂 AlGaIn 层,其中 Si 掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} - 2.0 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 。测量得到的 AlGaIn 层的 Al 组分为 27%,Hall 效应测量显示室温下该材料的方块电阻为 $312\text{ }\Omega/\square$,电子

图 6 给出了在 $V_d = 100\text{ V}$ 条件下的 FP-HEMT 和

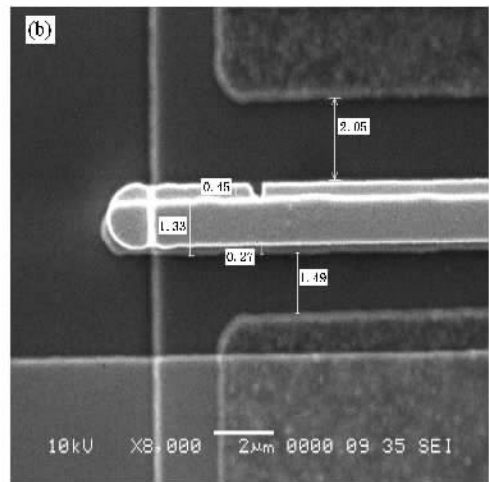
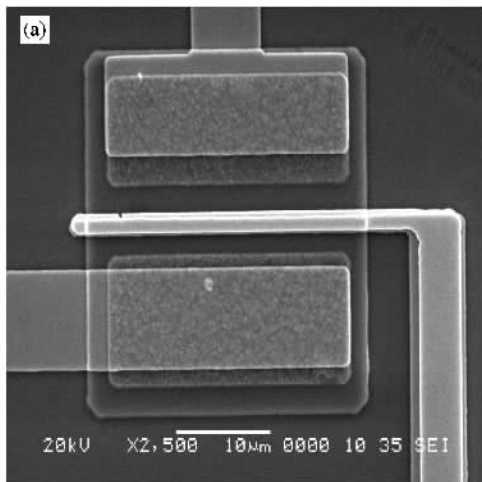


图 7 单栅 FP-HEMT 扫描电镜图 (a)全局扫描电镜图;(b)局部扫描电镜图

迁移率为 $1234 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 电子面密度为 $1.62 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

在台面隔离之后,用电子束蒸发作欧姆接触, Ti/Al/Ni/Au(200/1200/550/450 Å), 再在 N_2 气氛下进行快速热退火(二次退火, 830°C , 30 s; 200°C , 10 s), 再做上 Ni/Au(200/2000 Å)作栅极.

在常规 HEMT 制作测试之后,将 SiO_2 (1500 Å)作钝化层,再在上面做金属 Ni/Au(200/2000 Å)作场板.

图 7 给出的是单栅 FP-HEMT 扫描电镜图,可以清晰地得出栅长为 $1.33 \mu\text{m}$,场板长度为 $0.45 \mu\text{m}$,栅源间距为 $1.49 \mu\text{m}$,栅漏间距 $2.05 \mu\text{m}$.

图 8 是器件的 $I-V$ 输出特性曲线,与模拟结果完全符合.

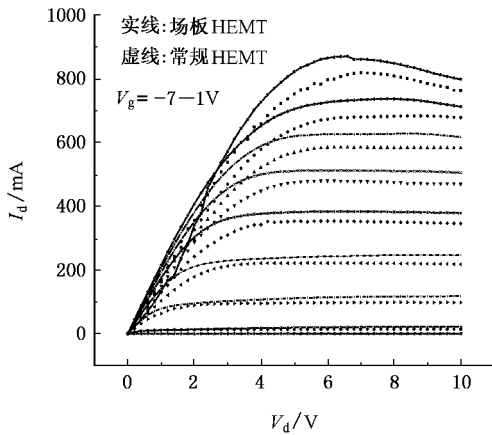


图 8 FP-HEMT 与常规 HEMT 的 $I-V$ 输出特性曲线比较

图 9 是 FP-HEMT 与常规 HEMT 跨导的比较,FP 前后的变化是不大的.常规定义击穿是当栅漏电流达到 1 mA/mm ,然而这样以栅漏电流参考的击穿电压并不是真正反映实际的击穿机理^[12].于是,本文采用了完全硬击穿来获得击穿电压的正确值.另外,由于以前一些文献大多将源极悬空,仅仅测量肖特基二极管以获得击穿电压,而忽略了源极对击穿电压的影响.图 10 给出了三端测量 FP-HEMT 在 V_g 为 -6 V 时的 I_g-V_g, I_d-V_g 曲线,可以看出,在 V_d 为 142 V 时,栅漏电流 I_g 急剧增大,而 I_d 急剧下降,说明管子已经击穿,后在高倍显微镜下观察,器件已经烧坏,而相对应的同结构同尺寸的 HEMT 击穿电压为

