

新型双异质结高电子迁移率晶体管的电流崩塌效应研究*

余晨辉^{1)†} 罗向东¹⁾ 周文政²⁾ 罗庆洲³⁾ 刘培生¹⁾

1) (南通大学江苏省专用集成电路设计重点实验室, 南通 226019)

2) (广西大学物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

3) (南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044)

(2012年7月19日收到; 2012年8月5日收到修改稿)

针对传统单结 GaN 基高电子迁移率晶体管器件性能受电流崩塌效应和自加热效应限制的困境, 对新型 AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN 双异质结高电子迁移率晶体管的直流性质展开了系统研究. 采用基于热电子效应和自加热效应的流体动力模型, 研究了器件在不同偏压下电流崩塌和负微分电导效应与 GaN 沟道层厚度的相关. 研究发现具有高势垒双异质的沟道层能更好地将电子限制在沟道中, 显著减小高电场下热电子从沟道层向 GaN 缓冲层的穿透能力. 提高 GaN 沟道层厚度可以有效抑制电流崩塌和负微分输出电导, 进而提高器件在高场作用下的性能. 所得结果为进一步优化双异质结高电子迁移率晶体管结构提供了新思路, 可促进新型 GaN 高电子迁移率晶体管器件在高功率、高频和高温等无线通讯领域内的广泛应用.

关键词: 双异质结高电子迁移率晶体管, 电流崩塌, 热电子效应, 自加热效应

PACS: 73.21.Fg, 73.40.Kp, 73.61.Ey

1 引言

GaN 基高电子迁移率晶体管 (HEMT) 因其在高功率、高频和高温应用中的优异性能吸引了众多研究者的关注^[1,2], 其良好的频率特性, 可覆盖 2—40 GHz 频段内的无线通讯领域, 尤其是在基站、远距离空间通讯等需要高功率、高效率的领域具有广泛的应用前景^[3-5]. 但是电流崩塌效应和自加热效应仍旧制约着 GaN HEMT 器件的性能和可靠性, 限制了这类器件的广泛应用^[6-14]. 现阶段所使用的半导体材料生长工艺的特点, 决定了氮化物器件中存在着大量的缺陷. 针对电流崩塌效应和自加热效应与缺陷之间的内在关系, 研究人员开展了广泛深入的研究和讨论. Wu 等^[15]

与 Klein 等^[16] 证明这些缺陷可以用体陷阱来等效. Binari 等^[10,11] 认为 GaN HEMT 器件的电流崩塌效应与 GaN 缓冲层中的陷阱相关. 在小栅极漏电流情况下, Hu 等^[13] 证实了栅极漏边处的电子被体陷阱俘获, 是改变器件内部电场、造成电流崩塌的重要物理机制. 另外在高功率、高温条件下, 声子的强散射作用使得沟道中电子迁移率下降, 是出现负微分电导效应的基本物理原因. Hu 等^[7] 认为自加热效应是导致出现负微分电导效应的重要因素. 消除上述与缺陷相关联的负面效应对优化器件性能是非常重要的. 为此, 研究者们尝试提出双沟道或双异质结等新型结构器件, 从原理上来规避或改善上述负面效应的不利影响, 从而来提高器件线性和微波输出功率^[3,17,18]. 目前文献报道的 GaN HEMT 研究多专注于传统的 AlGaIn/GaN 单异质

* 国家自然科学基金 (批准号: 11104150, 60906045) 和江苏省自然科学基金 (批准号: BK2010571) 资助的课题.

† E-mail: ychyu@ntu.edu.cn

结 HEMT^[8,19,20]. Wang 等^[21] 则模拟了双异质结高电子迁移率晶体管结构 (DH-HEMT), 为发展新型高效 GaN HEMT 提供了一种解决方法.

在此研究基础上, 本文采用有限元数值模拟计算方法, 系统研究了 AlGa_{0.3}N/GaN/InGa_{0.1}N/GaN HEMT 器件的热电子和自加热效应对器件直流特性的影响规律, 获取了不同偏压下电流崩塌和负微分电导效应与 GaN 沟道层厚度的相关, 为优化 DH-HEMT 结构提供了一种新思路. 本文的数值模拟能够有效地对实验结果进行理论分析, 加深对影响 GaN HEMT 器件性能的与缺陷相关的内在物理机制的理解.

