

场板抑制 GaN 高电子迁移率晶体管电流崩塌的机理研究*

毛维^{1)†} 杨翠²⁾ 郝跃¹⁾ 张进成¹⁾ 刘红侠¹⁾ 马晓华²⁾ 王冲¹⁾ 张金凤¹⁾
 杨林安¹⁾ 许晟瑞¹⁾ 毕志伟¹⁾ 周洲¹⁾ 杨凌¹⁾ 王昊¹⁾

1)(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)

2)(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2010年7月3日收到; 2010年8月10日收到修改稿)

通过实验和数值器件仿真研究了钝化 GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMTs)、栅场板 GaN HEMTs 和栅源双层场板 GaN HEMTs 电流崩塌现象的物理机理, 建立了电流崩塌强度与帽层中载流子浓度、陷阱电离率和电场的内在联系. 研究表明, 场板可以有效调制帽层中横向和纵向电场的强度分布, 并可有效调制纵向电场的方向, 减弱栅极附近电场强度, 增加场板下方电场强度, 这会减弱栅极附近自由电子的横向运动, 增强场板下方自由电子的纵向运动, 进而可以有效调制帽层中自由电子浓度的分布, 提高陷阱的电离率, 减小器件的电流崩塌.

关键词: 电流崩塌, 钝化器件, 场板器件, 陷阱电离率

PACS: 72.80.Ey, 73.40.Qv

1. 引言

近几年, 场板 (field-plate) 结构在 GaN HEMTs 器件中的应用研究成为了国际上一个热点领域, 将场板应用于 HEMTs 器件已经成为趋势. 场板可以提高器件击穿电压, 有助于提高器件输出功率, 这是众多研究者关注的主要方面^[1-4]. 然而, 有关场板抑制器件电流崩塌方面的理论研究, 目前国内和国际上还鲜见报道, 且仅限于单层场板方面^[5-8], 没有形成一致结论. 电流崩塌是限制 GaN HEMTs 器件在微波频率下输出功率的主要因素^[9], 相关研究^[10-12]表明 AlGaIn 势垒层表面和帽层中的陷阱会导致 GaN HEMTs 器件发生电流崩塌, 为了减小陷阱效应以抑制电流崩塌, 研究者们采用了许多方法, 如表面预处理^[13]、优化钝化条件^[14]、采用新材料结构^[15]和新器件结构^[16]等等. 然而场板会如何影响这些陷阱并抑制电流崩塌, 其内在物理机制还有待进一步研究.

本文通过实验和数值器件仿真研究了单层栅场板和栅源双层场板对 GaN HEMTs 器件电流崩塌的抑制能力, 深入分析了场板对帽层中电场的方向和强度的调制作用, 研究了电流崩塌强度与帽层中

载流子浓度、陷阱电离率和电场的内在联系, 揭示了场板抑制电流崩塌的内在物理机理.

2. 器件样品与实验

实验采用的异质结材料由 MOCVD 制备, 衬底为 (0001) 面双面抛光蓝宝石, 层结构自下而上依次为 100 nm AlN 成核层, 1.4 μm GaN 缓冲层, 1.5 nm AlN 插入层, 23 nm AlGaIn 势垒层和 2 nm GaN 帽层, 各层材料均未有有意掺杂. 测量得到 AlGaIn 层的 Al 组分为 30%, 室温 Hall 效应测量显示材料的方块电阻为 $360\Omega/\square$, 电子迁移率为 $1418\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 电子面密度为 $1.2 \times 10^{13}\text{ cm}^{-2}$. 采用反应离子刻蚀 (RIE) 实现器件有源区的隔离, 欧姆接触制备采用电子束蒸发 Ti/Al/Ni/Au (22 nm/140 nm/55 nm/45 nm) 并在 870°C 氮气环境中退火 40 s. 栅极制备采用电子束蒸发 Ni/Au/Ni (45 nm/200 nm/20 nm), 之后采用 PECVD 沉积 60 nm SiN 作为钝化层, 再在 SiN 层上面电子束蒸发金属 Ti/Au (20 nm/100 nm) 制作栅场板. 最后采用 PECVD 沉积 200 nm SiN 作为保护层, 并在其上面电子束蒸发金属 Ti/Au (20 nm/100 nm) 制作源场板. 为了进行比较研究, 整片

* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: JY10000925002), 国家自然科学基金 (批准号: 60976068, 60936005) 和国家科技重大专项 (批准号: 2008ZX01002-002) 资助的课题.

