

场板结构 AlGaIn/GaN HEMT 的电流崩塌机理*

魏 巍[†] 林若兵 冯 倩 郝 跃

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

(2007 年 4 月 28 日收到, 2007 年 6 月 6 日收到修改稿)

在不同的漏偏压下, 研究了钝化和不同场板尺寸 AlGaIn/GaN HEMT 对电流崩塌的抑制能力. 实验结果表明, 钝化器件对电流崩塌的抑制能力随着漏偏压的升高而显著下降; 在高漏偏压下, 场板的尺寸对器件抑制崩塌的能力有较大影响, 而合适尺寸的场板结构在各个漏偏压下都能够很好的抑制电流崩塌. 深入分析发现, 场板结构不仅能够抑制虚栅的充电过程, 而且提供了放电途径, 有利于虚栅的放电, 从而抑制电流崩塌. 在此基础上, 通过建立场板介质对虚栅放电的模型, 解释了高漏偏压下场板的尺寸对器件抑制崩塌的能力有较大影响的原因.

关键词: AlGaIn/GaN HEMT, 场板, 电流崩塌

PACC: 7280E, 7340Q

1. 引 言

AlGaIn/GaN 异质结 2DEG 出色的电流处理能力使得 AlGaIn/GaN 异质结材料成为制造高频大功率器件的理想选择. 在蓝宝石衬底上, 目前 AlGaIn/GaN HEMT 器件最大饱和电流为 $1130 \text{ mA/mm}^{[1]}$, 截止频率 f_T 可达到 107 GHz , 最大振荡频率 f_{max} 可达到 $151 \text{ GHz}^{[2]}$. AlGaIn/GaN HEMT 所具有的极好高频大功率特性大大地增强了 GaN 微波功率器件研究和应用前景. 尽管 AlGaIn/GaN HEMT 器件在微波大功率特性方面取得很大的进步, 但是仍然存在两个问题严重阻碍了其在微波大信号领域的发展, 一个是电流崩塌, 一个是击穿电压. 电流崩塌分为漏延迟和栅延迟两类, 前者同 GaN 缓冲层和势垒层中的陷阱有关^[3]. 随着工艺的改进, 其影响越来越小; 后者由势垒层表面态引起^[4], 直接与异质结表面的极化电荷和能带结构相关联, 是目前研究的焦点. 为了抑制电流崩塌, 通常采用在器件栅漏之间淀积钝化层的方法, 但会降低击穿电压. 采用场板(FP)结构能大幅度提高器件的击穿电压, 并且抑制电流崩塌效应, 从而提高了器件功率密度、功率附加效率和相关增益,

且场板在工艺中容易实现, 所以这些年来成为半导体领域研究的重点之一.

关于场板结构对电流崩塌的抑制机理, 不同的研究者往往得出不同的结论, 因此还有待于研究. 研究表明: 仅仅依靠降低电场峰值和栅泄漏电流并不能完全消除电流崩塌. MOSFET 栅泄漏电流比 HEMT 低几个量级, 相同情况下两者崩塌程度却相近^[5]. Adivaranhan^[6]等报道了 FP 下定积绝缘性很高的介质时并不能去除崩塌效应, 认为 FP 抑制崩塌的能力与 FP 下介质层的电导能力有关, 具有弱导电性介质的 FP 器件能够很好的抑制崩塌效应. 这说明, 除了低电场峰值, 场板结构还有其他抑制电流崩塌的途径. 有研究者指出, FP 下定积的介质层能为表面态提供一个放电途径, 从而极大提高了大功率器件的特性^[7].

本文重点研究 FP AlGaIn/GaN HEMT 对栅延迟电流崩塌的改善作用. 在不同漏偏电压下, 运用“返回电流”方法对钝化器件和不同场板尺寸器件抑制电流崩塌的能力进行考察. 深入分析了场板结构抑制电流崩塌的机理, 并建立了场板介质对虚栅的放电模型, 该理论对特定漏偏压下场板尺寸的设计提供了一个参考.

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 51327020301, 2002CB311904)资助的课题.

[†] E-mail: imposingwei@sohu.com

2. 器件结构与工艺

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 30nm 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 $1.0 \times 10^{18} \sim 2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 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 $350\Omega/\square$,电子迁移率为 $166 \text{ cm}^2/\text{Vs}$,电子面密度为 $1.67 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.在台面隔离之后,用电子束蒸发作欧姆接触, Ti/Al/Ni/Au(20/120/55/45nm),再在 N₂ 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(20/200nm)作栅极.电子束蒸发 SiO₂(150nm)作钝化层,再在上面电子束蒸发金属 Ni/Au(20/200nm)作长度不同的场板.所有器件栅长为 0.8 μm,源漏间距为 5.4 μm,栅漏间距为 3.1 μm,栅宽为 100 μm.场板长度 L_{FP} 分别为 1.1 μm,1.4 μm,1.7 μm.器件结构如图 1 所示.