2 器件结构和模型

图 1 所示为本文研究的 Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN/In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN DH-HEMT 器件的剖面示意图, 其中源极、漏极、栅极长度都为 1 μm. Liu 等^[3,22] 报道了量子阱沟道层厚度为 6 nm InGa_{0.1}N 的 DH-HEMT 并给出了制造方法. 本文主要考察不同厚度 (6, 10, 20 nm) 的 GaN 沟道厚度对器件直流性能的影响. III 族氮化物的自发极化与压电极化效应明显强于其他 III-V 族化合物, 仅比铁电体弱一个数量级^[23], 强极化电场对二维电子气 (2DEG) 浓度和电子阱的束缚能力有重要贡献. 考虑到界面陷阱屏蔽效应可能使极化电荷减少^[24], 因此通过理论计算, 设定 AlGa_{0.3}N/GaN 有效界面电荷密度为 $1.68 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, InGa_{0.1}N/GaN 有效界面电荷密度为 $6.68 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. 缺陷是电流崩塌效应的主要原因之一^[10,11,24], GaN 基 HEMT 器件中存在多种缺陷^[16], 但能级较多. 为了提高数值模拟的收敛性, 模型中仅考虑一种主导性的受主型缺陷, 密度为 $N_{aT} = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 俘获截面为 $\sigma_T = 1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$, 缺陷能级位于导带能级下 2.2 eV 处.

图 2 所示为 6, 10 和 20 nm GaN 沟道厚度的 DH-HEMT 的导带分布图, 并与传统的单异质结 GaN 基 HEMT 进行比较. 导带分布图由自洽求解泊松方程和连续性方程得到, 迭代计算中已经包含了极化效应诱导的极化电荷. 如图 2 所示, 由于 GaN 沟道层的极化效应使导带升高, 而相同

厚度的 InGa_{0.1}N 夹层导致的导带升高幅度相同, 所以 GaN 沟道层越宽, 沟道与 GaN 缓冲层之间势垒越高, 即 2DEG 被更好地束缚在沟道中. 同时, 由于 InGa_{0.1}N 中 InN 在界面上的扩散和 InGa_{0.1}N/GaN 界面缺陷较多^[2], 更宽的 GaN 沟道层使 2DEG 在移动中受到 InGa_{0.1}N 层缺陷散射影响更小, 电子迁移率更高. 此外, 从图 2 亦可看出, 有 InGa_{0.1}N 夹层的 DH-HEMT 对电子的束缚效果要明显好于普通的单异质结 HEMT. 为模拟器件中电子的动力学性质, 尤其是热电子效应和自加热效应, 我们采用流体动力 (hydrodynamic) 模型^[19], 模拟 DH-HEMT 器件直流特性, 并基于 Canali 模型^[25] 来考虑 GaN 材料的迁移率高场饱和效应.

