

AlN 插入层与 AlGaIn/GaN HEMT 电流崩塌效应的关系*

李诚瞻[†] 刘 键 刘新宇 薛丽君 陈晓娟 和致经

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 比较有无 AlN 插入层 AlGaIn/GaN HEMTs 在直流偏置应力条件下的电流崩塌程度, 研究 AlN 插入层对电流崩塌的影响. 从测试结果看, 无 AlN 插入层的 AlGaIn/GaN HEMTs 有更显著的电流崩塌程度, 表明 AlN 插入层对电流崩塌效应有显著的抑制作用. 模拟的 AlGaIn/GaN 能带结构表明, AlN 插入层能显著提高 AlGaIn 导带底能级, 增加异质结的带隙差. 带隙差的增加有利于减小电子隧穿几率, 加强沟道二维电子气的量子限制, 从而抑制电流崩塌效应.

关键词: AlN 插入层; HEMTs; 电流崩塌效应; 热电子

EEACC: 2570

中图分类号: TN325⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)06-1055-04

1 引言

GaN 作为新一代宽禁带半导体材料, 具有禁带宽度大(3.4 eV)、击穿电压高(3.3 MV/cm)、二维电子气浓度高($>10^{13} \text{ cm}^{-2}$)及饱和电子速度大($2.8 \times 10^7 \text{ cm/s}$)等特性, AlGaIn/GaN HEMTs 显示出高频、高压、大功率特性. 目前, AlGaIn/GaN HEMT 作为高频大功率器件受到广泛关注, GaN 基器件的最大输出电流可以达到 $2.1 \text{ A/mm}^{[1]}$, 最高器件跨导达到 525 mS/mm , 击穿电压在 600 V 以上^[2]. SiC 衬底上, 4 GHz 微波功率最高可达到 $136 \text{ W}^{[3]}$.

虽然 AlGaIn/GaN HEMT 在高频、大功率方面取得了可喜的成就, 但是电流崩塌效应仍然是 AlGaIn/GaN HEMT 面临的主要问题. 除了脉冲应力引起电流崩塌效应^[4], 直流偏置应力引起的电流崩塌现象也值得关注. 大量文献报道, 对器件施加一定时间的直流偏置应力, 器件直流特性明显退化, 出现电流崩塌现象^[5,6]. 这种电流崩塌只有在施加很大的源漏电压的情况下才能发生. 大源漏电压下, 栅漏之间产生强电场, 沟道热电子受激发隧穿到 AlGaIn 表面, 被栅漏之间的表面态俘获, 使栅耗尽区横向扩展, 形成虚栅, 从而减小沟道 2DEG 浓度, 导致器件漏电流退化, 出现电流崩塌^[5,7].

针对直流应力引起的电流崩塌, 很多研究者通过改善材料结构的方法抑制电流崩塌. Simin 等

人^[8]研究 AlGaIn/InGaIn/GaN HFET, 发现这种双异质结构能显著减小沟道电子溢出, 并减小界面陷阱, 消除了器件电流崩塌效应; Fan 等人^[9]研究了 δ 掺杂的 AlGaIn/GaN HFET, 这种平面掺杂结构使能带异质结界面产生很大的突变, 构成窄而深的量子阱, 从而减弱电流崩塌; Weimann 等人^[10]生长高 Al 组分的 AlGaIn/GaN 异质结, 形成大能带带阶, 强化沟道二维电子气的量子限制, 抑制电流崩塌.

Shen 等人率先提出 AlGaIn/AlN/GaN 结构, 并通过 DC 和 RF 性能证明其优越性^[11]. Lee 等人利用脉冲 $I-V$ 测试研究电流崩塌效应, 说明 AlN 插入层能有效地改善脉冲应力引起的电流崩塌效应^[12]. 本文研究 AlN 插入层对直流偏置应力引起的电流崩塌的影响, 通过对两种不同材料结构 AlGaIn/GaN HEMTs 施加直流偏置应力, 并比较其输出电流退化程度, 说明 AlN 插入层能显著改善 AlGaIn/GaN HEMTs 的电流崩塌效应, 并利用能带结构进一步阐述 AlN 插入层抑制电流崩塌的机理.

