

AlGa_xN/GaN HEMT 高场应力退化及紫外光辐照的研究*

王 冲[†] 张进城 郝 跃 杨 燕

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

摘要: 采用不同的应力偏压发现器件特性的下降程度随应力偏置电压的增大而增大. 经过 3×10^4 s 40V 高场应力后, 蓝宝石衬底 AlGa_xN/GaN HEMT 饱和漏电流下降 5.2%, 跨导下降 7.6%. 从器件直流参数的下降分析了应力后的特性退化现象并与连续直流扫描电流崩塌现象进行了对比, 同时观察了紫外光照对应力后器件特性退化的恢复作用. 直流扫描电流崩塌现象在紫外光照下迅速消除, 但是紫外光照不能恢复高场应力造成的特性退化.

关键词: AlGa_xN/GaN; 高电子迁移率晶体管; 热电子; 电子陷阱

EEACC: 2520D; 2530C; 2560S

中图分类号: TN325+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2006)08-1436-05

1 引言

基于 AlGa_xN/GaN 异质结的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 在高温器件及大功率微波器件方面有非常好的应用前景^[1]. 与 GaAs 器件相比, 由于 GaN 材料的高击穿电压和较高的热导率, GaN 器件功率密度有大幅度提高^[2]. 而且 AlGa_xN/GaN 结构可以在 SiC 衬底上生长, 从而可利用 SiC 衬底的高热导率特性, 这使得 AlGa_xN/GaN HEMT 能工作在较高的频率下并保持很高的功率输出^[3]. 由于 AlGa_xN/GaN HEMT 多应用在微波大功率领域, 器件经常工作在很高的源漏偏置电压下, 高场下产生的热电子^[4]会使 HEMT 特性退化, 因而在高场下器件工作的可靠性问题需要引起注意. 国内对 AlGa_xN/GaN HEMT 的研究多集中于单步工艺和器件研制方面, 对可靠性的研究还未见报道. 本文对我们研制的 AlGa_xN/GaN 二维电子气 (2DEG) 材料制作的 HEMT 在高场应力后的特性退化现象及退化机理进行了分析, 并进一步观察了应力后器件在紫外光照下的特性恢复情况.

2 实验

图 1 给出了利用 MOCVD 方法在 (0001) 面蓝宝石衬底上进行 AlGa_xN/GaN 2DEG 材料的异质

外延生长结构. Hall 测量得到室温下材料的电子迁移率为 $1046 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$, 2DEG 面密度为 $1.3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$. Al_xGa_{1-x}N 层的 x 为 27%. AlGa_xN/GaN HEMT 栅长 $1 \mu\text{m}$, 栅宽 $20 \mu\text{m}$, 源漏间距 $4 \mu\text{m}$, 采用对称栅结构. 采用 ICP 刻蚀形成器件有源区, 源漏欧姆接触采用 Ti/Al/Ti/Au (30nm/120nm/40nm/60nm) 电子束蒸发, 在 830N_2 气氛中快速热退火 30s, 栅金属采用电子束蒸发 Ni/Au (30nm/200nm). 器件表面未作钝化处理.

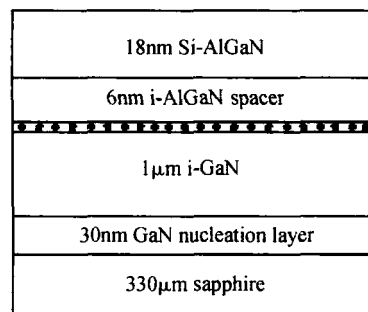


图 1 AlGa_xN/GaN HEMT 结构截面图
Fig. 1 Cross section of AlGa_xN/GaN HEMT

利用 HP4156B 精密半导体参数分析仪对器件进行了直流特性和直流应力测试, 该器件击穿电压大于 50V. 为了使高场退化现象出现, 同时又要不完全损坏器件, 应力试验条件从源漏偏置电压 10V 最高加到 40V, 重点对 40V 偏置电压下器件特性的退

* 国防 973 计划 (批准号: 513270407), 国防科技预研 (批准号: 41308060106), 国防科技重点实验室基金 (批准号: 51433040105DZ0102), 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2002CB3119) 和西安电子科技大学青年科研工作站 (批准号: 03002 #) 资助项目

[†] 通信作者. Email: wangchong198710@hotmail.com

2005-11-13 收到, 2006-03-07 定稿

化情况进行了研究. 在每个应力偏置条件下均采用至少 10 个 HEMT 进行实验, 除去个别应力中损坏的器件, 选取典型的退化规律作为依据. 对紫外光辐照实验采用波长为 253. 7nm 的光源, 器件位置的光强约为 16mW/cm².

