

AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管中 kink 效应的半经验模型*

马骥刚^{1)2)†} 马晓华^{1)2)†} 张会龙¹⁾²⁾ 曹梦逸²⁾ 张凯²⁾ 李文雯²⁾ 郭星²⁾
廖雪阳²⁾ 陈伟伟¹⁾²⁾ 郝跃²⁾

1) (西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

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

(2011年4月10日收到; 2011年6月23日收到修改稿)

初步分析了 AlGaIn/GaN 器件上的 kink 效应. 在直流模型的基础上, 建立了 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管中 kink 效应的半经验模型, 并加入了 kink 效应发生的漏源偏压与栅源偏压的关系. 该模型得出较为准确的模拟结果, 可用来判断 kink 效应的发生和电流的变化量. 最后, 我们采用模型仿真结合实验分析的方法, 对 kink 效应进行了一定的物理研究, 结果表明碰撞电离对 kink 效应的发生有一定的促进作用.

关键词: AlGaIn/GaN, 高电子迁移率晶体管, kink 效应, 模型

PACS: 73.40.Kp, 73.61.Ey, 78.30.Fs

1 引言

目前, AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (high electron mobility transistor, HEMT) 是国际发展热点, 已经在诸多方面取得突破, 在高温^[1]、高频^[2]、高功率^[3]等方面都极具应用前景. 近年来, 国内在 AlGaIn/GaN 器件上已经开展了多方面的研究工作^[4,5]. 尽管 GaN 基 HEMT 的制备工艺和器件特性已日趋成熟和稳定, 但仍有诸多可靠性问题尚未解决, 例如电流崩塌^[6]、自热效应^[7]等现象依然存在. 因此, GaN 基 HEMT 器件的可靠性问题是国内外的研究重点.

kink 效应, 是指由于阈值电压的漂移, 在一定的漏、栅电压下, 输出电流突然增大的现象. 它会导致器件输出电流和漏导不稳定性的增加, 引起直流与射频特性的差异. 最近, kink 效应的相关研究^[8,9]表明, 陷阱对载流子的俘获和释放作用在 kink 效应中扮演着重要角色. 而 Brar 等人^[10]第一次在高性能的 AlGaIn/GaN HEMT 器件上报道了 kink 效应, 认为碰撞电离是导致其产生的重要原因. 我们不难发现, kink 效应与碰撞电离效应存在

一定关系, 其发生的漏源电压与偏压的关系较为复杂^[11]. 因此, kink 效应产生的原因还待深入研究. 我们发现, 在 SOI 和 GaAs 器件上已经建立了相应的物理模型, 尽管这两类器件中 kink 效应的产生机理有所不同, 其形式却很相近^[12], 而 GaN HEMT 器件上 kink 效应的物理模型还有待建立.

本文对 AlGaIn/GaN HEMT 器件上的 kink 效应进行分析, 初步建立了 GaN 器件上 kink 效应的半经验模型, 其中加入了 kink 效应发生的漏源偏压与栅源偏压的关系, 并通过仿真与实验相结合的方法, 直观方便地对 AlGaIn/GaN HEMT 器件中的 kink 效应进行了一定的物理分析.

2 器件制备与现象分析

采用 MOCVD 在蓝宝石衬底上进行 AlGaIn/GaN 异质结构材料生长. 材料均未掺杂, 包括成核层、1 μm GaN 缓冲层以及约 20 nm 厚的 AlGaIn 势垒层. Al 组分 30%. 二维电子气迁移率和载流子浓度分别为 1267 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 和 $1.12 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. 台面隔离采用 ICP 干法刻蚀, 深度为 200 nm. 欧姆

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(批准号: 2011CBA00606) 资助的课题.

† E-mail: xhma@xidian.edu.cn

接触 Ti/Al/Ni/Au, 850 °C 温度下氮气中退火后接触电阻为 1.0 Ω·mm. 采用 PECVD 钝化 Si₃N₄. 器件栅长 0.4 μm, 栅宽 100 μm, 源漏间距为 3.5 μm, 栅源距离 0.7 μm. 在室温下采用 AgilentB1500 A 半导体参数分析仪对器件进行直流特性测试.