2 器件结构与工艺

本文采用 AlGaIn/GaN(A 类结构)和 AlGaIn/AlN/GaN(B 类结构)两种不同结构的材料, 如图 1 所示. 材料由中国科学院半导体研究所采用金属有机物化学气相淀积技术(MOCVD)制备, 衬底为 50 mm (0001)蓝宝石. 两种结构的材料生长条件和

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2002CB311903)和中国科学院重点创新(批准号:KGCX2-SW-107)资助项目

[†] 通信作者. Email: lichzhan@sohu.com

2005-09-26 收到, 2005-11-25 定稿

生长方式完全相同. AlGaIn/GaN 结构自下而上分别为 $3\mu\text{m}$ GaN 缓冲层, 110nm 的高迁移率 GaN 层, 5nm 非掺杂 AlGaIn 层, 10nm 掺 Si 的 n 型 AlGaIn 层, 5nm 非掺杂 AlGaIn 层, 其中 Al 组分为 20%. 与 AlGaIn/GaN 结构相比, AlGaIn/AlN/GaN 结构只在 GaN 与非掺杂 AlGaIn 层之间多生长了 1nm AlN 插入层, 其他材料参数完全相同. 室温下霍尔测试得出, AlGaIn/GaN 和 AlGaIn/AlN/GaN 的二维电子气浓度分别为 1.3×10^{13} 和 $1.6 \times 10^{13} / \text{cm}^2$, 电子迁移率分别为 1120 和 $1250 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$.

i-AlGaIn 5nm	i-AlGaIn 5nm
n-AlGaIn 10nm	n-AlGaIn 10nm
i-AlGaIn 5nm	AlN 1nm
GaN $3\mu\text{m}$	GaN $3\mu\text{m}$
Sapphire	Sapphire

(a)

(b)

图 1 AlGaIn/GaN HEMTs 的两种材料结构 (a) AlGaIn/GaN 结构; (b) AlGaIn/AlN/GaN 结构

Fig. 1 Structure of conventional and modified AlGaIn/GaN HEMTs (a) AlGaIn/GaN structure; (b) AlGaIn/AlN/GaN structure

两种结构的材料采用相同的器件制备工艺^[13], 其流程如下: 使用 ICP 干法刻蚀实现器件隔离, 测试结果显示岛间电流只有 10^{-9} A 量级; 欧姆接触采用 Ti/Al/Ti/Au, 在 850°C 30s 条件下 N_2 氛围中进行快速热退火 (RTA), 实现约 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的低接触电阻率; 栅金属采用 Ni/Au, 栅长 $0.8\mu\text{m}$, 栅宽 $120\mu\text{m}$; 布线金属采用 Ti/Au, 加厚源漏金属, 并引出栅、源、漏的测试点.

3 结果与讨论

实验利用 HP4155 对器件施加直流偏置应力并进行直流特性测试. 为了避免光照的影响, 器件测试和施加直流应力过程都在暗场中进行. 施加直流应力前器件的 I - V 特性如图 2 所示, 没有出现明显的电流崩塌现象.

施加直流偏置应力过程中, 固定源漏电压 $V_{ds} = 25\text{V}$, 栅源电压 $V_{gs} = -10\text{V}$, 应力时间 120s. 足够低的栅电压, 使 2DEG 沟道处于夹断状态, 避免自热效应的影响; 同时施加足够大的源漏电压, 栅漏间出现强电场, 使沟道电子获得足够大的能量, 与晶格系统不处于热平衡状态, 成为热电子.

为了更清楚地比较器件直流特性退化程度, 并排除扫描过程中栅电压对直流特性的影响, 只选取 $V_{gs} = 0$ 的单一曲线进行测试. 施加应力前后器件 I -