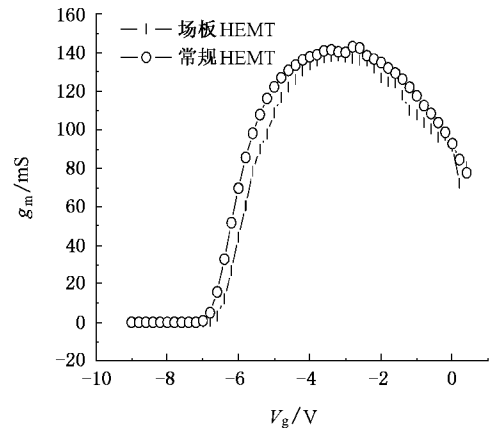


图 9 FP-HEMT 与常规 HEMT 跨导的比较

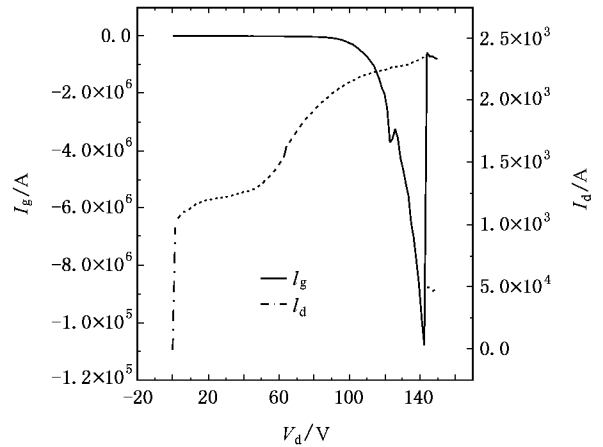


图 10 FP-HEMT 的 I_g-V_g, I_d-V_g 曲线

52 V .可以看出,这是一个器件击穿电压约增加两倍的结果.有关不同栅结构,不同场板长度,以及不同钝化方式的 SiC 衬底 FP-HEMT 将在今后的文章中报道.

4. 结 论

本文分析了 FP-HEMT 与常规 HEMT 击穿特性,解释了 FP 对器件性能的影响.通过在室温下成功制备的 FP-HEMT 与相同的 HEMT 比较,得出了两种结构的一般直流参数变化不大,而击穿电压从 52 V 提高到了 142 V (约三倍变化).

- [1] Hao Y , Han X W , Zhang J C , Zhang J F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3622 (in Chinese) [郝 跃、韩新伟、张进城、张金凤 2006 物理学报 **55** 3622]
- [2] Zhang J F , Wang Ch , Zhang J C , Hao Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 1060
- [3] Li J , Cai S J , Pan G Z , Chen Y L , Wen C P , Wang K L 2001 *Electronics Letters* **37** 196
- [4] Wu Y F , Moore M , Wisleder T , Chavarkar P M , Mishra U K , Parikh P 2004 *IDEM* **33** 1078
- [5] Zhang N Q , Keller S , Parish G , Heikman N S , DenBaars S P , Mishra U K 2000 *IEEE Electron Device Lett.* **21** 421
- [6] Karmalkar S , Mishra U K 2001 *IEEE Transactions on Electron Devices* **48** 1515
- [7] Ando Y , Okamoto Y , Miyamoto H , Nakayama T , Inoue T , Kuzuhara M 2003 *IEEE Electron Device Letters* **24** 289
- [8] Chini A , Buttari D , Coffie R , Heikman S , Keller S , Mishra U K 2004 *Electronics Letters* **40** 17
- [9] Xing H L , Dora Y , Chini A , Keller S , Mishra U K 2004 *IEEE Electron Device Letters* **25** 161
- [10] Wu Y F , Saxler A , Moore M , Smith R P , Smith R P , Sheppard S , Chavarkar P M , Wisleder T , Mishra U K , Parikh P 2004 *IEEE Electron Device Letters* **25** 117
- [11] Karmalkar S , Mishra U 2001 *IEEE Trans Electron Devices* **48** 1515
- [12] Tan W S , Houston P A , Parbrook P J , Wood D A , Hill G , Whitehouse C R 2002 *Applied Physics Letters* **80** 3207

Study of high breakdown-voltage AlGaIn/GaN FP-HEMT^{*}

Guo Liang-Liang Feng Qian Hao Yue Yang Yan

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

(Received 17 August 2006 ; revised manuscript received 18 October 2006)

Abstract

Fabrication and the characteristics at room temperature of FP-HEMT are reported , followed by a comparison of the actual characteristics with the conventional HEMT. With the incorporation of field plate , the breakdown voltage was enhanced from 52 to 142 V. Comparison between AlGaIn/GaN FP-HEMT and the conventional HEMT are also made , using Silvaco , as the simulation tool. The effect of enhancing the breakdown voltage is also investigated.

Keywords : AlGaIn/GaN , HEMT , field plate , breakdown voltage

PACC : 7280E , 7340Q

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (973) (Grant Nos. 51327020301 , 2002CB311904) and Xi ' an Applied Materials Innovation Fund (Grant No. XA-AM-200616).