

# 直流大电压下 GaN HEMT 电流崩塌效应探索

龙 飞<sup>†</sup> 杜江锋 罗 谦 周 伟 夏建新 杨谟华

(电子科技大学微电子与固体电子学院, 成都 610054)

**摘要:** 基于 GaN HEMT 器件物理和实验分析测试结果, 提出了一种 GaN 电流崩塌效应的新物理模型. 研究表明, 在大漏极电压条件下, 沟道电子易于注入到 GaN 缓冲层中, 并被缓冲层中的陷阱所俘获, 耗尽二维电子气, 从而导致电流崩塌效应. 该模型描述了电流崩塌效应与缓冲层中陷阱的相互关系, 并获得了电流崩塌前后迁移率与二维电子气浓度乘积的归一化值. 该结果可望用于 GaN HEMT 器件进一步的理论探讨和实验研究.

**关键词:** 电流崩塌效应; GaN HEMT; 陷阱; 物理模型

EEACC: 2560S

中图分类号: TN302

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)S0-0227-04

## 1 引言

近年来, GaN 在微波功率范围的应用技术有了显著的提高<sup>[1,2]</sup>, 作为宽禁带半导体, 它具有高饱和速度、高击穿电压和优良的高温工作特性. 业已发现, GaN 器件漏极电压超过一定值时, 随着漏极电压的增加, 电流开始下降, 不能达到理想的值, 这就是 GaN 器件的电流崩塌效应. 由于电流崩塌效应的产生, 让器件的漏极电流减小, 膝区电压增大, 从而减小了功率, 让它失去了大电流、大功率的意义.

国内外用多种方法<sup>[3,4]</sup> 研究电流崩塌的本质, 也提出了相应的观点. 其一认为是由于 GaN 器件表面有很高的电场使得表面态捕获了电子, 耗尽了二维电子气, 致使沟道电子密度减小, 从而使漏极电流减小. 另一种观点是在大漏极电压条件下, 二维电子气中的电子被激发到缓冲层中去, 并被缓冲层中的陷阱所捕获, 不能起到导电的作用, 所以才使得漏极电流比理想情况有所下降. 本文从 GaN HEMT 器件电流崩塌与缓冲层中陷阱的关系出发, 提出一种新的电流崩塌物理模型.

## 2 物理模型

图 1 为典型 GaN HEMT 器件的结构图. 器件在蓝宝石衬底上用 MOCVD 方法生长外延层. AlN 成核层厚度为 20nm, GaN 缓冲层厚度为 3 $\mu$ m, AlGaIn 中 Al 的组分是 30%, 厚度为 25nm.

根据谢孟贤等人<sup>[5]</sup> 的理论, 典型的 GaN HEMT 器件采用缓变沟道近似, 漏极电流沿沟道的

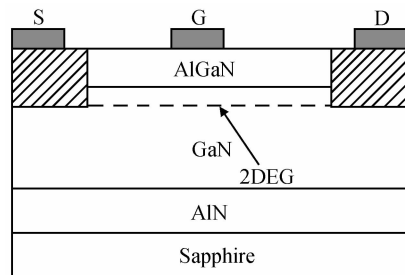


图 1 典型的 GaN HEMT 器件结构图  
Fig.1 Typical GaN HEMT device structure

分布可表示为

$$I_D = -\mu_n W Q_n(x) \frac{dV(x)}{dx} \quad (1)$$

式中  $W$  是沟道宽度;  $Q_n(x)$  是单位表面积的沟道电荷;  $V(x)$  是表面势沿沟道的分布. 若单位面积的栅电容为  $C_0$ , 栅电压为  $V_G$ , 则有

$$Q_n(x) = -C_0 V_G \quad (2)$$

$$= -C_0 [V_G - V(x) - V_T] \quad (3)$$

假定电子迁移率  $\mu_n$  恒定, 对  $I_D(x)$  积分, 得到漏极电流

$$\int_0^{L_G} I_D(x) dx = I_D L_G \quad (4)$$

$$= \mu_n W \int_0^{V_{DS}} C_0 [V_{GS} - V(x) - V_T] dV(x) \quad (5)$$

$$I_D = \mu_n W \frac{C_0}{L_G} [(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2] \quad (6)$$

在  $V_{DS}$  较小时, 将得到线性关系为

$$I_D \approx \mu_n W \frac{C_0}{L_G} (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad (7)$$

在  $V_{DS}$  较大时, 漏电流将饱和, 由  $\frac{dI_{DS}}{dV_{DS}} = 0$  得

<sup>†</sup> 通信作者. Email: cd\_draco@yahoo.com.cn

2005-12-08 收到, 2006-04-13 定稿

$$I_{DS} = \mu_n W \frac{C_0}{2L_G} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (8)$$

