

GaN FP-HEMTs 中击穿电压与电流崩塌的关系*

郭亮良 冯 倩 马香柏 郝 跃 刘 杰

(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 9 月 15 日收到 2006 年 10 月 15 日收到修改稿)

研究了钝化在抑制电流崩塌的同时, 会引起 HEMT 器件击穿电压的下降. 而采用场板结构的 AlGaIn/GaN 场板 HEMT 器件(FP-HEMT)的击穿电压从 46 V 提高到了 148 V, 表明了场板对提高击穿电压有显著作用(3 倍以上). 接着, 比较了 FP-HEMT 器件与常规 HEMT 器件, 钝化后 HEMT 器件在应力前后的电流崩塌程度, 得出了采用场板结构比之钝化对器件抑制电流崩塌有更明显作用的结论. 从理论上和实验上都表明, 采用场板结构能够很好解决提高击穿电压与抑制电流崩塌之间的矛盾.

关键词: GaN, 场板, 击穿电压, 电流崩塌

PACC: 7280E, 7340Q

1. 引 言

GaN 室温下禁带宽度为 3.4 eV, 击穿场强大于 3 MV/cm, 电子饱和速度和峰值速度分别为 1.5×10^7 cm/s 和 3×10^7 cm/s. 而 AlGaIn/GaN 异质结构即使在没有任何掺杂的情况下, 仅通过极化就可在 AlGaIn/GaN 异质界面处产生高达 10^{13} /cm² 的二维电子气(2DEG)密度, 因此, 人们对 GaN 微波功率器件特别是 AlGaIn/GaN HEMT 器件进行了广泛地研究^[1-3]. 但是, 到目前为止仍然有两个问题严重阻碍了器件的实用化进程: 一个是电流崩塌效应的影响; 另一个是进一步提高器件的击穿电压而得到高功率输出^[4].

科研工作者通常采用钝化方法来抑制 GaN 基器件的电流崩塌, 但这同时又会降低器件的击穿电压. 本文的研究重点是如何解决抑制电流崩塌与提高击穿电压之间的矛盾, 表明了采用场板结构, 既能够有效抑制电流崩塌, 还能够降低表面电场, 减弱高场陷阱效应, 提高击穿电压, 进而提高器件的性能.

2. 实验与分析

实验中 AlGaIn/GaN 异质结材料是采用 MOCVD 设备外延得到的, 选用蓝宝石作为衬底, 先在 520℃

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 μm 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 2.0×10^{18} cm⁻³. 测量得到的 AlGaIn 层的 Al 组分为 27%(结构为 Al_{0.27}Ga_{0.73}N). 该材料的方块电阻为 312 Ω/□, 电子迁移率为 1234 cm²/Vs, 2DEG 面密度为 1.62×10^{13} cm⁻².

图 1 给出了 FP-HEMT 器件的 SEM 图形, 可以清晰地看出, 该 FP-HEMT 器件的栅的长度为 1.20 μm, 场板长度为 0.82 μm, 栅漏间距为 2.27 μm, 栅源间距为 1.29 μm. 我们采用了如图 2(a)所示的漏极电流注入技术(drain current inject technology, DCIT)来测试器件的击穿电压^[5]. 如图 2(b)所示, 常规 HEMT 器件的击穿电压为 46 V, 而钝化后 HEMT 器件的击穿电压下降到了 28 V(如图 2(c)所示), 我们认为未经钝化的器件受表面态的影响较大, 运动的电子会受到来自栅极电场的影响从而被表面陷阱俘获, 形成虚栅^[6]. 但与此同时, 表面负电荷能够起到减弱近漏区栅边缘电力线过于集中的作用, 故降低了栅边缘的电场强度, 因此击穿电压较高, 但是经过钝化后, 会减弱表面态的影响, 使得分流电力线的作用降低, 故近漏区栅边缘的电场比钝化前增加, 使得击穿电压有所减小. 而采用场板技术, 能够扩展耗尽区并增加了场板边缘的电场峰值从而降低整体的电场强度, 故提高了器件的击穿电压, 如图 2(d)所示, 器件

* 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.

的击穿电压 V_{DC} 提高到了 148 V. 根据上述讨论, 我们可以看出钝化能够使 HEMT 器件的击穿电压下降 (从 46 V 下降到了 28 V), 而采用场板结构能够显著提高器件的击穿电压 (从 46 V 提高到了 148 V).