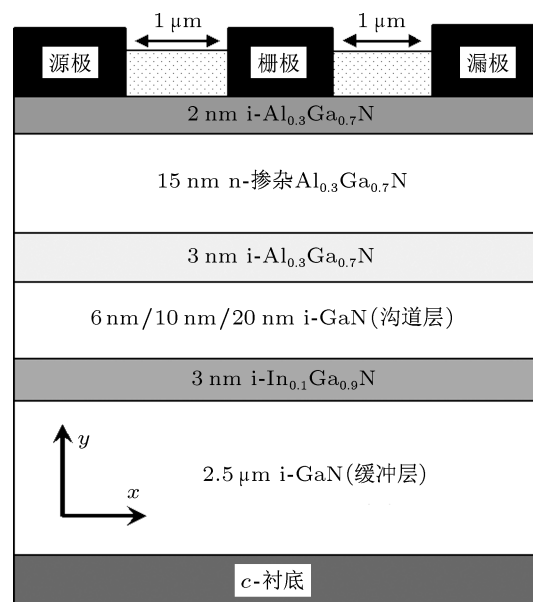


图 1 AlGa_{0.3}N/GaN/InGa_{0.1}N/GaN DH-HEMT 器件结构示意图

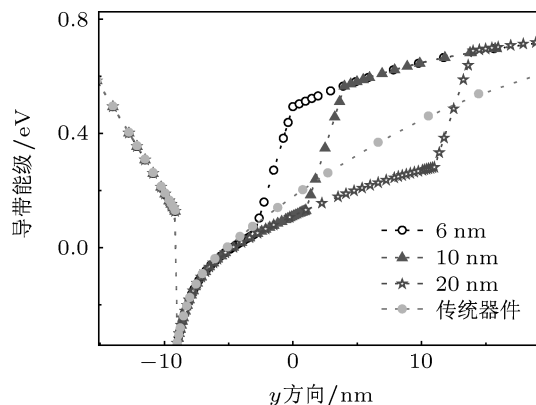


图 2 GaN DH-HEMT 的导带分布曲线图

3 仿真结果与讨论

3.1 GaN 沟道层厚度与热电子效应

图 3 所示为 GaN 沟道层厚度为 6, 10 和 20 nm 的 GaN DH-HEMT 在栅极附近漏极一侧陷阱中束缚电荷的分布. 图 3 中所有图像为漏极电压 $V_{ds} = 10$ V, 栅极电压 $V_{gs} = 0$ V 时的结果. 图 3 中标示了等高线表示的束缚电荷密度, 箭头指示的突起区域束缚电荷密度明显高于同深度的其他区域, 且这些在栅极附近偏漏极一侧, 为产生热电子效应的主要区域. 由图 3 可见, 在 6 和 10 nm 沟道的 GaN DH-HEMT 中, 靠