对短沟 HEMT, 还必须计入电子漂移速度  $v_d$  与电场  $\epsilon$  的关系. 在强电场下, 器件的性能更有可能被电子的饱和速度  $v_{sat}$  所限制. 据此, 可以求出与事实相符合的饱和电流  $I_{DS}$  表达式, 在  $V_T \approx 0$  时, 有

$$I_D = \mu_n W \frac{C_0}{2L_G} (V_{GS}^2 - V_{GD}^2) \quad (9)$$

$$I_{DS} = \mu_n W \frac{C_0}{2L_G} (V_{GS}^2 - V_{GDSat}^2) \quad (10)$$

在  $\epsilon = \epsilon_m$  时, 有

$$I_{DS} = \mu_n W C_0 V_{DGsat}^2 \epsilon_m \quad (11)$$

则

$$V_{GDSat} = \frac{I_{DS}}{\mu_n W C_0 \epsilon_m} \quad (12)$$

所以

$$I_{DS} = \mu_n W \frac{C_0}{2L_G} \left[ (V_{GS}^2 - \left( \frac{I_{DS}}{\mu_n C_0 W \epsilon_m} \right)^2) \right] \quad (13)$$

通过对实验的分析, 提出电流崩塌后电流方程应为

$$I_D = \left( \mu_n \frac{C_0 W}{2L} + \beta + \alpha V_{GS} \right) \times [2(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (14)$$

在  $V_{DS}$  较小时, 有

$$I_D = 2 \left( \mu_n \frac{C_0 W}{2L} + \beta + \alpha V_{GS} \right) (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad (15)$$

在  $V_{DS}$  较大时, 有

$$I_D = \left( \mu_n \frac{C_0 W}{2L} + \beta + \alpha V_{GS} \right) (V_{GS} - V_T)^2 \quad (16)$$

式中  $\alpha$  和  $\beta$  为电流崩塌效应有关的参数, 与二维电子气浓度、电子迁移率和缓冲层中陷阱密度相关.

### 3 结果与分析

基于 Binari 等人<sup>[1]</sup>的测试结果, 分析 GaN 器件的输出特性, 在忽略热效应情况下, 得到如图 2 所示的结果. 器件参数为  $W = 50 \mu\text{m}$ ,  $L = 1 \mu\text{m}$ ,  $V_T = -6.84 \text{V}$ , 霍尔测量得到二维电子气浓度是  $1.2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ , 迁移率是  $1460 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ .

如图 2 所示, 当所加  $V_{DS}$  最大不超过 10V 时, 得到没有电流崩塌的结果; 当所加  $V_{DS}$  最大是 20V 时, 由于沟道电子能量增加, 一部分电子注入到缓冲层中被陷阱俘获, 所以得到电流崩塌后的结果. 通过此次实验所得的数据, 加上已知的器件参数, 有

$$C_0 = \epsilon_i / d \quad (17)$$

式中  $\epsilon_i$  为 AlGaIn 的介电常数;  $d$  为 AlGaIn 的厚度, 近似认为 AlGaIn 全部被耗尽, 代入方程 (14), 求解得到  $\alpha = -3.8$ ,  $\beta = -3.8$ . 将上式用图来表示, 如图 2 中实线和虚线所示.

由于所加的最大漏极电压不同, 得到不同的电

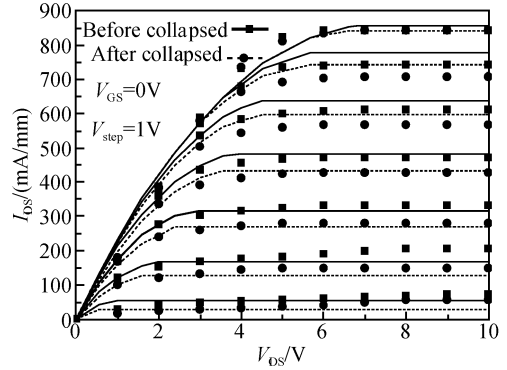


图 2 GaN HEMT 输出特性和拟合结果 方点是崩塌前实验值, 圆点是崩塌后实验值.

Fig. 2 GaN HEMT output characteristics and simulation results Squares are non collapsed experiment results and dots are collapsed experiment results.