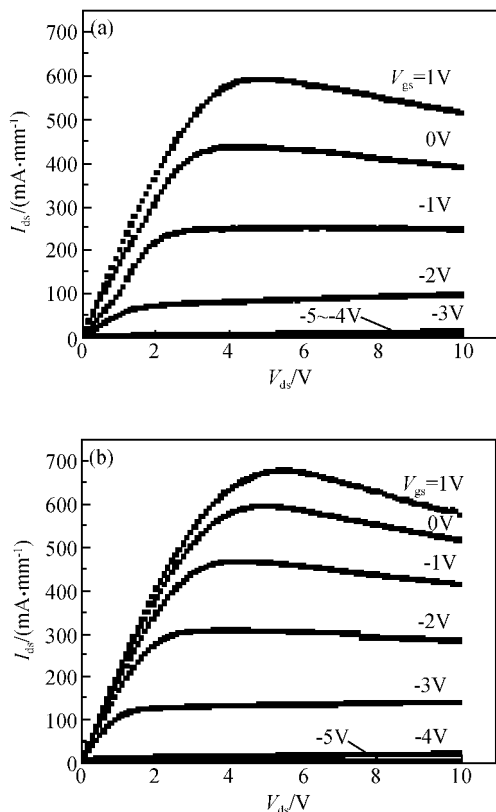


图 2 应力前的 AlGaIn/GaN HEMTs 直流特性 (a) AlGaIn/GaN HEMTs; (b) AlGaIn/AlN/GaN HEMTs

Fig. 2 Output characteristics of unstressed AlGaIn/GaN HEMTs (a) AlGaIn/GaN HEMTs structure; (b) AlGaIn/AlN/GaN HEMTs structure

V 特性如图 3 所示, 无 AlN 插入层的 AlGaIn/GaN HEMTs 的器件饱和漏电流从 514 退化到 434mA/mm , 退化程度达到 15.6%; 含有 AlN 插入层的 AlGaIn/GaN HEMTs 的器件饱和漏电流从 543 退化到 533mA/mm , 退化程度只有 1.84%. 实验表明, AlN 插入层对 AlGaIn/GaN HEMTs 的电流崩塌程度有显著改善. 加入 AlN 插入层后, 器件膝点电压的退化程度也得到明显改善. AlGaIn/GaN HEMTs 的膝点电压从 2.6V 增大到 3.0V , 而 AlGaIn/AlN/GaN HEMTs 的膝点电压从 2.7V 仅仅增大到 2.8V .

图 4 示出 $V_g = 0$ 时, 源漏峰值电流随直流偏置应力时间的变化曲线. 当直流应力时间 $t = 120, 240, 360\text{s}$ 时, AlGaIn/GaN HEMTs 的电流崩塌程度分别达到 15.6%, 19.1% 和 20.7%, AlGaIn/AlN/GaN HEMTs 电流崩塌程度只有 1.84%, 2.38% 和 2.39%. 延长直流偏置应力时间, 严重加剧无 AlN 插入层的 AlGaIn/GaN HEMTs 电流崩塌程度, 而 AlGaIn/AlN/GaN HEMTs 电流崩塌程度只有很小的变化. 实验结果表明, AlN 插入层能显著地抑制 AlGaIn/GaN HEMTs 的电流崩塌效应.

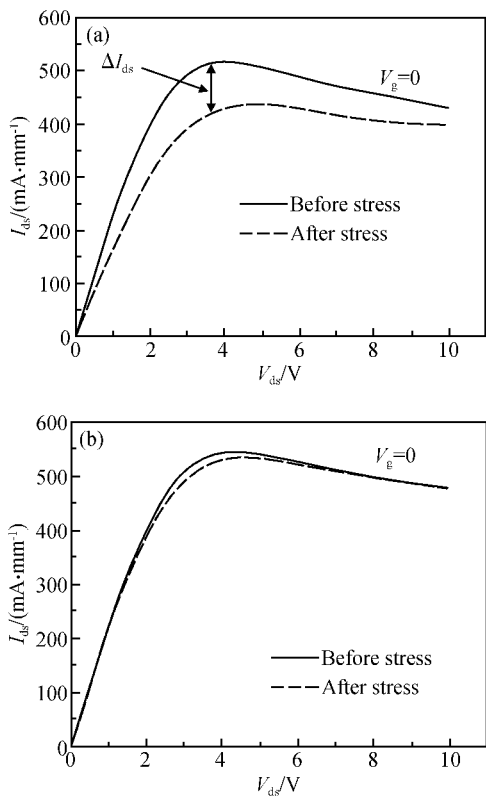


图 3 AlGaIn/GaN HEMTs 应力前后的 I - V 特性比较 (a) AlGaIn/GaN HEMTs; (b) AlGaIn/AlN/GaN HEMTs
Fig.3 Comparison of DC characteristics before and after stress of AlGaIn/GaN HEMTs (a) AlGaIn/GaN HEMTs structure; (b) AlGaIn/AlN/GaN HEMTs structure