3 结果与讨论

经过 3 × 10⁴ s 高场应力后器件特性发生明显退化. 图 2 显示了器件在不同源漏偏置电压应力过程中以采样模式监测出的源漏电流随时间退化的规律, 应力后器件饱和电流的下降程度随着源漏偏压的增大而增大. 图 3 是器件转移特性在 3 × 10⁴ s 40V 偏压应力前后的对比曲线, 应力后器件夹断电压几乎不变, 但饱和电流在栅压为 1V 时下降了 5. 2 %, 跨导下降了 7. 6 %, 跨导最大值处的栅压从应力前的 - 0. 3V 移动到 - 0. 6V. 测量转移特性和跨导时源漏加 5V 偏压.

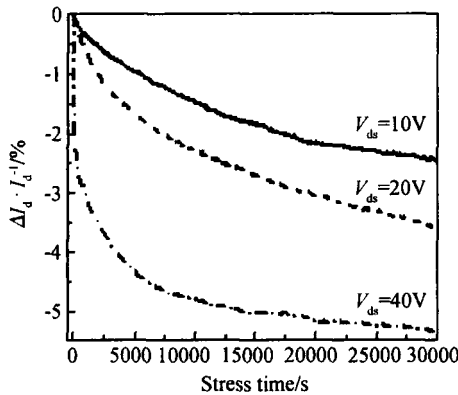


图 2 不同偏置下源漏电流随时间退化规律
Fig. 2 I_D degradation versus time at different bias

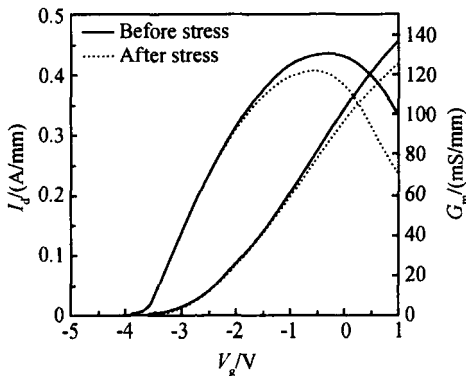


图 3 转移特性在应力前后的变化
Fig. 3 Transfer characteristics before and after stress

当 AlGaIn/ GaN HEMT 导电沟道开启并在栅漏之间存在高的电场时, 器件处于热电子应力下. 电

子在沟道中漂移并在高电场的作用下被加速, 这时声学波散射不能够把电子在高场下漂移碰撞中得到的能量释放掉, 电子的平均动能 E_k 增加了. 当平均动能 E_k 超过晶格的热能量, 这时电子被称为热电子. 当 2DEG 沟道中的一些热电子的能量大于 AlGaIn/ GaN 异质结导带不连续性 E_c 时, 这些电子就会从沟道中跃迁出来被陷阱俘获同时造成界面损伤, 从而对 HEMT 沟道中的 2DEG 产生影响, 使器件特性发生退化^[5]. 在 Si 及 GaAs 器件中也存在热电子造成的特性退化, 但由于 AlGaIn/ GaN HEMT 工作时的偏置电压更高, 沟道中的电场更强, 所以更容易发生热电子造成的特性退化.

器件特性的退化程度随源漏偏置电压的增大而增大, 应力过程中在 1 × 10⁴ s 内下降的速度较快, 而后下降速度趋于缓慢. 表 1 是不同源漏偏压和应力时间下器件特性的退化情况.