† E-mail: mwxidian@126.com

材料上同时制作了钝化而没有场板的器件(钝化器件)、栅场板(gfp)器件和栅源双层场板(gsfp)器件. 所有器件栅长均为 $0.6\ \mu\text{m}$, 源漏间距为 $5\ \mu\text{m}$, 栅漏间距为 $3.7\ \mu\text{m}$, 栅宽为 $100\ \mu\text{m}$, 漏极一侧有效栅场板长度为 $0.4\ \mu\text{m}$, 源极一侧有效栅场板长度为 $0.2\ \mu\text{m}$, 有效源场板长度为 $0.9\ \mu\text{m}$. 图 1 给出了栅源双层场板器件的结构.

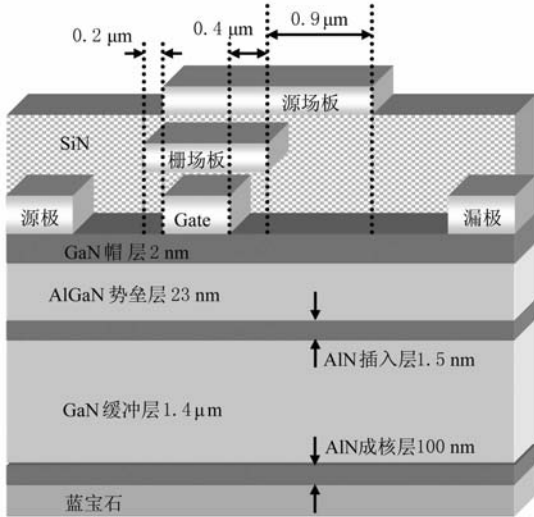


图 1 栅源双层场板器件的结构

图 2 为采用 Keithley 4200-SCS 半导体特性测试仪进行双脉冲测试和直流测试获得的转移特性曲线. 双脉冲测试中, 漏源电压和栅源电压均采用脉冲信号, 其宽度为 $500\ \text{ns}$, 周期为 $0.1\ \text{ms}$, 漏源电压由偏置电压 $V_{\text{DSQ}} = 15\ \text{V}$ 激励至测试电压 $V_{\text{DS}} = 10\ \text{V}$, 同时栅源电压由偏置电压 $V_{\text{GSQ}} = -8\ \text{V}$ 激励至测试电压 $V_{\text{GS}} = V_{\text{m}}$, V_{m} 为测试栅压, 输出电流是 $V_{\text{DS}} = 10\ \text{V}$ 和 $V_{\text{GS}} = V_{\text{m}}$ 时的电流. 由图 2 可见, SiN 钝化并没有完全消除电流崩塌现象, 栅源电压为 $2\ \text{V}$ 时, 钝化器件电流崩塌量高达 55% , 而 gfp 器件电流崩塌量减小为 40% , gsfp 器件电流崩塌量仅为 33% . 与钝化器件相比, 采用栅场板可以使器件电流崩塌量缩减 15% , 而采用栅源双层场板可以使器件电流崩塌量缩减 22% . 因此, 采用场板可以进一步减小 GaN HEMTs 器件的电流崩塌效应. 图 3 为器件栅极泄漏电流随漏源电压的变化曲线, 由图可知漏源电压 $V_{\text{DS}} = 15\ \text{V}$ 时, 钝化器件、gfp 器件和 gsfp 器件的栅极泄漏电流分别为 $0.186\ \text{mA}/\text{mm}$, $0.187\ \text{mA}/\text{mm}$ 和 $0.190\ \text{mA}/\text{mm}$, 这三种器件的栅极泄漏电流近似相等, 说明栅极泄漏电流并不是产生上述现象的主要原因.