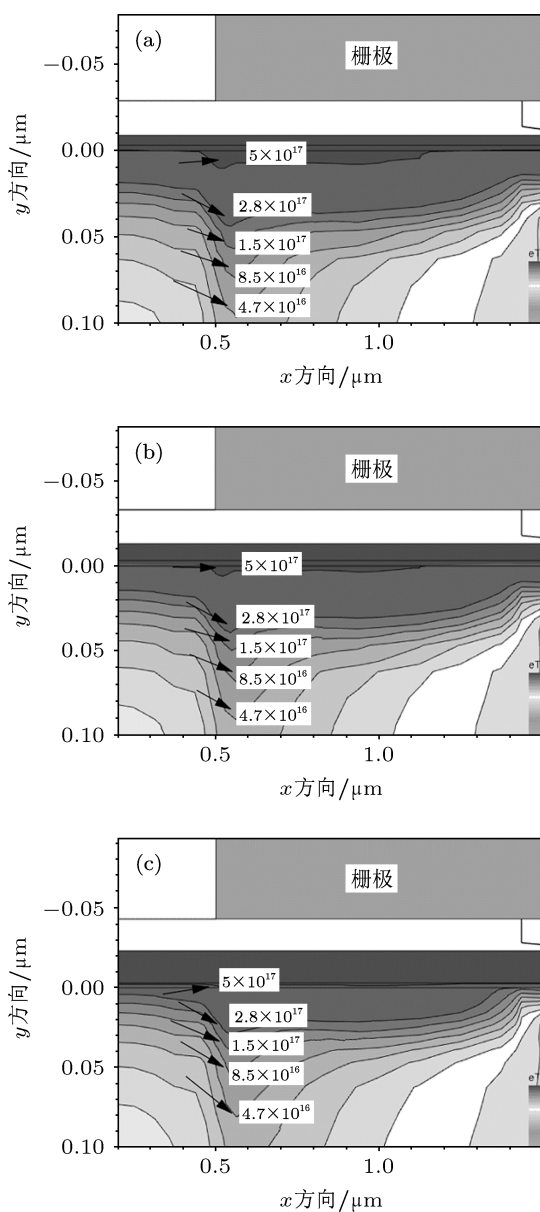


图 3 栅极附近束缚电荷分布图 GaN 沟道层厚度为 (a) 6 nm; (b) 10 nm; (c) 20 nm

近 InGaN 层的 GaN 缓冲层中都有部分区域陷阱完全被电子占据, 10 nm 沟道的 GaN DH-HEMT 中陷阱被完全占据的区域明显小于 6 nm 沟道的 GaN DH-HEMT. 而 6 nm 沟道的 GaN DH-HEMT 中陷阱被完全占据的区域被完全限制在 GaN 缓冲层以外. 在箭头指示的区域, 陷阱电荷沿 y 轴方向的分布与 GaN 沟道层厚度的关系如表 1 所示. 沟道层厚度越大, 热电子效应区域的束缚电荷密度下降就越快, 例如陷阱占空比降到 0.1 以下时, y 轴方向深度为 20 nm 沟道层的 HEMT 比 6 nm 的少 15%. 可以看出, 由于 GaN 沟道层极化导致的导带势垒提升有效地加强了量子阱的束缚能力, 减小了高电场下热电子从沟道层向 GaN 缓冲层穿透的能力, 使在缓冲层体陷阱中, 尤其是栅极附近漏极一侧的束缚电子密度显著下降, 从而有效地减小了热电子效应.

表 1 热电子效应区域陷阱电荷沿 y 轴方向的分布

沟道层厚度/nm	陷阱电荷密度/cm ⁻³			
	2.8×10^{17}	1.5×10^{17}	8.5×10^{16}	4.7×10^{16}
6	42.7 nm	56.0 nm	73.6 nm	96.0 nm
10	38.7 nm	49.8 nm	68.0 nm	91.0 nm
20	29.4 nm	40.0 nm	56.8 nm	81.2 nm

3.2 GaN 沟道层厚度与自加热效应

GaN 沟道层厚度为 6, 10 和 20 nm 的 GaN DH-HEMT 的微分电导曲线如图 4 所示, 其中小图为 V_{ds} 为 0—10 V 的完整曲线, 大图为其中存在负微分电导的部分. 6 nm 沟道的 DH-HEMT 在 $V_{ds} = 4.2$ — 5.2 V 时具有峰值为 -0.086 mS/mm 的负微分电导, 10 nm 沟道的 DH-HEMT 在 $V_{ds} = 4.4$ — 4.8 V 时具有峰值为 -0.0087 mS/mm 的负微

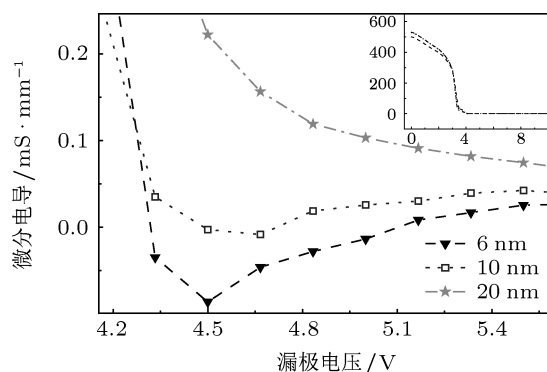


图 4 GaN DH-HEMT 微分电导曲线图

分电导, 而 20 nm 沟道的 DH-HEMT 不存在负微分电导现象. 可见随着沟道层厚度增加, 负微分电导现象明显减弱以至消失, 这表示器件中的自加热效应随着沟道层厚度增加受到了明显的抑制.

GaN 沟道层厚度为 6, 10 和 20 nm 的 GaN DH-HEMT 的电子温度分布图分别如图 5(a)—(c) 所示. 图中圈出区域为器件中电子温度较高的热点区域 (其他深色区域为低温区域). 热电子效应指的是由于在器件尺寸缩小的过程中, 电源电压不可能和器件尺寸按同样比例缩小, 这样导致 HEMT 器件内部电场增强. 当电场强度超过一定量级时, 电子