表 1 不同源漏偏压和应力时间下器件特性的退化程度
Table 1 Degradation of performance at different bias and stress

应力条件	V _{ds} = 10V		V _{ds} = 20V		V _{ds} = 40V	
	I _d	G _m	I _d	G _m	I _d	G _m
1 × 10 ⁴ s	1. 4 %	2. 3 %	2. 2 %	4. 2 %	4. 7 %	6. 3 %
3 × 10 ⁴ s	2. 1 %	2. 9 %	3. 4 %	5. 7 %	5. 2 %	7. 6 %

AlGaIn/ GaN HEMT 在不加栅偏压下 I_d 与 V_d 关系曲线连续两次直流扫描, 会发生直流扫描电流崩塌. 如图 4 所示, 实线表示第一次扫描曲线, 虚线表示连续的重叠扫描曲线, 重叠扫描曲线在线性区有明显的电流下降, 而后源漏电压增大到 8V 后饱和区电流与第一次扫描曲线重合. 而器件在高场应力前后的输出特性对比如图 5 所示, 器件在线性区和饱和区电流均有明显的下降, 饱和区电流始终不重合. 应力后器件特性在稳定较长时间后测量.

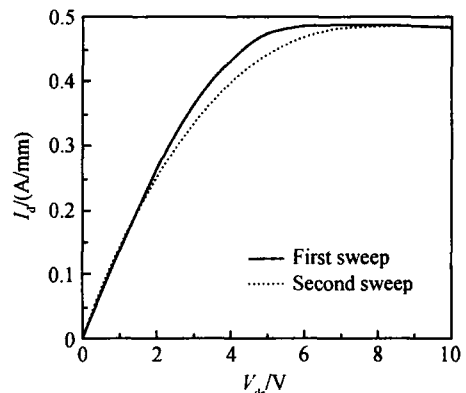


图 4 连续直流扫描电流崩塌
Fig. 4 Current degradation between continuous DC sweeping

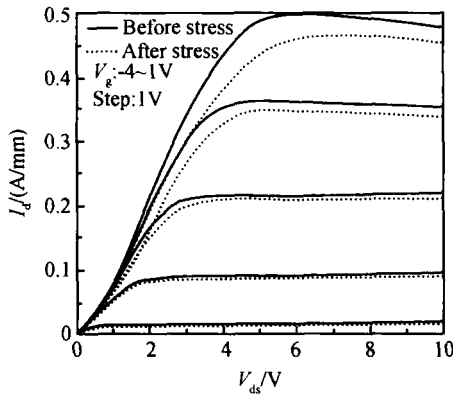


图 5 输出特性在应力前后的变化

Fig. 5 Output characteristics before and after stress

热电子在 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N HEMT 栅下偏漏一侧电场最强处最容易发生跃迁, 由于表面态和深能级杂质中的电子陷阱^[6]的存在, 跃迁出沟道的热电子会被陷阱俘获从而聚集在栅偏漏一侧的表面附近. 大量电子聚集在表面后会对沟道中的 2DEG 产生耗尽作用^[7], 这时漏串联电阻 R_d 显著增加. 连续直流扫描电流崩塌现象就是由于第一次扫描使电子陷阱中积累了热电子而造成饱和电流在线性区下降, 饱和电压由 5V 增大到 8V, 当进入深饱和区后电子陷阱中热电子形成的沟道耗尽区与器件饱和和夹断区重合, 陷阱电子的耗尽作用被屏蔽, 饱和电流会完全恢复. 由于陷阱中积累的热电子会随时间增加而逐渐释放, 一段时间后在进行扫描时饱和电流完全重合, 若在紫外光照条件下直流扫描电流崩塌会迅速消除. 表面态和 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N 中存在的电子陷阱是由于材料本身的晶格缺陷及表面悬挂键和材料生长中的杂质造成的, 通过钝化器件表面能降低表面态密度从而改变直流扫描电流崩塌程度^[8]. 本实验所采用的器件未表面钝化, 所以该器件在应力中的退化现象要比经过钝化的器件更明显.

图 6 是器件高场应力 2DEG 示意图. 高场应力中, 热电子进入表面和 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N 中的陷阱后, 引起电场的变化造成 2DEG 的耗尽, 同时热电子在通过 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N/GaN 异质界面时会造成界面损伤. 高场应力后电子陷阱中的热电子会逐渐释放, 这使应力后器件特性在一定时间内有部分恢复; 但热电子在异质界面处造成的界面损伤会引起异质结材料的迁移率下降, 这可能是引起高场应力后饱和漏电流在线性区和饱和区的下降不能完全恢复的主要原因.