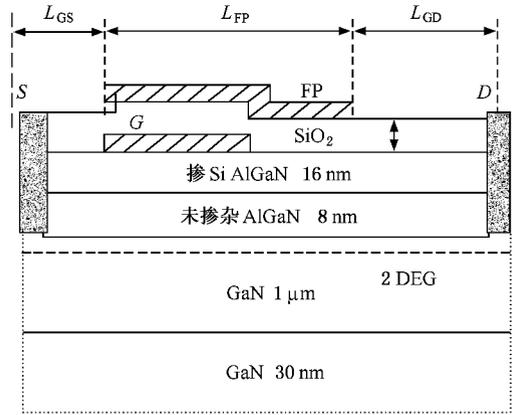


图 1 场板 AlGaIn/GaN HEMT 结构图

流”假设在相同漏偏压的稳态 DC 偏置下, $V_G = 0$ 时源漏电流为 I_{D0} ,这里,我们定义返回电流和 I_{D0} 的比值为崩塌因子 Q ,显然,没有电流崩塌效应的器件 Q 为 1.崩塌因子 Q 的大小反应了器件电流崩塌的程度.

在不同的漏偏压下(10 V,15 V,20 V,30 V),我们分别测量栅脉冲幅值 V_{CM} 和崩塌因子 Q 的关系,得到结果如图 2,图 3 所示.从图 2 和图 3 可以看出,在 $V_d = 10 \text{ V}$ 条件下, V_{CM} 为 -10 V 时,钝化后的器件崩塌因子 Q 为 0.962,而做了场板的器件 Q 为 0.998.可见,此时钝化和场板都对电流崩塌起到了很好抑制作用.当 V_d 升高到 15 V,同样 V_{CM} 为 -10 V 时,钝化器件开始有明显的崩塌效应, $Q = 0.887$,FP 长度为 1.1 μm 的场板器件也呈现崩塌状态, $Q = 0.933$,而 FP 长度为 1.4 μm,1.7 μm 的器件则仍然有效抑制了电流崩塌效应, Q 分别为 0.990 和 0.998.随着 V_d 继续升高到 20 V,同样的 $V_{CM} = -10 \text{ V}$ 条件下,FP 长度 1.1 μm 的器件产生了严重的崩塌, $Q =$

3. 实验与讨论

测试仪器为 HP4156B 半导体参数分析仪和 Signatone S1160 低噪声探针台.为了方便对比各个结构的器件对电流崩塌的抑制作用,本文采用“返回电流”技术^[8]对器件进行脉冲 $I-V$ 特性测试.器件的漏电压偏置为一个常数 V_d ,而栅极则加一个脉冲,脉冲从负值 V_{CM} 激励到零电压点.栅电压从 V_{CM} 返回到零电压点瞬间所测得源漏电流并称为“返回电

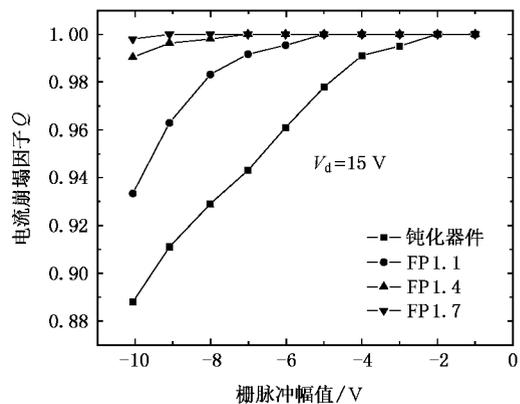
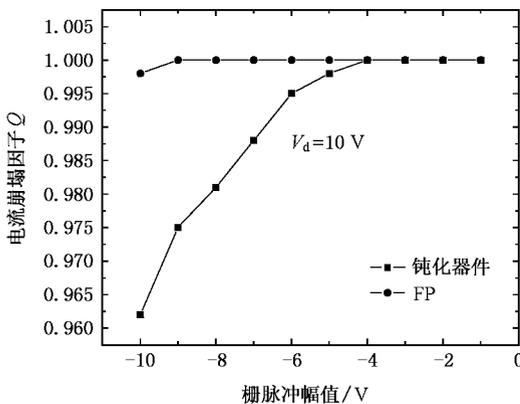