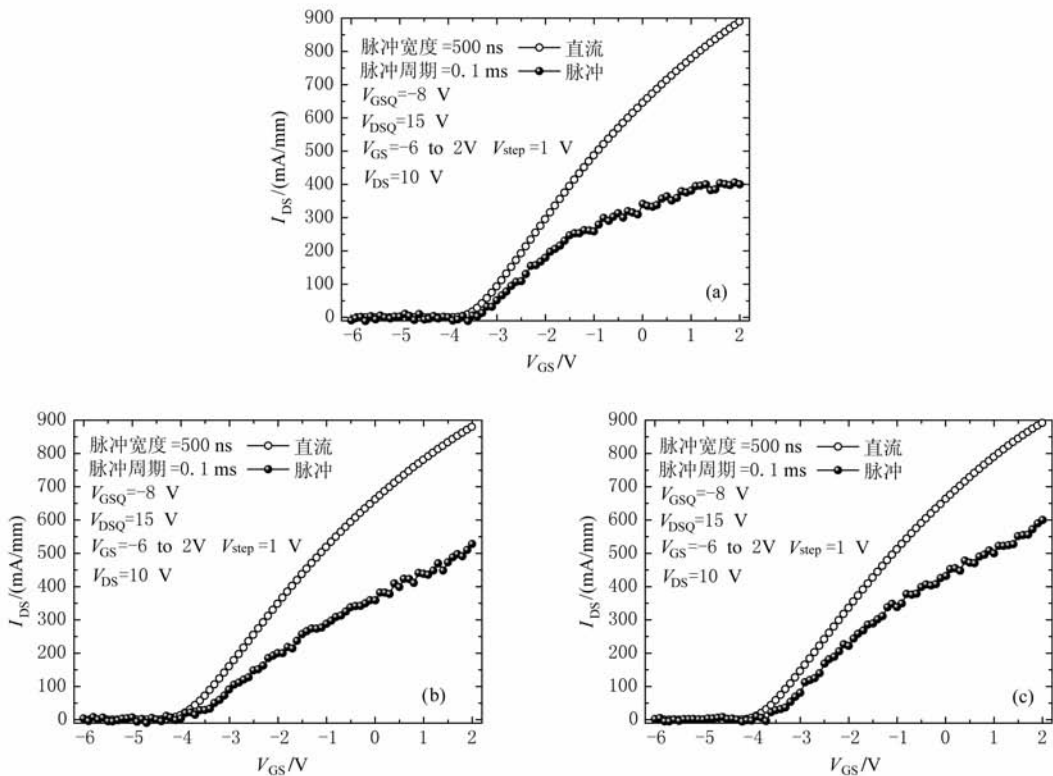


图 2 双脉冲测试和直流测试转移特性 (a) 钝化器件; (b) 栅场板器件; (c) 栅源双层场板器件

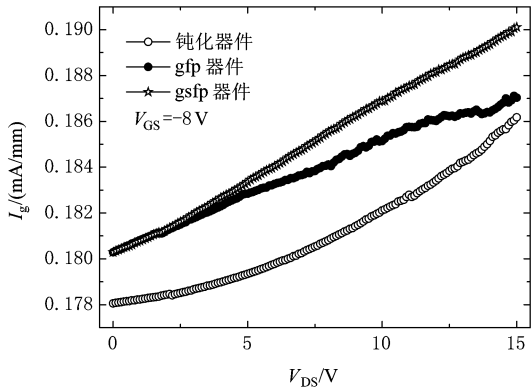


图3 器件栅极泄漏电流随漏源电压的变化曲线

3. 数值器件仿真与分析

为了深入分析上述实验现象,本文采用商用二维数值器件仿真软件 Silvaco atlas 建立了图 1 所示器件的模型. 该模型采用了漂移扩散输运模型、Caughey 迁移率模型、Shockley - Read - Hall 复合模型、表面复合模型、电子隧穿模型等. 为了提高仿真收敛速度,器件模型中省略了 AlN 插入层,但为了真实反映 AlN 插入层对沟道载流子迁移率的改善作用^[17],仿真中采用了测量获得的迁移率 ($1418 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$). 仿真中考虑了自发和压电极化效应,利用极化相关理论^[18,19] 计算得到极化电荷面密度为 $1.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$,将极化正电荷置于 AlGaIn 势垒层与 GaN 缓冲层界面处,将等量的极化负电荷置于 GaN 帽层与 AlGaIn 势垒层界面处. 各层材料背景载流子浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. 另外,仿真中还采用了施主和受主两种陷阱模型^[12,20]:施主陷阱均匀分布于 GaN 帽层,浓度为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,陷阱能级距离导带底 0.3 eV ,俘获截面为 $1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$;为了确保器件有良好的关断特性,受主陷阱均匀分布于 GaN 缓冲层中,浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,陷阱能级距离价带顶 0.76 eV ,俘获截面为 $2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$.