在两次散射间获得的能量将可能超过它在散射中失去的能量, 从而使一部分电子的能量显著高于热平衡时的平均动能而成为热电子. 从图 5 可以清晰地看出, 热点区域的范围呈显著缩小的趋势, 而热点中心温度略有升高 (6, 10, 20 nm 分别为 891, 899 和 940 K). 热点的产生机理是电子在漏极附近受热电子效应的影响小于栅极附近, 所以此处陷阱中束缚的电子在电场作用下从陷阱中发射出来, 在电子电势能转化为动能的过程中, 受到晶格、陷阱等散射, 部分能量变为电子热能, 即自加热效应. 由于 GaN 沟道层厚的器件对电子束缚能力强使热电子效应显著减小, 栅极到漏极之间的电阻变小, 从而由栅极到漏极电场变化小于 GaN 沟道层薄的器件, 所以 GaN 沟道层厚的器件中热点范围小且偏向漏极一侧. 而热点偏向漏极使由同能级陷阱发射出的电子具有更高的势能, 从而热点中心电子温度升高. 而与热点范围的显著变化相比, 电子温度的升高可以忽略不计. 由图 5(a), (b), (c) 对比可见, 沟道层厚度增加能显著地缩小热点的范围, 这可能是自加热效应的减弱, 从而使负微分电导现象减弱以致消失的原因.

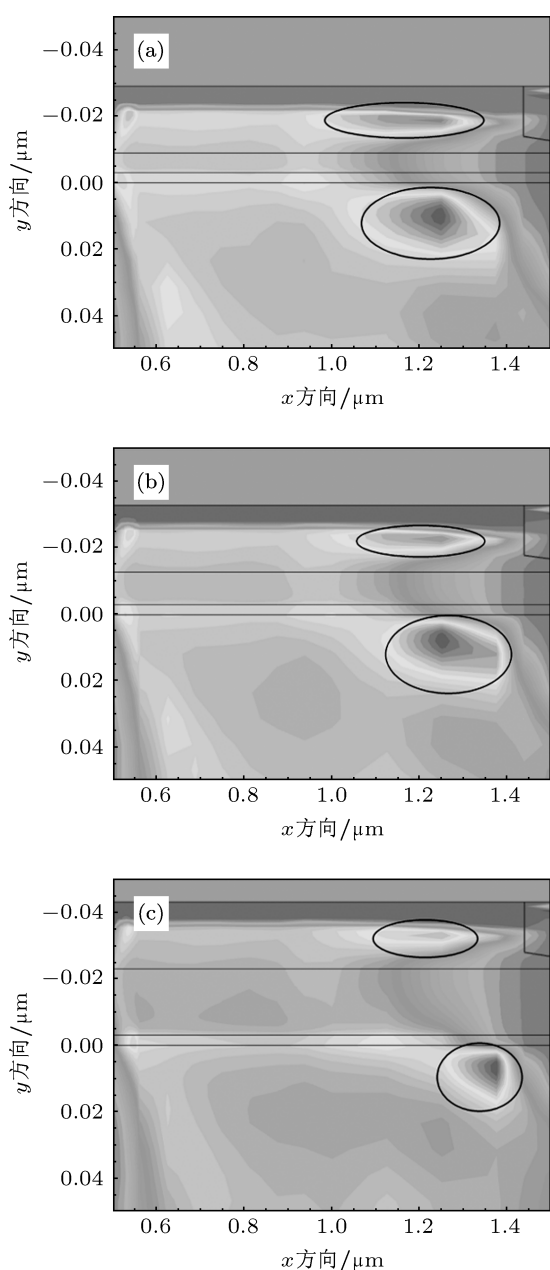


图 5 热点附近的电子温度分布图 GaN 沟道层厚度为 (a) 6 nm; (b) 10 nm; (c) 20 nm

3.3 GaN DH-HEMT 的直流性质

GaN 沟道厚度为 6, 10 和 20 nm 的 GaN DH-HEMT 和传统单异质结 HEMT 的输出特性曲线如图 6 所示. 所有输出特性曲线皆在 $V_{gs} = 0$ V 下测得. 如图 6 所示, 20 nm 沟道 DH-HEMT 的饱和电流为 1397 mA/mm, 大于 10 nm 沟道 DH-HEMT 的 1390 mA/mm, 6 nm 沟道 DH-HEMT 的 1337 mA/mm, 远大于传统单异质结 HEMT 的