图 2 漏偏压为 10 V,15 V 时,不同尺寸场板器件和钝化器件对崩塌的抑制能力

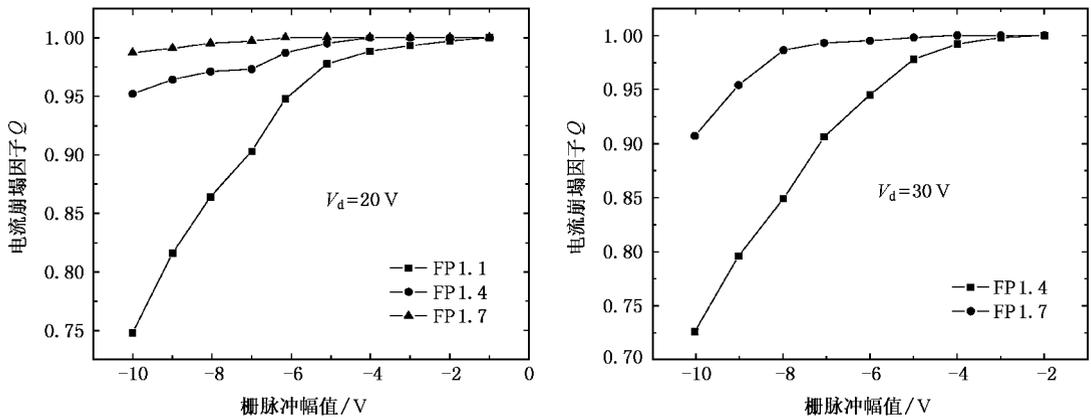


图3 漏偏压为 20 V、30 V 时,不同尺寸场板器件和钝化器件对崩塌的抑制能力

0.748,FP 长度为 1.4 μm 的器件开始出现轻微崩塌现象, Q 为 0.952,而 FP 长度 1.7 μm 的器件则仍然表现出其抑制崩塌的良好能力.值得说明的是,此时钝化器件呈现出非常严重的崩塌效应, $Q = 0.581$.最后, $V_d = 30 \text{ V}$ 时,FP 长度 1.4 μm 的器件也表现出严重的崩塌效应, $V_{\text{GM}} = -10 \text{ V}$ 条件下, $Q = 0.726$,而 FP 长度 1.7 μm 的器件此时仍能抑制崩塌, $Q = 0.948$.

由各个器件在不同 V_d 下的不同表现,我们可以得出如下结论:在低压(10 V 以下)时,钝化和场板都能很好地抑制电流崩塌效应,场板器件抑制崩塌的效果要比钝化器件更显著,且 FP 尺寸与抑制电流崩塌的能力基本无关.随着漏压的升高,钝化器件表现出的崩塌程度急剧增加,而 FP 尺寸也开始影响场板器件抑制电流崩塌的能力.如 FP 长度 1.1 μm 的器件只在漏压小于 15 V 时有抑制崩塌的能力,而 FP 1.7 μm 的器件在 30 V 漏偏压下仍然表现较好的抑制能力.由此可见,无论低压或者高压情况下场板结构都可以有效的抑制电流崩塌,而钝化对崩塌的抑制作用在高漏压条件下会急剧下降,但是当器件工作在高压状态时,场板尺寸对器件抑制崩塌的能力有很大的影响.

为了更好地研究场板结构对电流崩塌的抑制机理,我们分析器件产生电流崩塌的原因.由于自发极化和压电极化作用,在 AlGaIn/GaN 异质结界面会形成指向 AlGaIn 表面的内建电场,当 AlGaIn 层达到一定厚度后,界面处电场会达到 10^6 V/cm 量级,高电场会使共价键产生离化电子,离化电子在电场作用下,漂移到 AlGaIn/GaN 异质结界面,形成 2DEG,为了维持电中性,在表面会留下大量空穴,表现为电子陷

阱^[9].器件关态时,虽然沟道中不会有电子隧穿到表面,但由于此时栅下电场比较大,会有较大的栅泄漏电流进入 AlGaIn 层.这些栅注入电子会隧穿到栅漏之间靠近栅极的表面态,从而形成“虚栅”,导致电流崩塌^[10].器件采用 SiO_2 钝化后,隔断了电子从栅隧穿到表面的通道,同时减小了表面态密度,从而减少了隧穿到表面态的电子数目.但是,随着栅偏压的升高,栅下方电场峰值也增大,引起栅泄漏电流的增大,从而加剧了虚栅的充电,导致电流崩塌.因此,栅偏压较高时,钝化器件不能有效抑制崩塌效应.