器件处于关断状态时,栅极会产生一定的泄漏电子,这些电子在运动过程中如果被 GaN 帽层中的施主陷阱俘获,就会导致沟道中电子的减少. 在器件开启以后,这些被陷阱俘获的电子要经历一定时间才能摆脱陷阱束缚,产生“虚栅”效应^[9,21],从而引起电流崩塌. 由此可知,器件电流崩塌量的大小主要取决于关断状态时俘获电子的施主陷阱数量,即由电离状态转变为中性的陷阱数量,因此电流崩

塌量的大小可以通过帽层中陷阱的电离率来反映. 帽层中陷阱的电离率越低,即俘获的电子越多,表明电流崩塌量越大. 仿真中发现受主陷阱对“虚栅”的形成基本没有贡献,因此本文重点从器件关断状态 ($V_{\text{DSQ}} = 15 \text{ V}, V_{\text{GSQ}} = -8 \text{ V}$) 时帽层中施主陷阱的电离率着手来分析电流崩塌的强弱. 由于各类器件栅极泄漏电流测量值近似相等,为了研究场板影响帽层中施主陷阱电离率的内在机理,下文仿真中通过对电子隧穿参数的调整,确保各器件有相等的栅极泄漏电流.

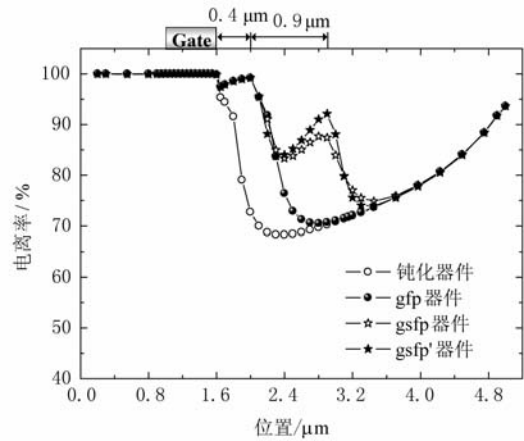


图4 GaN 帽层中陷阱电离率的分布

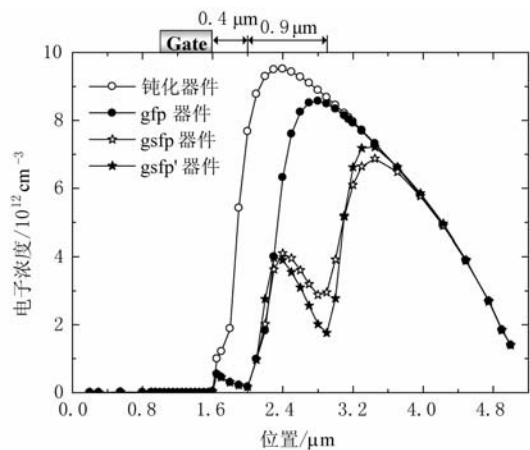


图5 GaN 帽层中自由电子浓度的分布

图 4 给出了仿真得到的 GaN 帽层中陷阱电离率的分布,栅极靠近漏极一侧位于 $1.6 \mu\text{m}$ 处,图 5—图 7 中的栅极也位于此处. gsfp' 器件为栅源双层场板器件,结构与 gsfp 器件相同,只是 SiN 保护层厚度为 160 nm . 由图 4 可见,各器件栅极下方及栅源区域的帽层中陷阱几乎完全电离,电离率近似相等,表明场板对该区域陷阱基本没有影响. 在整个

栅漏区域的帽层中,钝化器件的电离率均非常低,电流崩塌显著. gfp 器件由于采用栅场板结构,场板下方区域的电离率已提高至 95% 以上,而场板以外其他区域电离率与钝化器件相当,表明栅场板在一定程度上抑制了电流崩塌. gsfp 器件中源场板下方区域电离率比 gfp 器件更高,表明栅源双层场板进一步抑制了电流崩塌. 与 gsfp 器件相比,gsfp' 器件进一步提高了源场板下方区域的电离率,表明在栅源双层场板结构中减小保护层厚度可以进一步提高源场板抑制电流崩塌能力. 以上分析结果与图 2 观测到的实验现象非常符合.