图 1 是室温下测得的输出特性曲线. V_{ds} 从 0 扫描至 10 V, V_{gs} 从 -5 V 步进至 -1 V, 步长为 0.1 V (只画出步长为 0.2 V 的曲线). 观察发现, 饱和区输出曲线发生弯曲 (kink 效应), 在 $V_{gs} = -2.4$ V 的曲线中, ΔI_d 约为 42 mA/mm. 发生 kink 效应的源漏电压 ($V_{ds,kink}$) 与 V_{gs} 是非线性的变化关系 (虚线所示). 我们认为, 电流的突然增加可能与特定 V_{gs}, V_{ds} 下的电场存在关系. 同时, 随 V_{gs} 增大, ΔI_d 先增大后减小, 而在阈值电压附近达到最大值, 并且栅压为阈值电压附近的输出曲线 kink 效应较为显著.

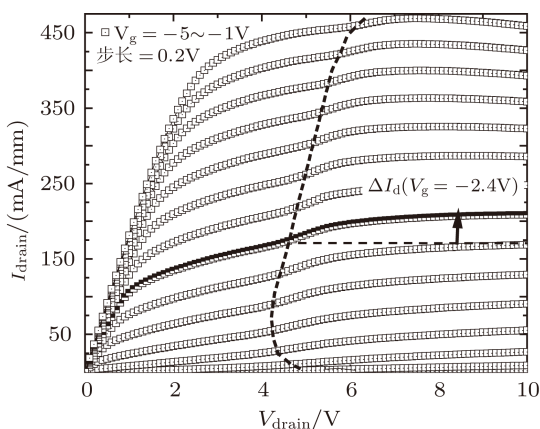


图 1 输出特性曲线中的 kink 效应, (V_{gs} 从 -5 V 到 0 V, 步长 0.2 V)

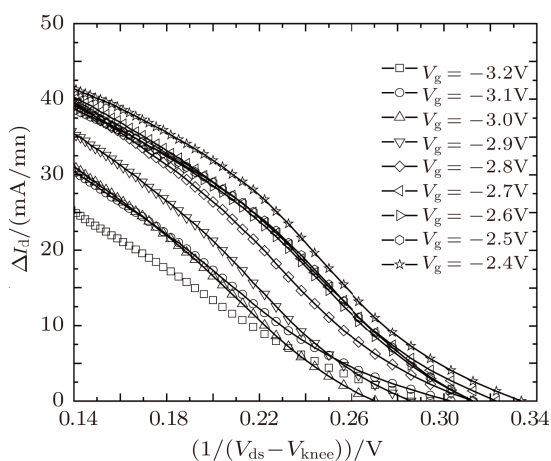


图 2 $\Delta I_d-1/(V_{ds} - V_{knee})$ 曲线 (栅压 $V_{gs} = -3.2$ V— -2.4 V)

我们采用 Somerville 等提到的方法^[13], 提取电

流变化量 ΔI_d 和 $V_{ds,kink}$. 图 2 是在 $V_{gs} = -3.2$ V 到 $V_{gs} = -2.4$ V, 间隔 0.1 V, $V_{ds} = 10$ V 下, $\Delta I_d-1/(V_{ds} - V_{knee})$ 的关系曲线. 由图可知, 当栅压在阈值电压附近范围内 ($V_g = -3.2$ V— -2.4 V), ΔI_d 与 $1/(V_{ds} - V_{knee})$ 是近似线性的关系.

3 建立半经验模型

在传统的 Curtice 模型中, 膝点电压 V_{knee} 被认为是常数, 而实际中, 膝点电压与栅电压 V_{gs} 存在线性的关系. 刘丹等首次加入了栅源电压对膝点特性的影响, 在 Curtice 模型以及 Agilent 公司的 EEHEMT1 模型的基础上, 建立了较为准确的 $I-V$ 特性曲线的直流半经验模型^[14]. 为了确保 GaN HEMT 器件中 kink 效应模型的准确性, 我们首先需要保证转移特性相对准确, 然后, 在仿真得出的输出特性曲线的基础上, 进行 kink 效应的建模. 因此, 我们根据该直流半经验模型, 进行了 Matlab 仿真和参数的调整.