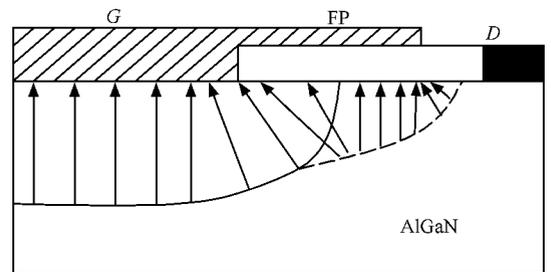


图4 场板结构对电场强度的调制

如图 4 所示,场板结构通过改变靠近栅极边缘的耗尽层边界的弯曲程度,调制电场分布并且减小其峰值.栅下电场峰值的减小极大地降低了栅泄漏电流,对比我们的器件,钝化后 HMET 在 -20 V 时栅泄漏电流为 μA 级,而做场板后器件在相同条件下栅泄漏电流为几十 nA 级.栅泄漏电流的降低减少了满足隧穿条件能隧穿到表面态的电子.另外,电子从 AlGaIn 层隧穿到介质层的隧穿概率 P 为

$$P = \exp\left[-\left(\frac{8\pi}{3}\right)\left(\frac{2m_n^*}{h^2}\right)^{1/2}\left(E_g\right)^{3/2}\left(\frac{1}{q|E|}\right)\right], \quad (1)$$

其中 m_a^* 为电子有效质量, E_g 为 AlGaIn 禁带宽度, h 为普朗克常数. 由 (1) 式可知, 电场峰值的降低会减小 AlGaIn 层中电子隧穿到介质层的概率, 从而降低电子被表面陷阱俘获的概率. 因此, 场板结构很好地阻止了电子隧穿到表面态, 抑制了虚栅的充电, 从而抑制电流崩塌效应.

然而, 仅仅依靠降低电场峰值和栅泄漏电流并不能完全消除电流崩塌. 我们认为, FP 下淀积的 SiO_2 对虚栅提供了一个放电途径, 从而有利于抑制崩塌效应. 具体分析如下: 在漏偏压 V_d 时, 虚栅下的高场区宽度 X_d 可以估算为

$$X_d = \frac{2\epsilon\epsilon_0 V_d}{qN_s}, \quad (2)$$

其中 N_s 为沟道中 2DEG 的单位电子密度, 一般来说 $N_s \approx 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. 当漏偏压较低时, 由 (2) 式可看出, 虚栅下的高场区宽度也比较窄, 而且栅下垂直电场峰值也较低, 所以, 此时虚栅充电电荷密度比较小 (电子陷阱俘获率较小). 在这样的偏压下, 栅极和介质层构成的放电途径 (如图 5 所示途径 1) 能提供足够电流来对虚栅放电. 当漏偏压较高时, 高场区向漏极方向扩展, 宽度增大. 通过栅极的放电途径不能提供足够大的电流来及时给虚栅放电. 而此时, 场板缩短了放电途径 (如图 5 所示途径 2), 所以能提供足够的放电电流. 显然, 要使得场板能够有效的提供放电途径, 场板长度必须大于高场区宽度. 随着漏偏压的不断升高, 耗尽层宽度也增大, 要完全抑制电流崩塌效应, 所需要的场板长度也越大. 这就解释了我们在实验中碰到的高漏偏压情况下, 不同场板尺寸抑制电流崩塌能力不同的现象.

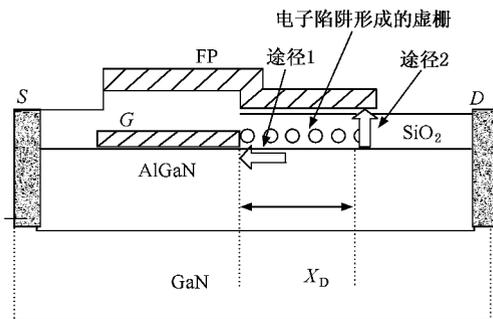


图 5 介质对虚栅的放电过程

类状态, 假设漏极静态偏置点为 V_B , 漏电压峰值 $V_{BM} \approx 2V_B$. 根据 (2) 式, 我们可以大概估计在特定工作偏压下, 完全抑制电流崩塌所需要的场板长度, 如 $V_{BM} = 50 \text{ V}$, $V_B = 25 \text{ V}$ 时, $X_d = 0.5 \mu\text{m}$. 要完全抑制电流崩塌, 所需要的在介质上方的场板长度为 $0.5 \mu\text{m}$. 这就为我们设计特定工作电压下的场板器件尺寸提供了一个参考.