陷阱电离率的分布与载流子浓度的分布有着密切的联系. 根据 Simmons 与 Taylor 的研究^[22],施主陷阱的电离率可以表示为

$$F = \frac{p\sigma_p v_p + e_n}{n\sigma_n v_n + p\sigma_p v_p + e_n + e_p}, \quad (1)$$

其中, $e_n = \sigma_n n_i v_n \exp[(E_t - E_i)/kT]$ 和 $e_p = \sigma_p n_i v_p \exp[(E_i - E_t)/kT]$ 分别为电子和空穴的发射率, n 和 p 分别为自由电子和空穴浓度, n_i 为本征载流子浓度, σ_n 和 σ_p 分别为电子和空穴的俘获截面, v_n 和 v_p 分别为电子和空穴的热速度, E_i 为本征费密能级, E_t 为施主陷阱能级, k 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度. 上述各参量中除了 n 和 p 以外均为常量,因此电离率的大小取决于电子和空穴的浓度. 图 5 给出了 GaN 帽层中自由电子浓度的分布,由于空穴浓度非常低,电离率的大小最终主要取决于自由电子浓度,所以文中没有给出空穴浓度分布. 从图 5 可见,钝化器件电子浓度在整个栅漏区域均较高,所以陷阱电离率非常低;gfp 器件中场板下方尤其是边缘区域的电子浓度大大减小,该区域电离率显著提高;与 gfp 器件相比,gsfp 器件和 gsfp' 器件中源场板下方区域的电子浓度均有一定程度减小,尤其是 gsfp' 器件减小更为明显,即源场板的引入进一步提高了电离率,且源场板距离器件表面越近提高越明显. 由上述分析可见,场板对陷阱电离率的影响是通过改变 GaN 帽层中自由电子的浓度来实现的,因此有必要深入分析场板调制自由电子浓度的物理机理.

图 6 和图 7 分别给出了 GaN 帽层中横向和纵向电场的分布. 由图 6 可见,在栅漏区域的帽层中, gfp 器件、gsfp 器件和 gsfp' 器件栅极附近横向电场大小近似相等,且较钝化器件显著减小,而栅场板下方尤其是边缘附近区域中横向电场有所增强. 栅极附近横向电场的减小导致此处栅极泄漏电子的横

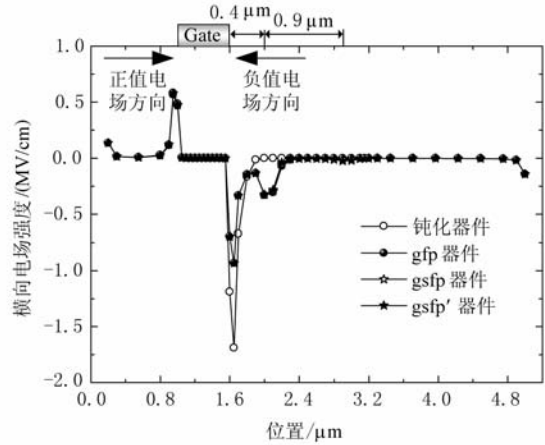


图 6 GaN 帽层中横向电场的分布

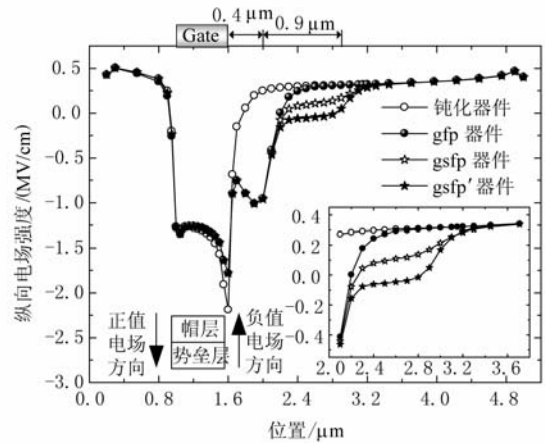


图 7 GaN 帽层中纵向电场的分布

向运动减弱,进而使得被电场扫入到场板下方帽层中的栅极泄漏电子数量减少,降低了场板下方帽层区域的自由电子浓度. 虽然栅场板下方附近区域较强的横向电场使电子的运动加快,但图 7 中纵向电场的增加更为明显,所以此处的电子易被扫入势垒层,电子浓度受纵向电场影响而进一步减小,陷阱电离率进一步增加. gsfp 器件和 gsfp' 器件虽然均采用了源场板,但源场板只是使其下方帽层中电场略微增加,对电离率的影响较小. 由图 7 可见,各场板器件栅极靠近漏极一侧附近的纵向电场大小近似相等,尽管较钝化器件有所减弱,但其值仍然较大,大部分自由电子会被扫入势垒层,导致此处的电子浓度非常低,电离率非常高,因此纵向电场的微小变化对电离率的影响可以忽略.