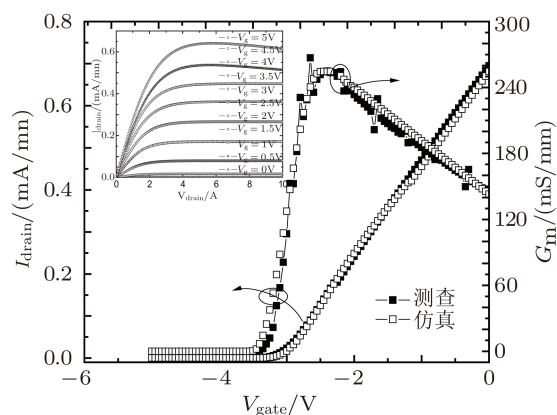


图 3 漏偏压为 10 V 的仿真与测试的转移特性曲线 (插图为仿真的输出曲线)

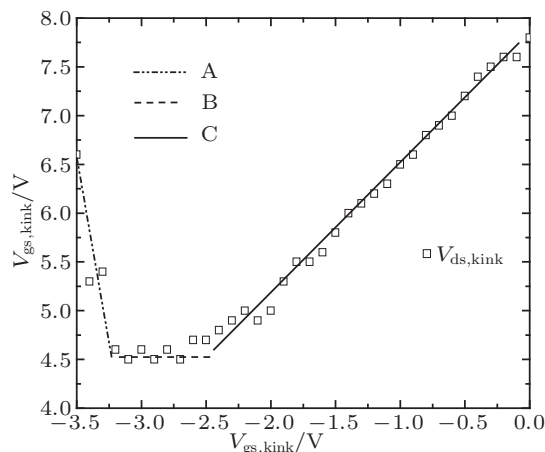


图 4 $V_{ds,kink}$ 与 $V_{gs,kink}$ 分段线性拟合的经验关系曲线

图 3 是仿真与实际测试得到的转移曲线对比. 从转移曲线可以看出, 器件实际测量值与仿真计算的电流、跨导的误差均很小. 因此, 我们以该输出曲线作为 kink 效应的半经验模型的基础.

下面分为两部分来讨论: $V_{ds,kink}$ 与 $V_{gs,kink}$ 的经验关系和 ΔI_d 与 V_{ds} , V_{gs} 的关系. 如图 4 所示, 我们将其分成 A, B, C 三个区域做线性拟合, 作为 $V_{ds,kink}$ 与 $V_{gs,kink}$ 的经验关系. 以下是分段线性函数关系, 将其代入模型:

$$\begin{aligned} V_{gs} > -2.5V, \\ V_{ds,kink} = 7.8 + 1.24 \times V_{gs,kink}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} -3.1V < V_{gs} < -2.5V, \\ V_{ds,kink} = \text{Const} = 4.6V, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_{gs} < -3.1V, \\ V_{ds,kink} = -16.5 \times V_{gs,kink} - 20 \times V_{gs}/3. \end{aligned} \quad (3)$$

碰撞电离与 kink 效应之间的联系最早已经由 Brar 等人 [10] 证实, 而且 Dyakonova 等人 [15] 利用变温实验得出了碰撞电离的具体电场值约为 2.1×10^6 V/cm. Lin 等人 [16] 根据提取的栅极空穴电流, 发现除了陷阱效应, 碰撞电离对低温下 kink 效应的产生起到了重要作用. 另有报道表明, kink 效应的物理模型中存在 ΔI_d 与 $1/(V_{ds} - V_{knee})$ 线性规律 [12]. 在实验中, 我们得到了相似的 ΔI_d 与 $1/(V_{ds} - V_{knee})$ 的线性关系, 如图 2 所示. 采用该方程描述了 ΔI_d 与 V_{ds} , V_{gs} 的关系, 并作为建立 GaN 器件上 kink 效应半经验模型的一部分.

$$\begin{aligned} I_d \propto g_{m0} \times k_B \times T/q \times \ln[1 + A] \times I_{ds} \\ \times \exp(-B/(V_{ds} - V_{knee})). \end{aligned} \quad (4)$$

当与 pre-kink 区 ($V_{ds} < V_{ds,kink}$) 电子浓度相比, 载流子积累量较大时, 指数项是主要部分, 在高漏压 V_{ds} 下, 可得到

$$\Delta I_d |_{\text{Large } V_{ds}} \propto -1/(V_{ds} - V_{knee}), \quad (5)$$

A , B 均为常数. 在 (4),(5) 两式中, 同样需要引入与栅压的关系. 采用 $V_{ds,kink}$ 分段函数代替 V_{knee} 进行修正, 这样对 kink 效应与偏压的关系模拟的精确度大大提高.