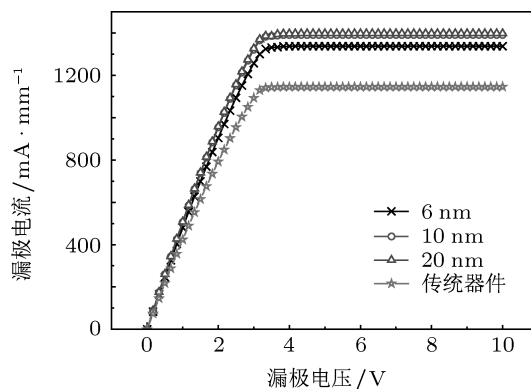


图 6 GaN DH-HEMT 输出特性曲线图

1145 mA/mm. 由于自加热效应在 10 V 以下对器件的直流性质影响可以忽略^[7], 而 GaN 中电场强度在 2.7 kV/cm 以上时热电子效应产生^[26,27], 在小于 75 kV/cm 时没有明显的谷间转移效应^[21], 所以热电子效应被抑制是器件饱和电流增大的主要原因. 而 GaN 沟道层厚度增加能够有效地抑制热电子效应, 抑制电流崩塌, 从而优化了器件的直流性质. 而 GaN 沟道层厚度增加抑制自加热效应, 消除了负微分电导效应, 优化了器件的线性性能.

4 结论

本文针对 AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN DH-HEMT

的热电子效应和自加热效应, 采用流体动力模型系统研究了 DH-HEMT 的直流性质, 并提出了一种优化 DH-HEMT 结构. 研究发现 GaN 沟道层厚度的增加能够增强量子阱对电子的束缚能力, 减小了热电子从沟道层向 GaN 缓冲层穿透的能力, 从而有效地抑制热电子效应和自加热效应. 计算器件的输出特性表明 GaN 沟道层厚度的增加提升了器件的饱和电流, 抑制了电流崩塌, 优化了器件的直流性质. 同时, GaN 沟道层厚度的增加抑制了自加热效应, 从而消除了负微分电导效应, 优化了器件的输出特性. 所以在工艺技术允许范围内, 适度提高 GaN 沟道层厚度可以有效抑制电流崩塌和负微分电导, 进而提高器件在高场作用下的性能.