对图 7 进行深入分析可以发现,在栅漏区域的帽层中,钝化器件的纵向电场基本都是正值,即电场方向由帽层指向势垒层,这会阻碍泄漏电子向势

垒层的运动,使得帽层中自由电子浓度增加,从而提高了陷阱俘获电子的概率,降低了陷阱电离率.相比之下,各场板器件中栅场板下方附近纵向电场为负值,表明栅场板调制了纵向电场的方向,使其改为由势垒层指向帽层,这会加速泄漏电子进入势垒层,从而降低帽层中自由电子浓度,提高陷阱的电离率. gfp 器件中,没有被栅场板下方纵向电场扫入势垒层的电子,在横向电场的作用下会继续向漏极运动,并可能被陷阱俘获. gsfp 器件中的源场板减小了其下方区域的纵向电场强度,对电子进入势垒层的阻碍作用有所减弱. 所以与钝化器件和 gfp 器件相比,源场板下方附近帽层中的自由电子浓度更低,电离率更高. 对于 gsfp' 器件, SiN 保护层厚度的减小增强了源场板的作用,由图 7 及其插图可见源场板下方纵向电场的方向发生改变,电场方向由势垒层指向帽层,使电子加速向势垒层运动,并减小电子浓度,提高了陷阱电离率.

由以上分析可知,场板既可以调制帽层中横向电场的强度,又可以调制其纵向电场的强度和方

向. 因而场板可以通过调制栅极泄漏电子的运动,来调制自由电子浓度的分布,进而提高陷阱的电离率,减小器件的电流崩塌.

4. 结 论

本文通过实验和数值器件仿真分别研究了钝化器件、栅场板器件和栅源双层场板器件的电流崩塌现象,深入分析了场板对器件帽层中电场的方向和强度的调制作用,研究了电流崩塌强度与帽层中载流子浓度、陷阱电离率和电场的内在联系,揭示了电流崩塌的内在物理机理. 研究结果表明,场板可以有效调制帽层中横向电场的强度分布,减小了栅极靠近漏极一侧边缘的电场强度,降低场板下方区域的自由电子浓度;同时场板还可以调制帽层中纵向电场的方向和强度分布,进一步降低了场板下方的自由电子浓度. 所以在 GaN HEMTs 器件中采用场板结构可以有效调制帽层中自由电子浓度的分布,提高陷阱的电离率,减小器件的电流崩塌.