为了考察场板结构对电流崩塌的影响, 图 4 给出了在 $V_{GS} = 0\text{ V}$, $V_{DS} = 20\text{ V}$ 应力时间 120 s 的应力条件下, 常规 HEMT 器件, 钝化后 HEMT 器件与 FP-HEMT 器件在应力前后电流崩塌程度的对比, 可以得出常规 HEMT 器件的电流崩塌程度为 11.90%, 钝化后 HEMT 器件的崩塌程度为 7.53%, 而 FP-HEMT 器件的崩塌程度为 3.79%, 表明了采用场板结构比之钝化对器件抑制电流崩塌有更明显的作用.

因为采用场板结构, 一方面加于场板上的信号会调制栅漏之间的载流子密度, 从而对抑制电流崩塌有一定的作用. 如图 4(a) 所示, 在无场板结构 HEMT 表面存在一些俘获电子的表面陷阱, 它们会耗尽沟道中的载流子, 从而导致电流崩塌的发生, 而在 FP-HEMT 器件中, 当场板上加正栅压 (如图 4

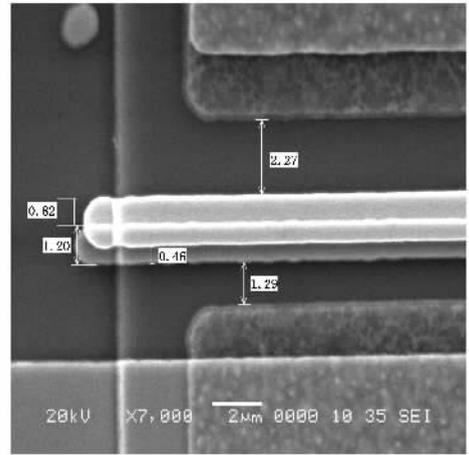


图 1 单栅 FP-HEMT 器件的扫描电镜图

(b)), 它也能调制沟道中的载流子, 补偿甚至屏蔽了表面负电荷对沟道的耗尽作用, 从而抑制了电流崩塌. 另一方面, 场板结构能够减小表面电场强度, 降低了表面的高场陷阱效应, 使得表面陷阱俘获电子