流曲线, 这就是电流崩塌效应产生的结果. 在饱和区, 电流有明显的减小, 使得器件功率大大减小. 可以考虑成, 当所加的漏极电压较大时, 电子从沟道注入到 GaN 缓冲层中, 并被缓冲层中的陷阱所俘获, 从而耗尽了二维电子气, 最终致使漏极电流减小.

$\alpha$  和  $\beta$  是电流崩塌效应模型拟合实验结果的参数, 根据实验拟合结果得到

$$\mu_n \frac{C_0 W}{2L} = -5\alpha \quad (18)$$

$$\mu_n \frac{C_0 W}{20L} \left( 1 + \frac{1460}{\mu_n} \right) = -\beta \quad (19)$$

方程 (14) 可变为

$$I_D = \left[ \mu_n \frac{C_0 W}{2L} - \mu_n \frac{C_0 W}{20L} \left( 1 + \frac{1460}{\mu_n} \right) - \mu_n \frac{C_0 W}{10L} V_{GS} \right] \times [2(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (20)$$

分析模型得知, 电流崩塌效应的大小主要由二维电子气浓度和迁移率决定, 而二维电子气的耗尽可以等效于器件表面增加了一个栅极. Ventury<sup>[2]</sup>假设, 由于电流崩塌效应的产生, 近似于在器件的表面增加了一个虚拟栅极.

虚拟栅概念对方程 (18) 做出了一种假设, 认为电流崩塌效应的产生, 可以等效于栅极加长, 使得沟道中耗尽区宽度变大, 二维电子气浓度减小, 最终导致漏极电流减小, 而电流崩塌的大小是由二维电子气浓度和迁移率决定的.

比较电流崩塌前后二维电子气浓度和电子迁移率乘积的结果, 发现电流崩塌前后的二者乘积的归一化值呈现一定的规律, 若只考虑图 2 中饱和区部分, 用崩塌后的电流比崩塌前的电流, 有

$$I_{d1} / I_{d2} = \left( \mu_{n1} \frac{C_0 W}{2L} + \beta + \alpha V_{GS} \right) (V_{GS} - V_T)^2 / \left( \mu_{n2} \frac{C_0 W}{2L} + \alpha V_{GS} \right) (V_{GS} - V_T)^2 \quad (21)$$

式中  $V_{GS}$ ,  $V_T$  等都是固定的器件参数. 由于沟道

中二维电子气被部分耗尽,沟道电子浓度将减小,使得电子迁移率减小,所以假设崩塌前后变化的只是沟道的二维电子气浓度和电子迁移率。

将二维电子气浓度和电子迁移率乘积的归一化值作图,如图 3 所示。

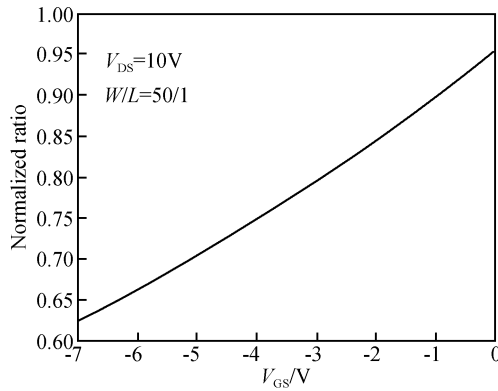


图 3 电流崩塌前后二维电子气浓度和迁移率乘积的归一化值

Fig.3 Normalized value of product of 2DEG sheet density and electron mobility with and without collapsed

图中表示出了电流崩塌后和崩塌前的二维电子气浓度和电子迁移率乘积等效值之比,可表示为

$$\frac{n_{s1}\mu_{n1}}{n_{s2}\mu_{n2}} = \eta\theta^{|V_{GS}|} \quad (22)$$

式中  $\eta$  和  $\theta$  为拟合出的参数,与缓冲层中陷阱有关,得到  $\eta=0.95, \theta=0.94$ . 由于  $\theta=0.94$  近似为 1, 所以电流崩塌的大小变化近似于一次线性关系。

如图 3 所示,电流崩塌效应呈现出公式(22)所示的规律,可以根据此模型,计算 GaN 器件的电流崩塌效应.由此模型所得到的参数较准确,从图 2 分析得出,此模型所提出的电流方程与实验所得到的结果符合得较好.此模型所得到的结果可适用于其他具有电流崩塌效应的 GaN 器件,而且结果也较准确。

分析另一器件的输出特性,在忽略热效应的情况下,结果如图 4 所示.器件参数为  $W=300\mu\text{m}, L=4\mu\text{m}, V_T=-6.5\text{V}$ ,霍尔测量的二维电子气浓度是  $2.1 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ ,电子迁移率是  $654\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。