- [1] Kumar V, Chen G, Guo S P, Adesida I 2006 *IEEE Transactions on Electron Devices* **53** 1477
- [2] Wu Y F, Moore M, Wisleder T, Saxler A, Parikh P 2006 *IEEE 64th Device Research Conference* PA, USA, June, 2006 p151
- [3] Wei W, Hao Y, Feng Q, Zhang J C, Zhang J F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2456 (in Chinese) [魏巍、郝跃、冯倩、张进城、张金凤 2008 物理学报 **57** 2456]
- [4] Lee J W, Kuliev A S, Adesida I 2008 *Japanese Journal of Applied Physics* **47** 1479
- [5] Koudymov A, Adivarahan V, Yang J, Simin G, Khan A A 2005 *IEEE Electron Device Letters* **26** 704
- [6] Wei W, Lin R B, Feng Q, Hao Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 467 (in Chinese) [魏巍、林若兵、冯倩、郝跃 2008 物理学报 **57** 467]
- [7] Nakajima A, Itagaki K, Horio K 2009 *Phys. Status Solidi* **6** 2840
- [8] Brannick A, Zakhleniuk N A, Ridley B K, Shealy J R, Schaff W J, Eastman L F 2009 *IEEE Electron Device Letters* **30** 436
- [9] Daumiller I, Theron D, Gaquiere C, Vescan A, Dietrich R, Wieszt A, Leier H, Vetury R, Mishra U K, Smorchkova I P, Nguyen N X, Kohn E 2001 *IEEE Electron Device Letters* **22** 62
- [10] Xi G Y, Ren F, Hao Z B, Wang L, Li H T, Jiang Y, Zhao W, Han Y J, Luo Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7238 (in Chinese) [席光义、任凡、郝智彪、汪莱、李洪涛、江洋、赵维、韩彦军、罗毅 2008 物理学报 **57** 7238]
- [11] Tirado J M, Sanchez-Rojas J L, Izpura J I 2007 *IEEE Transactions on Electron Devices* **54** 410
- [12] Meneghesso G, Rampazzo F, Kordos P, Verzellesi G, Zanoni E 2006 *IEEE Transactions on Electron Devices* **53** 2932
- [13] Romero M F, Jimenez A, Sanchez J M, Brana A F, Gonzalez - Posada F, Cuervo R, Calle F, Munoz E 2008 *IEEE Electron Device Letters* **29** 209
- [14] Yang L, Hao Y, Ma X H, Quan S, Hu G Z, Jiang S G, Yang L Y 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 117104
- [15] Hu G Z, Yang L, Yang L Y, Quan S, Jiang S G, Ma J G, Ma X H, Hao Y 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 087302
- [16] Shen L, Palacios T, Coblenz C, Corrión A, Chakraborty A, Fichtenbaum N, Keller S, Denbaars S P, Speck J S, Mishra U K 2006 *IEEE Electron Device Letters* **27** 214
- [17] Zhou Z T, Guo L W, Xing Z G, Ding G J, Tan C L, Lu L, Liu J, Liu X Y, Jia H Q, Chen H, Zhou J M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6013 (in Chinese) [周忠堂、郭丽伟、邢志刚、丁国建、谭长林、吕力、刘建、刘新宇、贾海强、陈弘、周均铭 2007 物理学报 **56** 6013]
- [18] Ambacher O, Smart J, Shealy J R, Weimann N G, Chu K, Murphy M, Schaff W J, Eastman L F 1999 *Journal of Applied Physics* **85** 3222
- [19] Piprek J 2007 *Nitride Semiconductor Devices - Principles and Simulation* (New York: Wiley-VCH) p24-53
- [20] Faqir M, Verzellesi G, Chini A, Fantini F, Danesin F, Meneghesso G, Zanoni E, Dua C 2008 *IEEE Transactions on*

Study on the suppression mechanism of current collapse with field-plates in GaN high-electron mobility transistors *

Mao Wei^{1)†} Yang Cui²⁾ Hao Yue¹⁾ Zhang Jin-Cheng¹⁾ Liu Hong-Xia¹⁾ Ma Xiao-Hua²⁾ Wang Chong¹⁾
Zhang Jin-Feng¹⁾ Yang Lin-An¹⁾ Xu Sheng-Rui¹⁾ Bi Zhi-Wei¹⁾ Zhou Zhou¹⁾ Yang Ling¹⁾ Wang Hao¹⁾

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

2) (School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 3 July 2010; revised manuscript received 10 August 2010)

Abstract

The physical mechanisms underlying current collapse effects in the passivated GaN high-electron mobility transistors (HEMTs), the gate field-plated GaN HEMTs and the gate-source field-plated GaN HEMTs are investigated in experiments and numerical device simulations. And the intrinsic relationships of the current collapse with the carrier concentration, the probability of traps ionization, and the electric field within the cap layer are established. Results show that the direction of the longitudinal electric field, as well as the intensity distribution of both the transverse and longitudinal electric fields within the cap layer, can be modulated effectively by the field-plates. The electric field intensity near the gate is reduced and that beneath the field-plates increased. Due to the effects of the field-plates on electric field, the transverse movement of electrons near the gate is reduced, and the longitudinal electron movement beneath the field-plates is increased. These affects the electron concentration distribution and the ionization probability of the traps in the cap layer, which makes field-plates effective for the reduction in the current collapse.

Keywords: current collapse, passivated devices, field-plated devices, probability of traps ionization

PACS: 72.80.Ey, 73.40.Qv

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. JY10000925002), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60976068, 60936005) and the National Key Science & Technology Special Project (Grant No. 2008ZX01002-002).

† E-mail: mwxidian@126.com