本文辐照实验选用的紫外光光子具有较高的能量, 大于 GaN 和 Al_{0.27}Ga_{0.73}N 的禁带宽度, 理论上可以完全释放该 HEMT 结构中的陷阱电子. 图 7 是未加应力器件在紫外光辐照下的输出特性与未加

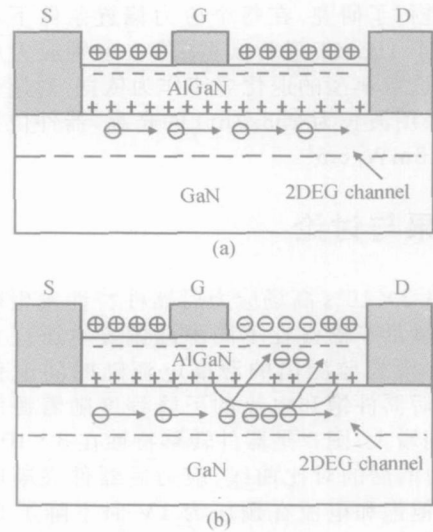


图 6 器件中的 2DEG 示意图 (a) 应力前; (b) 应力中

Fig. 6 Schematic of 2DEG in devices (a) Before stress; (b) After stress

紫外光照的输出特性对比情况, 这表明 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N/GaN HEMT 对紫外光有明显的光响应. 可以看出在紫外光辐照下器件饱和电流明显增大, 饱和电压也略有减小. 由于紫外光光子能激发材料产生电子-空穴对, 这会暂时造成器件饱和电流的提高, 当除去紫外光辐照, 电流会在较短时间内逐渐恢复原状. 图 8 是高场应力前后器件转移特性曲线与辐照后 5s 的特性对比情况. 特性退化的器件在紫外光辐照去除后 5s 就同辐照前非常接近, 较长时间后基本与辐照前退化的特性曲线重合, 说明紫外光辐照对在高压下长期应力后的器件特性的退化没有恢复作用.

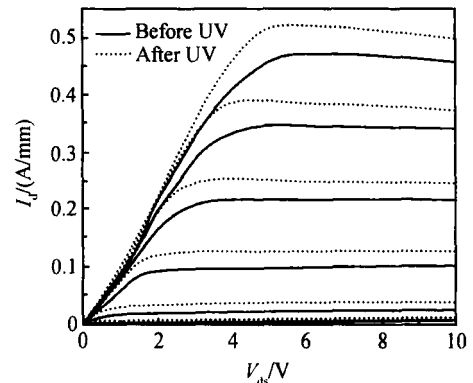


图 7 输出特性在紫外光照前后的变化

Fig. 7 I_d - V_{ds} characteristics before and after UV

通过对直流扫描电流崩塌现象和高场应力引起的电流退化比较可以得出如下两个结论: (1) AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N/GaN HEMT 直流扫描电流崩塌主要发生在线性区和弱饱和区, 而高场应力引起的电流退化在线性

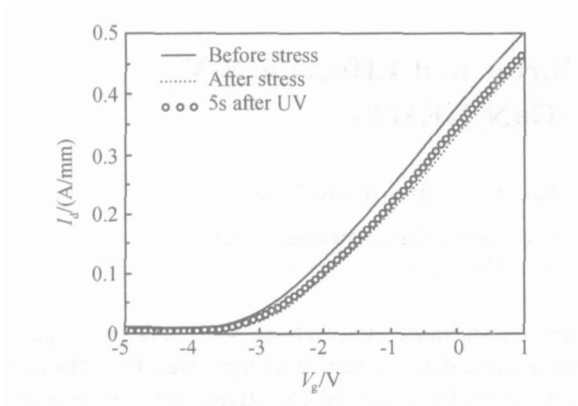


图 8 应力后转移特性在紫外光照前后的变化

Fig. 8 Transfer characteristics before and after UV

区、弱饱和区和深饱和区都存在；(2) 直流扫描电流崩塌在一定时间后电流随着时间逐渐恢复，在一定时间后电流崩塌基本消除，若在电流崩塌恢复的过程中进行紫外光辐照，电流崩塌会迅速消除^[9]。而高场应力后器件特性的退化能随时间部分恢复却不能完全恢复，紫外光辐照后退化的器件特性也没有改善。