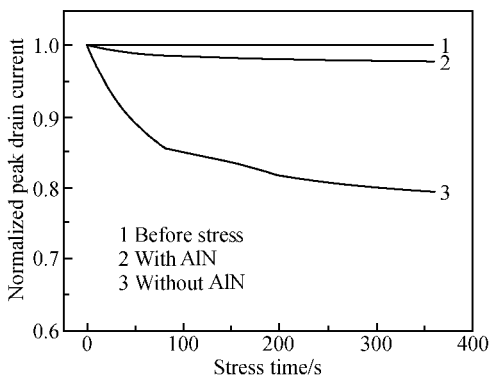


图 4 源漏峰值电流随直流偏置应力时间变化的曲线
Fig.4 Peak drain current versus DC bias stress time

为了进一步了解 AlN 插入层对 AlGaIn/GaN HEMTs 的影响,通过自洽求解薛定谔方程和泊松方程,并利用 Matlab 模拟 AlGaIn/GaN 和 AlGaIn/AlN/GaN 材料的能带结构.根据两种材料的实际差别,假设 AlGaIn/AlN/GaN 材料结构只比 AlGaIn/GaN 材料结构多 1nm AlN 插入层,其他材料参数完全相同.图 5 给出了两种材料结构的异质结能带模拟结果.与 AlGaIn/GaN 结构相比,AlGaIn/

AlN/GaN 结构的 AlGaIn 导带能级明显上移;异质结的带隙差 ΔE_c 有显著增加,从 0.53eV 增加到 1.48eV;费米能级 E_F 与 AlGaIn 导带底能级差增大 0.87eV,量子阱深度增加.

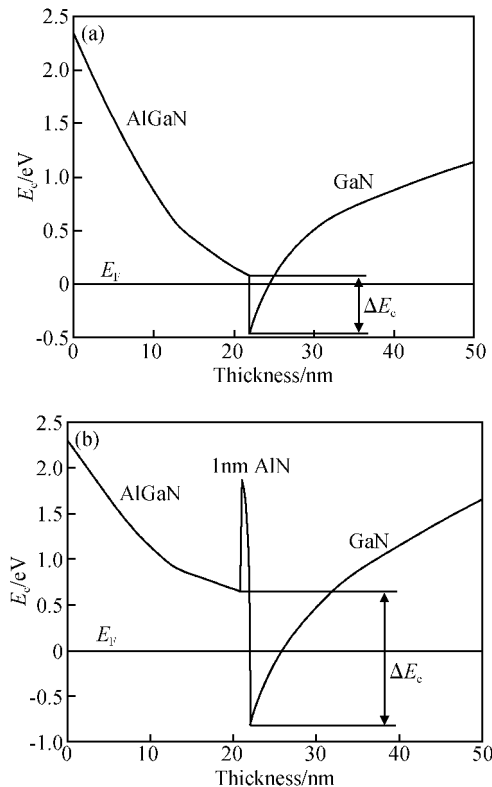


图 5 两种不同材料结构的能带图 (a) AlGaIn/GaN 结构; (b) AlGaIn/AlN/GaN 结构
Fig.5 Energy band diagram of AlGaIn/GaN HEMTs with and without AlN interfacial layer (a) AlGaIn/GaN HEMTs structure; (b) AlGaIn/AlN/GaN HEMTs structure

足够大的源漏电压,使沟道热电子遂穿到 Al-GaN 表面,被栅漏区之间的表面态俘获,形成虚栅,从而使栅耗尽区横向扩展,减小沟道 2DEG 浓度,出现电流崩塌现象^[5,7].因此,直流偏置应力条件下,遂穿到表面的沟道热电子是引起电流崩塌的主要原因. AlN 插入层明显改变 AlGaIn/GaN 的能带结构,提高 AlGaIn 导带底能级,增加异质结带隙差 ΔE_c ,导致沟道电子遂穿到 AlGaIn 表面的势垒高度增大.一定能量电子的遂穿几率随势垒高度增加而减小,即 $T \propto V_0^{-1}$.因此势垒高度增加有利于减小热电子遂穿到表面的几率,加强沟道 2DEG 限制,从而抑制电流崩塌效应,改善器件性能.

4 结论

本文对有无 AlN 插入层的 AlGaIn/GaN HEMTs 施加直流偏置应力,并观察其电流崩塌现

象. 在 $V_{gs} = -10V$, $V_{ds} = 25V$ 的直流偏置条件下, 应力时间 $t = 120s$ 时, AlGaIn/GaN HEMTs 的电流退化程度达到 15.6%, 而 AlGaIn/AlN/GaN HEMTs 电流退化程度只有 1.84%, 随着延长施加应力时间, 无 AlN 插入层的 AlGaIn/GaN HEMTs 电流崩塌程度更加剧烈, 而含有 AlN 插入层的 AlGaIn/GaN HEMTs 电流崩塌程度变化并不明显. 结果表明, AlN 插入层能显著地抑制 AlGaIn/GaN HEMTs 的电流崩塌效应. 通过自洽解薛定谔方程和泊松方程, 利用 Matlab 模拟, 有无 AlN 插入层 AlGaIn/GaN 的能带结构, 结果表明 AlN 插入层显著增加异质结的带隙差 ΔE_c . 而增加异质结带隙差 ΔE_c 有利于减小沟道热电子隧穿 AlGaIn 势垒层的几率, 从而加强了沟道 2DEG 的量子限制, 有效地抑制电流崩塌效应.