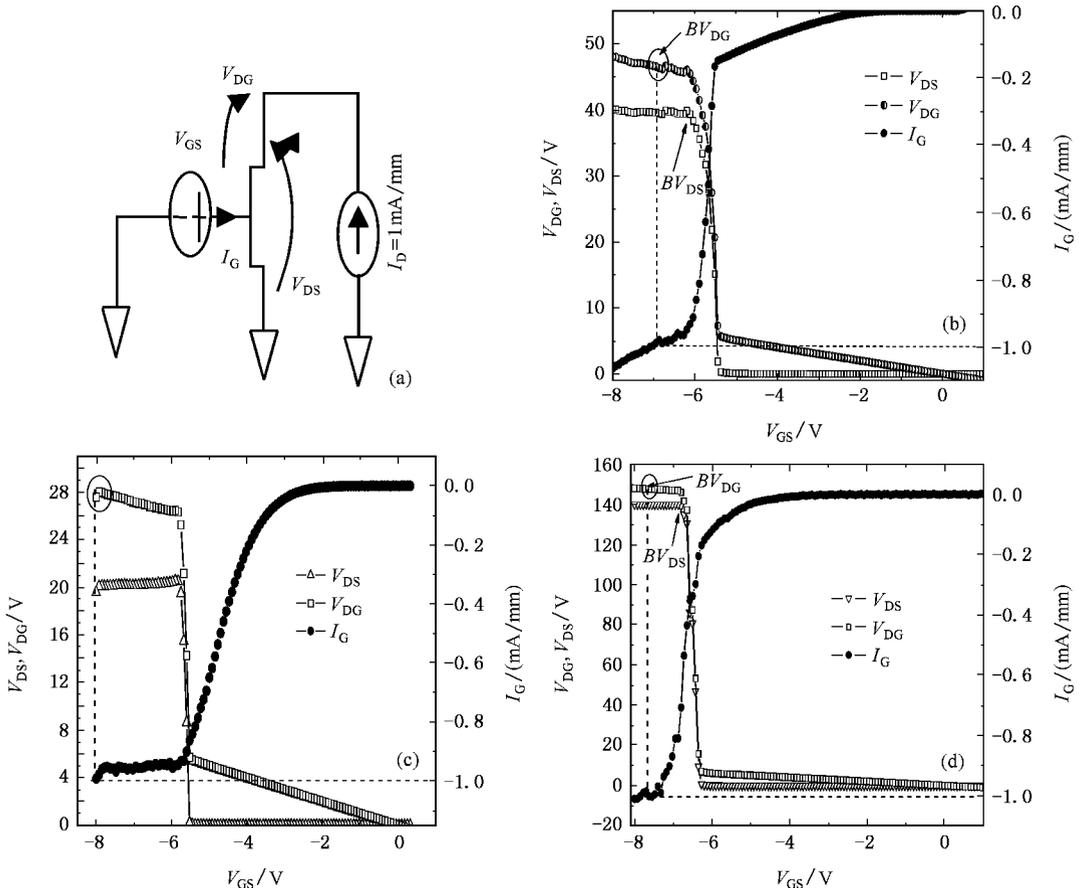


图 2 利用 DCIT 方法测试常规 HEMT 器件, 钝化后 HEMT 器件与 FP-HEMT 器件的击穿电压 (a) DCIT 击穿电压测试方法; (b) 利用 DCIT 方法测试的常规 HEMT 器件的击穿电压 (c) 利用 DCIT 方法测试钝化后的 HEMT 器件获得击穿电压; (d) 利用 DCIT 方法测试 FP-HEMT 器件获得击穿电压

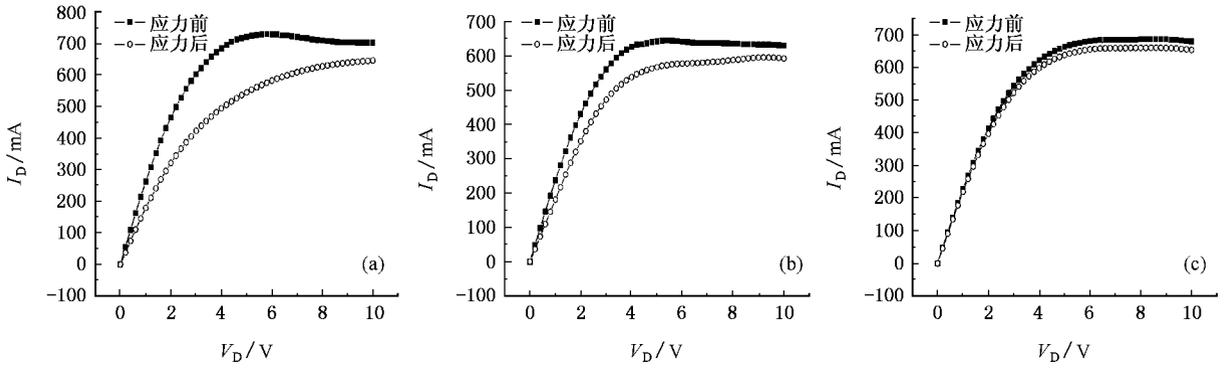


图3 常规 HEMT 器件,钝化后 HEMT 器件与 FP-HEMT 器件在应力前后电流崩塌的对比 (a) 常规 HEMT 器件应力前后的电流崩塌;(b) 钝化后 HEMT 器件应力前后的电流崩塌;(c) FP-HEMT 器件应力前后的电流崩塌

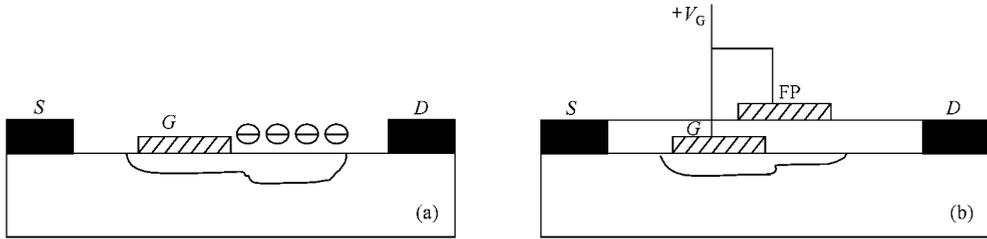


图4 无场板结构的 HEMT 器件与 FP-HEMT 器件耗尽层的对比 (a) 无场板结构 HEMT 器件耗尽层;(b) FP-HEMT 器件耗尽层

的能力下降,从而抑制了电流崩塌.为了说明电场降低的确能够降低表面的高场陷阱效应,我们给出了

不在高场作用下的陷阱俘获率.

$$R_{n,p} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_n \left[p + \frac{1}{\text{DEGEN.FAC}} n_{ie} \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT_L}\right) \right] + \tau_p \left[n + \text{DEGEN.FAC} \cdot n_{ie} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT_L}\right) \right]}, \quad (1)$$

其中 τ_n, τ_p 分别为电子,空穴的寿命, E_t 为陷阱能级, DEGEN.FAC 是简并因子, E_i 是本征费米能级, k 为玻尔兹曼常数, T_L 为晶格温度.