图 5 显示的是 kink 效应的半经验模型仿真结果与器件测量值的 I - V 曲线. 我们发现, 饱和区误差很小, 自然效应得到了充分考虑, 同时, kink 效应产生的电压 $V_{ds,kink}$ 与 $V_{gs,kink}$ 的关系也比较准确. 利用误差函数计算, 约为 2%.

然而, 我们也发现, $V_{gs} < -2$ V 的浅饱和区

和 $V_{gs} > -0.5$ V 的线性区误差比较大. $V_{gs} < -2$ V, 电流渐变增加的趋势显著, 这可能是模型 ΔI_d 与 V_{ds} , V_{gs} 的关系存在误差, GaN 器件中较强陷阱效应对 kink 效应的重要影响没有得到充分考虑 [17]. 如图 6, 自热效应导致线性近似 (5) 式误差很大. ΔI_d 甚至出现了负值.

GaAs 器件上采用碰撞电离理论对 kink 效应产生机理进行了解释 [12]. 经过上述模型仿真与实验分析, 我们不难得出, 碰撞电离对 AlGaIn/GaN HEMT 器件上 kink 效应的产生有重要影响, 但是, 电流的变化量 ΔI_d 并非完全来源于碰撞电离, 它与陷阱效应和自热效应也密切相关.

模型仿真和实验结果证明, kink 效应产生的漏极偏置 $V_{ds,kink}$ 及饱和区曲线的误差较小, 该模型可应用在蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN HEMT 器件上, 来初步判断 kink 效应的产生电压 $V_{ds,kink}$ 和电流变化量 ΔI_d .

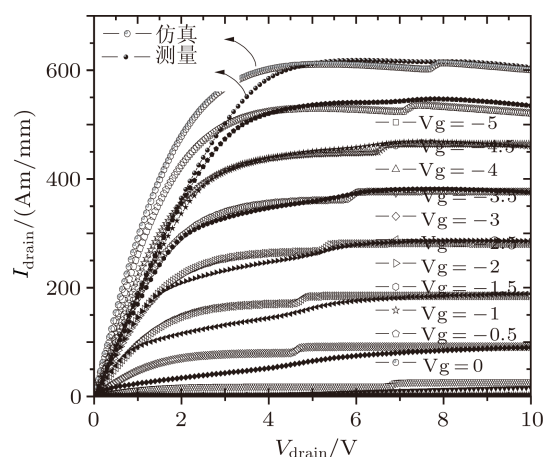


图 5 半经验模型仿真与器件测量的输出曲线

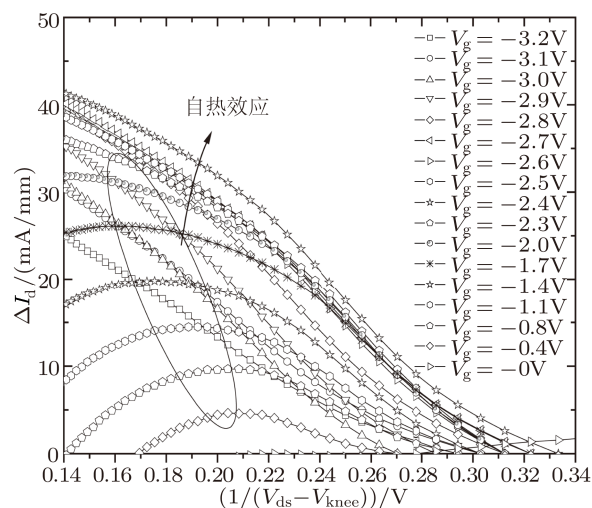


图 6 自热现象导致的非线性 ΔI_d - $1/(V_{ds} - V_{knee})$ 曲线 (栅压 $V_{gs} = -3.2$ V—0 V)

4 结论

本文在直流半经验模型的基础上,建立了 Al-GaN/GaN HEMT 器件上 kink 效应的半经验模型,引入了 kink 效应的产生电压 $V_{ds,kink}$ 与栅偏压的关

系,得出了较为准确的模拟结果.通过模型对 kink 效应进行了一定的物理分析,并说明碰撞电离对产生 kink 效应有一定的促进作用,这也为我们进一步建立更精确的半经验模型和物理模型打下了基础.而陷阱效应对 kink 效应的影响与 kink 效应产生的机理,我们仍需深入研究.