-
- [1] Mishra U K, Parikh P, Wu Y F 2002 *Proc. IEEE* **90** 1022
- [2] Liberis J, Matulionienė I, Matulionis A, Šermukšnis E, Xie J, Leach J H, Morkoç H 2009 *Phys. Stat. Sol. A* **206** 1385
- [3] Liu J, Zhou Y, Zhu J, Lau K M, Chen K J 2006 *IEEE Electr. Dev. Lett.* **27** 10
- [4] Medjdoub F, Derluyn J, Cheng K, Leys M, Degroote S, Marcon D, Visalli D, van Hove M, Germain M, Borghs G 2010 *IEEE Electr. Dev. Lett.* **31** 111
- [5] Brown D F, Shinohara K, Williams A, Milosavljevic I, Grabar R, Hashimoto P, Willadsen P J, Schmitz A, Corrión A L, Kim S, Regan D, Butler C M, Burnham S D, Micovic M 2011 *IEEE T. Electron. Dev.* **58** 1063
- [6] Hu W D, Chen X S, Quan Z J, Xia C S, Lu W, Yuan H J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 243501
- [7] Hu W D, Chen X S, Quan Z J, Xia C S, Lu W, Ye P D 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 074501
- [8] Faqir M, Bouya M, Malbert N, Labat N, Carisetti D, Lambert B, Verzellesi G, Fantini F 2010 *Microelectron. Reliab.* **50** 1520
- [9] Hu W D, Chen X S, Yin F, Zhang J B, Lu W 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 084502
- [10] Binari S C, Ikossi K, Roussos J A, Kruppa W, Doewon P, Dietrich H B, Koleske D D, Wickenden A E, Henry R L 2001 *IEEE T. Electron. Dev.* **48** 465
- [11] Binari S C, Klein P B, Kazior T E 2002 *Proc. IEEE* **90** 1048
- [12] Vetry R, Zhang N Q, Keller S, Mishra U K 2001 *IEEE T. Electron. Dev.* **48** 560
- [13] Hu X, Koudymov A, Simin G, Yang J, Khan M A, Tarakji A, Shur M S, Gaska R 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2832
- [14] Kuzmik J, Javorka R, Alam A, Marso M, Heuken M, Kordos P 2002 *IEEE T. Electron. Dev.* **49** 1496
- [15] Wu X H, Brown L M, Kapolnek D, Keller S, Keller B, DenBaars S P, Speck J S 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 3228
- [16] Klein P B, Binari S C, Ikossi K, Wickenden A E, Koleske D D, Henry R L 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 3527
- [17] Tang J, Wang X L, Chen T S, Xiao H L, Ran J X, Zhang M L, Hu G X, Feng C, Hou Q, Wei M, Li J M, Wang Z G 2008 *9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology* Beijing, China, 20–23 Oct. 2008 p1114
- [18] Zhang S, Li M C, Feng Z H, Liu B, Yin J Y, Zhao L C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 212101
- [19] Faraclas E W, Anwar A F M 2006 *Solid State Electron.* **50** 1051
- [20] Wang L, Hu W D, Chen X S, Lu W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5730 (in Chinese) [王林, 胡伟达, 陈效双, 陆卫 2010 物理学报 **59** 5730]
- [21] Wang L, Hu W D, Chen X S, Lu W 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 054501
- [22] Liu J, Zhou Y, Zhu J, Cai Y, Lau K M, Chen K J 2007 *IEEE T. Electron. Dev.* **54** 2
- [23] Ambacher O, Smart J, Shealy J R, Weimann N G, Chu K, Murphy M, Schaff W J, Eastman L F, Dimitrov R, Wittmer L, Stutzmann M, Rieger W, Hilsenbeck J 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 3222
- [24] Braga N, Mickevicius R, Gaska R, Hu X, Shur M S, Khan M A, Simin G, Yang J 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 6409
- [25] Wang L, Hu W D, Chen X S, Lu W 2012 *J. Electron. Mater.* **41** 2130
- [26] Barry E A, Kim K W, Kochelap V A 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2317
- [27] Wang X D, Hu W D, Chen X S, Lu W 2012 *IEEE T. Electron. Dev.* **59** 1393

Investigation on the current collapse effect of AlGaN/GaN/InGaN/GaN double-heterojunction HEMTs*

Yu Chen-Hui^{1)†} Luo Xiang-Dong¹⁾ Zhou Wen-Zheng²⁾
Luo Qing-Zhou³⁾ Liu Pei-Sheng¹⁾

1) (*Jiangsu Key Laboratory of ASIC Design, Nantong University, Nantong 226019, China*)

2) (*College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China*)

3) (*School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

(Received 19 July 2012; revised manuscript received 5 August 2012)

Abstract

A series of AlGaN/GaN/InGaN/GaN double-heterojunction high-electron-mobility-transistors (DH-HEMT) is fabricated with GaN channel layer thicknesses from 6 nm to 20 nm by two-dimensional (2D) numerical simulations. A new idea for optimizing of DH-HEMT structure is proposed. The hot electron effect and self-heating effect are investigated by using hydrodynamic model. Current collapse and negative differential conductance are observed to be directly relevant to GaN channel layer thickness. DH-HEMT with thicker GaN channel layer can confine electrons better in channel, which significantly diminishes the penetration ability of hot electrons from channel layer to buffer layer under high voltage. Increasing the thickness of GaN channel layer appropriately can effectively restrict current collapse and negative differential conductance, and consequently improve device performance under high voltage condition.

Keywords: double-heterojunction high-electron-mobility-transistors, current collapse, hot electron effect, self-heating effect

PACS: 73.21.Fg, 73.40.Kp, 73.61.Ey

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11104150, 60906045) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK2010571).

† E-mail: ychyu@ntu.edu.cn