考虑高电场的影 响,需加上电场效应增强因子 Γ_n^{DIRAC} 与 Γ_p^{DIRAC} ,修正后给出的俘获率为

$$R_{n,p} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\frac{\tau_n}{1 + \Gamma_n^{\text{DIRAC}}} \left[p + \frac{1}{\text{DEGEN.FAC}} n_{ie} \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT_L}\right) \right] + \frac{\tau_p}{1 + \Gamma_p^{\text{DIRAC}}} \left[n + \text{DEGEN.FAC} \cdot n_{ie} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT_L}\right) \right]}, \quad (2)$$

其中,对电子的电场效应增强因子为

$$\Gamma_n^{\text{DIRAC}} = \frac{\Delta E_n}{kT_L} \int_0^1 \exp\left(\frac{\Delta E_n}{kT_L} u - k_n u^{3/2}\right) du. \quad (3)$$

对空穴的电场效应增强因子为

$$\Gamma_p^{\text{DIRAC}} = \frac{\Delta E_p}{kT_L} \int_0^1 \exp\left(\frac{\Delta E_p}{kT_L} u - k_p u^{3/2}\right) du, \quad (4)$$

其中 u 为积分变量, ΔE_n 为电子陷入陷阱中所需的能量, ΔE_p 为空穴陷入陷阱中所需的能量.而 k_n, k_p 定义为

$$k_n = \frac{4}{3} \frac{\sqrt{2m_0 m_e \Delta E_n^3}}{3qh|E|}, \quad (5)$$

$$k_p = \frac{4}{3} \frac{\sqrt{2m_0 m_e \Delta E_p^3}}{3qh|E|}, \quad (6)$$

其中, h 为约化普朗克常数, m_0 是电子的静态质量, m_e 为有效质量. 可以看出, 当电场 E 减小时, k_n , k_p 随之增大, 而电场效应增强因子却随之减小, 从而使俘获率减小. 于是可以表明, 当电场减小时, 高场陷阱效应被降低, 表面陷阱的俘获能力下降.

另外, 由于场板结构本身包含着钝化工艺, 能够减小表面态, 起到抑制电流崩塌的作用.

综上所述, 场板结构能够明显地提高击穿电压, 也能很好地抑制电流崩塌.

3. 结 论

本文研究了钝化在抑制了电流崩塌的同时, 会引起 HEMT 器件击穿电压的下降. 而采用场板结构的 AlGaIn/GaN 场板 HEMT 器件 (FP-HEMT) 的击穿电压从 46 V 提高到了 148 V, 表明了场板对提高击穿电压有显著作用 (3 倍以上). 之后比较了 FP-HEMT 器件与常规 HEMT 器件, 钝化后 HEMT 器件在应力前后电流崩塌程度, 得出了采用场板结构比之钝化对器件抑制电流崩塌有更明显作用的结论. 综上所述, 采用场板结构能够很好解决提高 GaN 基 HEMT 器件中击穿电压与抑制电流崩塌之间的矛盾.

- [1] Keller S, Wu Y F, Parish G, Naiqian Ziang, Xu J J, Keller B P, DenBaars S P, Mishra U K 2001 *IEEE Trans on Electron Devices* **48** 552
- [2] Hyungtak K, Richard M T, Vinayak T, Prunty T R, Shealy J R, Eastman L F 2003 *IEEE Electron Device Lett.* **24** 421
- [3] 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]

- [4] Koudymov A, Adivarahan V, Yang J, Simin G, Asif Khan M 2005 *IEEE Trans on Electron Devices* **26** 704
- [5] Bahl S R, del Alamo J A 1993 *IEEE Trans on Electron Devices* **40** 1558
- [6] Ramakrishna V, Zhang N Q, Stacia K, Mishra UK 2001 *IEEE Transactions on Electron Devices* **48** 560

Relation between breakdown voltage and current collapse in GaN FP-HEMTs^{*}

Guo Liang-Liang Feng Qian Ma Xiang-Bai Hao Yue Liu Jie

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

(Received 15 September 2006 ; revised manuscript received 15 October 2006)

Abstract

Passivation is generally used to suppress the current collapse , however , it also cause the decrease in breakdown voltage . By incorporating a field plate , the breakdown voltage was enhances from 46 to 148 V as tested using the drain current inject technology (DCIT) , which indicates that the field plate can increase the breakdown voltage remarkably . Then , comparisons between the degrees of current collapse in the conventional HEMTs , the HEMTs after passivation and FP-HEMTs indicate that the field plate performs better in suppressing current collapse than passivation . It is concluded that adopting the field plate structure is a good solution to the problem of increasing the breakdown voltage and at the same time suppressing the current collapse in GaN HEMTs .

Keywords : GaN , field plate , breakdown voltage , current collapse

PACC : 7280E , 7340Q

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