参考文献

[1] Chini A, Coffie R, Meneghesso G, et al. 2.1A/mm current density AlGaIn/GaN HEMT. *Electron Lett*, 2003, 39(7):625

[2] Saito W, Takada Y, Kuraguchi M, et al. High breakdown voltage AlGaIn-GaN power-HEMT design and high current density switching behavior. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(12):2528

[3] Kikkawa T, Maniwa T, Hayashi H. An over 200-W output power GaN HEMT push-pull amplifier with high reliability. *IEEE MTT-S Digest*, 2004:1347

[4] Meneghesso G, Verzellesi G, Pierobon R, et al. Surface-relat-

ed drain current dispersion effects in AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2004, 51(10):1554

[5] Hyungtak K, Thompson R M, Tilak V, et al. Effects of SiN passivation and high-electric field on AlGaIn-GaN HFET degradation. *IEEE Electron Device Lett*, 2003, 24(7):421

[6] Mittereder J A, Binari S C, Klein P B, et al. Current collapse induced in AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors by bias stress. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(8):1650

[7] Hyungtak K, Vinayak T, Bruce, et al. Degradation characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *Annual International Reliability Physics Symposium*, 2001:214

[8] Simin G, Koudymov A, Fatima H, et al. SiO₂/AlGaIn/InGaIn/GaN MOSDHFTs. *IEEE Electron Device Lett*, 2002, 23(8):458

[9] Fan Z Y, Li J, Lin J Y, et al. Delta-doped AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with high breakdown voltages. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(24):4649

[10] Weimann N G, Manfra M J, Wachtler T, et al. Unpassivated AlGaIn-GaN HEMTs with minimal RF dispersion grown by plasma-assisted MBE on semi-insulating 6H-SiC substrates. *IEEE Electron Device Lett*, 2003, 24(2):57

[11] Shen L, Heikman S, Moran B, et al. AlGaIn/AlN/GaN high-power microwave HEMT. *IEEE Electron Device Lett*, 2001, 22(10):457

[12] Lee I S, Kim J W, Lee J H, et al. Reduction of current collapse in AlGaIn/GaN HFETs using AlN interfacial layer. *Electron Lett*, 2003, 39(10):750

[13] Xiao Dongping, Liu Jian, Wei Ke, et al. High transconductance AlGaIn/GaN HEMT growth on sapphire substrate. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(9):907

Correlations Between an AlN Insert Layer and Current Collapse in AlGaIn/GaN HEMTs*

Li Chengzhan[†], Liu Jian, Liu Xinyu, Xue Lijun, Chen Xiaojuan, and He Zhijing

(*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: Based on a comparison of the degree of drain current collapse in AlGaIn/GaN HEMTs with and without an AlN insert layer under short-term DC bias stress, the effects of an AlN insert layer on current collapse induced by DC bias stress are investigated. Under some DC bias stress, the degree of drain current collapse of AlGaIn/GaN HEMTs with an AlN insert layer is less prominent than that with no AlN insert layer, indicating that an AlN insert layer can inhibit current collapse effectively. The energy band structures of AlGaIn/GaN HEMTs with and without AlN insert layers make clear that an AlN insert layer raises the conductance band and increases the effective heterostructure band discontinuity ΔE_c prominently, which is beneficial for strengthening the quantum limitation of 2DEG and decreasing the probability of hot electron tunneling through the AlGaIn barrier layer to the surface. Therefore, an AlN insert layer appears to inhibit current collapse.

Key words: AlN insert layer; HEMTs; current collapse effect; hot electron

EEACC: 2560S

Article ID: 0253-4177(2006)06-1055-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(No. 2002CB311903) and the Key Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences(No. KGCX2-SW-107)

[†] Corresponding author. Email: lichzhan@sohu.com

Received 26 September 2005, revised manuscript received 25 November 2005

©2006 Chinese Institute of Electronics