-
- [1] Gaska R, Chen Q, Yang J, Osinsky A, Khan M A, Shur M S 1997 *IEEE Electron Dev. Lett.* **18** 492
- [2] Kumar V, Lu W, Schwindt R, Kuliev A, Simin G, Yang J, Khan M A, Adesida Ilesanmi 2002 *IEEE Electron Dev. Lett.* **23** 455
- [3] Wu Y F, Moore M, Saxler A, Wisleder T, Parikh P 2006 *64th Device Research Conference* p151—152
- [4] Bi ZH W, Feng Q, Hao Y, Yue Y ZH, Zhang ZH F, Mao W, Yang L Y, Hu G ZH 2003 *Acta Phys. Sin.* **58** 7211 (in Chinese) [毕志伟, 冯倩, 郝跃, 岳远征, 张忠芬, 毛维, 杨丽媛, 胡贵州 2009 物理学报 **58** 7211]
- [5] Ma X H, Yu H Y, Quan S, Yang L Y, Pan C Y, Yang L, Wang H, Zhang J CH, Hao Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 027303
- [6] Meneghesso G, Rampazzo F, Kordos P, Verzellesi G, Zanoni E 2006 *IEEE Trans. Electron Devices* **53** 2932
- [7] Jarndal A, Kompa G 2007 *IEEE Trans. Electron Devices* **54** 2830
- [8] Fu L H, Lu H, Chen D J, Zhang R, Zheng Y D, Chen T S, Wei K, Liu X Y 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 173508
- [9] Wang M J, Chen K J 2011 *IEEE Electron Dev. Lett.* **32** 482
- [10] Brar B, Boutros K, DeWames R E, Tilak V, Shealy R and Eastman L 2002 *Proc. IEEE Lester Eastman Conf.* p487—491
- [11] Meneghesso G, Zanon F, Uren M J, Zanoni E 2009 *IEEE Electron Dev. Lett.* **30** 100
- [12] Somerville M H, del Alamo J A, Hoke W 1995 *International Electron Devices Meeting* Washington, DC, USA 201
- [13] Somerville M H, Ernst A, del Alamo J A 2000 *IEEE Trans. Electron Devices* **47** 922
- [14] Liu D, Chen X J, Liu G G, He ZH J, Liu X Y, Wu D X 2006 *Chinese Journal of Semiconductors* **27** 1984 (in Chinese) [刘丹, 陈晓娟, 刘果果, 和致经, 刘新宇, 吴德馨 2006 半导体学报 **27** 1984]
- [15] Dyakonova N, Dickens A, Shur M S, Gaska R, Yang J W 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 2562
- [16] Lin Ch H, Wang W K, Lin P C, Lin C K, Chang Y J, Chan Y J 2005 *IEEE Electron Dev. Lett.* **26** 710
- [17] Liu H X, Hao Y, Zhang T, Zheng X F, Ma X H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 984 (in Chinese) [刘红侠, 郝跃, 张涛, 郑雪峰, 马晓华 2003 物理学报 **52** 984]

A semiempirical model for kink effect on the AlGaIn/GaN high electron mobility transistor*

Ma Ji-Gang¹⁾²⁾ Ma Xiao-Hua^{1)2)†} Zhang Hui-Long¹⁾²⁾ Cao Meng-Yi²⁾
Zhang Kai²⁾ Li Wen-Wen²⁾ Guo Xing²⁾ Liao Xue-Yang²⁾
Chen Wei-Wei¹⁾²⁾ Hao Yue²⁾

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

2) (Key Laboratory for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 10 April 2011; revised manuscript received 23 June 2011)

Abstract

Kink effect is analyzed in AlGaIn/GaN devices primarily. A semiempirical model is given by analyzing the kink effect on AlGaIn/GaN high electron mobility transistor and by considering the relationship between $V_{ds,kink}$ and gate voltage. Due to a little error between simulation results and measured data, this model can be used to identify the occurrence of kink effect and change in drain current. The analyses of experimental results and model simulation lead to a conclusion that impact ionization plays an important role in generating kink effect.

Keywords: AlGaIn/GaN, high electron mobility transistor, kink effect, model

PACS: 73.40.Kp, 73.61.Ey, 78.30.Fs

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CBA00606).

† E-mail: xhma@xidian.edu.cn