再来计算虚栅放电所需电流的大小. 俘获电子的表面态密度 N_F 正比与沟道 2DEG 单位电子密度 N_s , $N_F = \alpha N_s$. 这里, α 称为俘获因子. 假设器件的宽度为 W , 则虚栅充电总电荷可以表示为

$$Q_T = q\alpha N_s W X_d = 2\alpha\epsilon\epsilon_0 W V_d. \quad (3)$$

表面充电电荷放电所需要的电流 I_s 可表示为

$$I_s = \frac{Q_T}{\tau} = 2\alpha\epsilon\epsilon_0 W V_d / \tau, \quad (4)$$

其中 τ 为表面电荷放电时间, 显然, I_s 越大, 虚栅放电时间越短, 器件崩塌程度也就越小. 关于 τ 的大小, 不同的报道往往在很大的范围内变化. 对于典型的 $\tau \approx 10^{-3} - 10^{-6}$, 当 $\alpha = 1$ 时 $I_s = 10^{-8} - 10^{-5} \text{ A/mm}$. 对与绝缘性很好的介质, 往往无法提供这么大的 I_s 来给表面电荷放电. 因此, 高绝缘介质的 FP 不能消除电流崩塌效应, 具有弱导电性质的介质制作的 FP 能有效抑制崩塌效应.

4. 结 论

本文在不同的漏偏压下, 对钝化器件和不同尺寸场板器件抑制电流崩塌的能力进行测试. 发现, 在漏偏压较低时, 场板和钝化都能抑制电流崩塌效应, 但场板效果是显著的. 随着漏偏压的升高, 钝化对崩塌的抑制作用急剧下降, 而合适尺寸的场板器件仍能有效的抑制崩塌现象. 实验中还发现, 高漏偏压下, 场板尺寸对场板抑制电流崩塌的能力有显著影响. 分析后认为, 场板结构能够抑制电流崩塌, 原因有两个: 一是降低了电场峰值, 极大的减小了栅泄漏电流, 减小了电子被表面陷阱俘获的概率, 从而抑制虚栅的充电过程; 二是场板下的介质层能够提供表面充电电荷的放电途径, 有利于虚栅的放电. 本文还通过场板介质放电模型解释了高漏偏压下场板尺寸显著影响器件抑制电流崩塌能力原因.

实际应用中, HEMT 通常工作在 A 类或者 AB

- [1] Wu Y F , Keller B , Fini P P 1997 *Electronics Letters* **33** 1742
- [2] Khan M A , Kumar V , Lu W 2002 *Electronics Letter* **38** 252
- [3] Binari S C , Ikossi K , Roussos J A 2001 *IEEE Trans Electron Devices* **48** 465
- [4] 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]
- [5] Tarakji A , Simin G , Ilinskaya N 2001 *Appl Phys. Lett.* **78** 2169
- [6] Adivaranhan V , Koudymov A , Rai S , Yang J , Simin G , Asif Khan M 2005 *IEEE Device Research Conference* **1** 177
- [7] Goud C B , Bhat K N 1994 *IEEE Trans Electron Devices* **41** 1856
- [8] Lee C , Tserng H , Witkowski L , Saunier P , Guo S , Albert B , Birkhahn R , Munns G 2004 *Electronics Letter* **40** 24
- [9] Trew R J , Bilbro G L , Kuang W 2005 *IEEE Microw Magazine* **6** 56
- [10] Hasegawa H , Inagaki T , Ootomo S 2003 *Microelectron and Nanometer Structures* **21** 1844

Current collapse mechanism of field-plated AlGaIn/GaN HEMTs^{*}

Wei Wei Lin Ruo-Bing Feng Qian Hao Yue

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

(Received 28 April 2007 ; revised manuscript received 6 June 2007)

Abstract

Current collapse restrain ability of passivated AlGaIn/GaN HEMTs and AlGaIn/GaN HEMTs with varying field-plate (FP) length is investigated under different drain bias . The results show that , the passivated HEMTs suffer no current collapse at relatively low but not at higher drain bias , while the HEMTs with optimal field-plate suffer no current collapse for all drain bias used in our tests . Under high drain bias , the FP length plays a crucial role in the current collapse removal . After a thoroughly analysis , it can be concluded that FP structure not only restrains the trapping of virtual gate , but also discharge the virtual gate . Finally , a discharging model of dielectric under FP is presented to explain the effect of FP length on current collapse removal .

Keywords : AlGaIn/GaN HEMT , field plate , current collapse

PACC : 7280E , 7340Q

^{*} Project supported by the National Major Fundamental Research 973 Program of China (Grant Nos. 51327020301 , 2002CB311904) .