图中饱和区模型分析结果与实验结果相差不大,线性区的误差主要是因为 GaN 器件受泄漏电流的影响较大所致。

此结果表明,电流崩塌效应产生的主要原因是由于缓冲层中陷阱俘获注入的沟道电子所引起.把电流崩塌效应归结为陷阱的作用而不归结为表面态,是因为电流崩塌的大小是与缓冲层的电阻率相关,而且在器件表面加上钝化层以后,仍然会有电流崩塌现象。

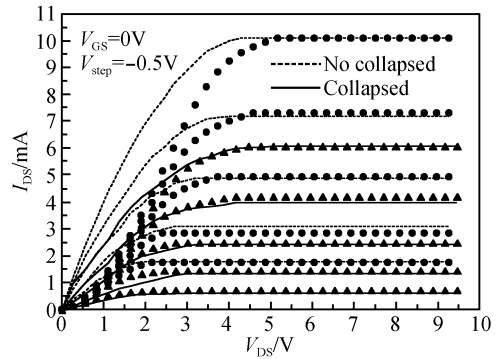


图 4 GaN HEMT 器件输出特性与拟合结果 虚线为崩塌前拟合结果,实线为崩塌后拟合结果,▲为崩塌前实验结果,●为崩塌后实验结果。

Fig.4 GaN HEMT device output characteristics and simulation results Dashed lines are non collapsed simulation results, real lines are collapsed simulation results,▲ are no collapsed experiment results, and ● are collapsed experiment results.

若器件的电子迁移率越低,则电流崩塌效应越明显.而电流崩塌效应的大小近似于一个线性变化。 $\beta$ 是由于缓冲层中陷阱俘获注入的沟道电子而导致漏极电流下降的参数。

## 4 结论

根据对 GaN HEMT 器件输出特性的研究,建立了表示电流崩塌效应的新物理模型。

在漏压较大的情况下,出现了电流崩塌效应,通过对器件的输出特性计算,得到电流崩塌的大小为  $\mu_n \frac{C_0 W}{20L} (1 + \frac{1460}{\mu_n}) + \mu_n \frac{C_0 W}{10L} V_G$ , 电流崩塌前后的归一化比值为  $0.95 \times \theta^{|V_{GS}|}$ . 在大漏极电压条件下,二维电子气中的电子被激发到缓冲层中去,并被缓冲层中的陷阱所捕获,不能起到导电的作用,使得漏极电流产生崩塌。

基于这种模型,可以表示电流崩塌效应,并得到比较准确的电流崩塌参数。

## 参考文献

- [1] Ishida H, Hirose Y, Murata T, et al. A high power Tx/Rx switch IC using AlGaIn/GaN HFETs. IEEE Electron Devices Meeting, 2003; 23. 6. 1
- [2] Quay R, Kiefer R, Van Raay F, et al. AlGaIn/GaN HEMTs on SiC operating at 40GHz. IEEE Electron Devices Meeting, 2002; 671
- [3] Binari S C, Ikossi K, Roussos J A, et al. Trapping effects and microwave power performance in AlGaIn/GaN HEMTs. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(3): 465
- [4] Vetury R, Zhang N Q, Keller S, et al. The impact of surface

states on the DC and RF characteristics of AlGaIn/GaN HFETs. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(3): 560

- [5] Xie Mengxian, Liu Nuo. Compound semiconductor materials and devices. Chengdu: Press of University of Electronic Sci-

ence and Technology of China, 2000 (in Chinese) [谢孟贤, 刘诺. 化合物半导体材料与器件. 成都: 电子科技大学出版社, 2000]

## A Research on Current Collapse of GaN HEMTs Under DC High Voltage

Long Fei<sup>†</sup>, Du Jiangfeng, Luo Qian, Zhou Wei, Xia Jianxin, and Yang Mohua

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, University of Electron Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Based on GaN HEMTs' device physics and experiment testing results, a new physical model of current collapse is presented. Research results show that under high drain voltage the channel electrons easily eject into GaN buffer layer and are trapped, depleting 2DEG and inducing current collapse. This model describes relationship between current collapse and traps in buffer layer, obtaining product  $0.95 \times \theta^{|V_{GS}|}$  of electron mobility and 2DEG density before and after current collapse. This conclusion can be assisted in AlGaIn/GaN HEMT devices' further theory research and investigation.

**Key words:** current collapse; GaN HEMT; trap; physical model

**EEACC:** 2560S

**Article ID:** 0253-4177(2006)S0-0227-04

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: cd\_draco@yahoo.com.cn

Received 8 December 2005, revised manuscript received 13 April 2006