4 结论

本文给出了经过高场应力后，AlGaN/ GaN HEMT 器件饱和电流跨导在不同源漏应力偏压和时间段的下降情况。在 3×10^4 s 40V 偏压应力后饱和电流在栅压为 1V 时下降了 5.2%，跨导下降了 7.6%。比较分析得出：直流扫描电流崩塌仅在线性区和弱饱和区存在，这是由于热电子被异质结表面态和 AlGaN 层中的电子陷阱俘获使 R_d 增加而引起的；而高场应力后的电流下降在线性区和整个饱

和区都存在。高场应力中热电子在界面处造成的损伤使沟道迁移率下降可能是造成不可恢复的器件特性退化的主要原因。

参考文献

- [1] Trew R J, Shin M W, Gatto V. High power application for GaN-based device. *Solid-State Electron*, 1997, 41(10):1561
- [2] Wang Xiaoliang, Liu Xinyun, Hu Guoxin, et al. X-band GaN power HEMTs with power density of 2.23W/mm. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(10):1866 (in Chinese) [王晓亮, 刘新宇, 胡国新, 等. 输出功率密度为 2.23W/mm 的 X 波段 AlGaN/ GaN 功率 HEMT 器件. *半导体学报*, 2005, 26(10):1866]
- [3] Kumar V, Lu W, Schwandt R, et al. AlGaN/ GaN HEMTs on SiC with f_T over 120 GHz. *IEEE Electron Device Lett*, 2002, 23(8):455
- [4] Sahoo D K, Lal R K, Kim H, et al. High-field effects in silicon nitride passivated GaN MODFETs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(5):1163
- [5] Xue Fangshi. Hot electron tunneling mechanism of current collapse in GaN HFET. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(11):2143 (in Chinese) [薛舫时. GaN HFET 沟道热电子隧穿电流崩塌模型. *半导体学报*, 2005, 26(11):2143]
- [6] Koley G, Kim H, Eastman L F, et al. Electrical bias stress related degradation of AlGaN/ GaN HEMTs. *Electron Lett*, 2003, 39(16):1217
- [7] Mzutani T, Ohno Y, Akita M, et al. A study on current collapse in AlGaN/ GaN HEMTs induced by bias stress. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(10):2015
- [8] Kim H, Thompson R M, Tilak V, et al. Effects of SiN passivation and high-electric field on AlGaN/ GaN HFET degradation. *IEEE Electron Device Lett*, 2003, 24(7):421
- [9] Koley G, Tilak V, Eastman L F, et al. Slow transients observed in AlGaN/ GaN HFETs: effects of SiN passivation and UV illumination. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(4):886

Degradation Under High-Field Stress and Effects of UV Irradiation on AlGaN/GaN HEMTs^{*}

Wang Chong[†], Zhang Jincheng, Hao Yue, and Yang Yan

(*Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band-gap Semiconductor Materials and Devices, Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Abstract: After 3×10^4 s of high-field stress, the drain current and transconductance of AlGaN/GaN HEMTs grown on sapphire are decreased by 5.2% and 7.6%, respectively. The degradation is more obvious than under high stress bias. The reason for this is investigated and compared to the current collapse that occurs under DC sweeping. The effects of UV irradiation on the recovery of the devices are observed. UV illumination can eliminate the DC sweeping current collapse, but it cannot reverse the degradation characteristics caused by the high-field stress.

Key words: AlGaN/GaN; HEMT; hot electron; electron trap

EEACC: 2520D; 2530C; 2560S

Article ID: 0253-4177(2006)08-1436-05

^{*} Project supported by the National Defense 973 Plan of China (No. 513270407), the National Defense Scientific and Technical Pre-Research Program of China (No. 41308060106), the Key Laboratory Fund of the National Defense Scientific and Technical of China (No. 51433040105D Z0102), the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2002CB3119), and the Youth Scientific Research Workstation in Xidian University (No. 03002 #)

[†] Corresponding author. Email: wangchong197810@hotmail.com

Received 13 November 2005, revised manuscript received 7 March 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics