

AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管漏电流退化机理研究*

任舰 闫大为[†] 顾晓峰

(轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江南大学电子工程系, 无锡 214122)

(2013年3月3日收到; 2013年3月31日收到修改稿)

本文首先制备了与 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 结构与特性等效的 AlGaIn/GaN 异质结肖特基二极管, 采用步进应力测试比较了不同栅压下器件漏电流的变化情况, 然后基于电流-电压和电容-电压测试验证了退化前后漏电流的传输机理, 并使用失效分析技术光发射显微镜 (EMMI) 观测器件表面的光发射, 研究了漏电流的时间依赖退化机理. 实验结果表明: 在栅压高于某临界值后, 器件漏电流随时间开始增加, 同时伴有较大的噪声. 将极化电场引入电流与电场的依赖关系后, 器件退化前后的 $\log(I_{FP}/E)$ 与 \sqrt{E} 都遵循良好的线性关系, 表明漏电流均由电子 Frenkel-Poole (FP) 发射主导. 退化后 $\log(I_{FP}/E)$ 与 \sqrt{E} 曲线斜率的减小, 以及利用 EMMI 在栅边缘直接观察到了与缺陷存在对应关系的“热点”, 证明了漏电流退化的机理是: 高电场在 AlGaIn 层中诱发了新的缺陷, 而缺陷密度的增加导致了 FP 发射电流 I_{FP} 的增加.

关键词: AlGaIn/GaN, 高电子迁移率晶体管, 漏电流, 退化机理

PACS: 72.80.ey, 73.40.kp, 73.40.-c

DOI: 10.7498/aps.62.157202

1 引言

近年来, GaN 基半导体因其宽禁带 (3.4 eV)、高击穿电场 (约 3 MV/cm)、高电子饱和速度 (约 2×10^7 cm/s) 和高热稳定性等优越的物理特性而备受关注^[1-3]. 例如, GaN 和 AlGaIn 形成的理想异质结使 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 器件在高温、大功率微波器件方面拥有良好的应用前景^[4], 同时, AlGaIn/GaN HEMT 的可靠性问题也引起了广泛的关注和重视^[5-7]. 2008 年, Alamo 等^[5]发现 AlGaIn/GaN HEMT 在栅漏电压高于某临界值后开始退化, 器件漏电流会出现永久性的增加. Marcon 等^[6]指出该退化是一个时间依赖过程, 即使电压低于临界值, 加压时间足够长仍会造成器件漏电流增加. 漏电流增加会显著增加电路的低频噪

音和功率损耗, 降低器件的集成度, 影响器件工作的可靠性, 因此, 澄清漏电流退化的本质对提高器件的可靠性具有重要的意义. 目前在漏电流退化的机理上还有较大的争议, 主要存在高电场机理^[8]、逆压电效应^[5]、热电子诱发缺陷效应^[9]、欧姆和栅极金属材料退化^[10]等不同观点. 这些研究工作对理解反向偏压下 GaN 基 HEMT 的漏电流退化机理有很大的帮助, 但是都没有明确验证漏电流退化前后的主导机理. 确定器件漏电流的主导机理以及对漏电流进行量化分析有助于准确判断其退化机理, 但是, 由于 AlGaIn/GaN HEMT 漏电流的传输机理有隧穿和 Frenkel-Poole (FP) 发射两种不同观点^[11,12], 因此验证漏电流退化前后的传输机理十分重要.

基于此, 本文首先制备与 AlGaIn/GaN HEMT 结构与特性等效但能更方便地研究漏电流的 Al-

* 国家自然科学基金 (批准号: 11074280)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK2012110)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: JUSRP51323B, JUDCF13038)、江苏高校优势学科建设工程项目、江苏省六大人材高峰项目 (批准号: DZXX-053) 和江苏省普通高校研究生创新计划 (批准号: CXLX13-740) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: daweiyan@jiangnan.edu.cn

GaN/GaN 异质结肖特基二极管, 然后采用步进应力测试比较不同栅压对器件退化的影响, 并通过电流-电压 (I - V) 和电容-电压 (C - V) 测试来验证退化前后的漏电流传输机理, 最后使用光发射显微镜 (EMMI) 探测退化过程中器件表面的光发射, 确定 AlGaN/GaN HEMT 的漏电流时间依赖退化机理.

2 器件制备与测试

AlGaN/GaN 异质结肖特基二极管通过金属有机化合物气相沉积 (MOCVD) 法在 (0001) 面蓝宝石

石衬底上生长制备而成, 主要包括 1.6 μm 的非掺杂 GaN 层, 18 nm 的非掺杂 $\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{N}$ 势垒层和 2 nm 的非掺杂 GaN 帽层, 其结构示意图和平面照片如图 1(a) 和 (b) 所示. 电极结构包括直径 110 μm 的圆形肖特基电极和间距为 20 μm 的欧姆接触. 欧姆接触采用电子束蒸发 Ti/Al/Ti/Au, 然后在 800 $^\circ\text{C}$ 氮气气氛中快速热退火获得, Ni/Au (50/300 nm) 肖特基圆形接触采用标准光刻 lift-off 技术定义. 为减少器件表面横向漏电流, 利用等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 生长了一层二氧化硅作为钝化层.

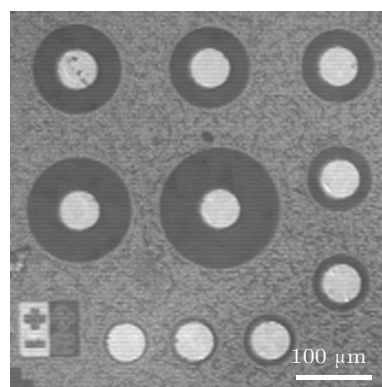
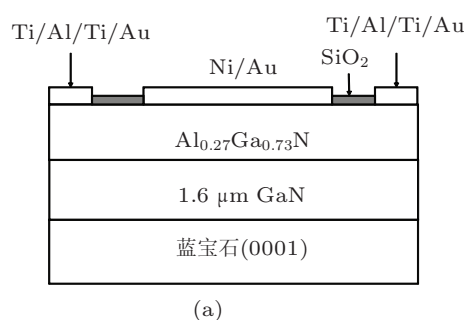


图 1 AlGaN/GaN 异质结肖特基二极管的 (a) 结构示意图及 (b) 平面照片

利用安捷伦 B1500A 精密半导体参数分析仪对器件进行 I - V , C - V 及步进应力测试. 在固定反偏电压下进行退化实验的同时, 使用 EMMI (FA Instruments Crystal Vision 2) 在不同时刻对器件表面的光发射情况进行观测, 以准确定位失效位置.

3 结果与讨论

AlGaN/GaN 异质结肖特基二极管的步进应力测试结果如图 2 所示, 测试电压从 -40 V 扫描到 -120 V, 步进幅度为 20 V, 每个电压的持续时间为 1000 s. 可以看到, 器件漏电流退化前后存在三种变化: 1) 在每个测试电压加压不久, 漏电流开始随时间快速降低, 该降低是可恢复的, 并且噪声较小 (对应图 2 中五条曲线的起始部分); 2) 在退化出现前, 漏电流开始出现较大的噪声; 3) 在电压高于临界值 (约 -80 V) 时, 漏电流开始出现随时间增加的现象, 并伴有较大的噪声, 该增加是永久性的. 下面具体分析造成上述三种漏电流变化现象的原因.

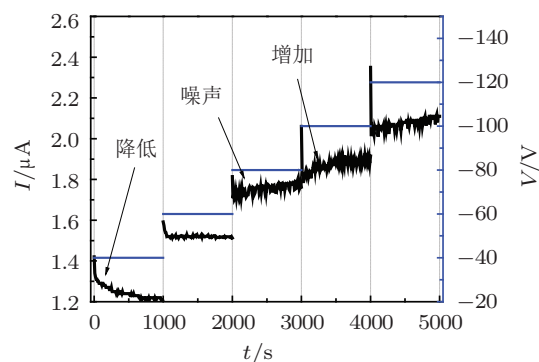


图 2 AlGaN/GaN 异质结肖特基二极管的步进应力测试结果

首先需要确定漏电流退化前后的传输机理. 目前, 对于 AlGaN/GaN HEMT 漏电流的传输机理主要有隧穿 (直接隧穿、陷阱辅助隧穿或薄表面势垒隧穿) 和 FP 发射两种不同观点. 如果器件退化前后的漏电流传输机理以 FP 发射为主导, 则 FP 发射电流密度 J_{FP} 可表示为:

$$J_{\text{FP}} = \sigma_{\text{FP}} E \exp \left[\frac{-q(\phi_{\text{B}} - \beta\sqrt{E})}{kT} \right], \quad (1)$$

其中, σ_{FP} 是 FP 导电系数, E 是电场, q 是电子电量, ϕ_{B} 是零电场势垒发射高度, k 是玻尔兹曼常数, T

是温度, $\beta = \sqrt{q/\pi\epsilon\epsilon_0}$ 是 FP 发射系数, ϵ_0, ϵ 分别为真空介电常数和相对介电常数. 整理 (1) 式可得

$$\ln(I_{\text{FP}}/E) = \frac{q\beta\sqrt{E}}{kT} + \ln A\sigma_{\text{FP}} - q\frac{\phi_{\text{B}}}{kT}, \quad (2)$$

其中 A 为栅电极面积, I_{FP} 为 FP 发射电流. 可见, 以 FP 发射为主导的漏电流传输机理中, I_{FP} 和 E 应满足

$$\ln(I_{\text{FP}}/E) \propto \sqrt{E}, \quad (3)$$

即 $\ln(I_{\text{FP}}/E)$ 与 \sqrt{E} 为线性关系, 斜率为 $q\beta/kT$, 截距为 $\ln(A\sigma_{\text{FP}}) - q\phi_{\text{B}}/kT$.

通过 I - V 和 C - V 测量可验证器件退化前后的 $\ln(I_{\text{FP}}/E)$ - \sqrt{E} 关系. 图 3 给出了样品室温下的 I - V 和 C - V 曲线 (频率 1 MHz). 可以看出, 漏电流随着反偏电压从 0 V 增至 2.5 V 而不断增加, 并在 2.5 V 左右达到饱和. 在反偏电压为 2.5 V 左右时, 异质界面的二维电子气 (2DEG) 基本耗尽. 由此可见, 漏电流的饱和与 2DEG 的耗尽之间有直接的联系. 由于 2DEG 与极化电场关系密切, 所以在分析器件漏电流传输机理时必须考虑极化电场的影响, 而不能简单地假设电压与电场是线性关系, 或者用电压直接代替电场.

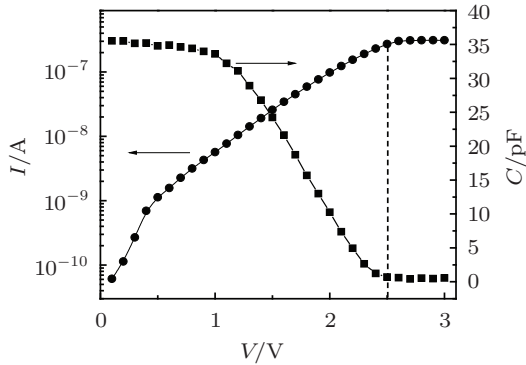


图 3 AlGaIn/GaN 异质结肖特基二极管的 I - V 和 C - V 曲线

在金属与势垒层界面之间使用高斯定理可得到势垒表面的电场为

$$E_{\text{S}}(V) = \frac{e[\sigma_{\text{P}}(-) - \sigma_{\text{S}}(V) + N_{\text{S}}(V)]}{\epsilon_{\text{r}}\epsilon_0}, \quad (4)$$

其中, $\sigma_{\text{P}}(-)$ 为负极化电荷密度, $\sigma_{\text{S}}(V)$ 为电离的势垒层表面类施主态密度, $N_{\text{S}}(V)$ 为金属表面诱导电荷密度, ϵ_{r} 为 GaN 的相对介电常数. 由电中性原理可知

$$n_{2\text{DEG}}(V) = \sigma_{\text{S}}(V) - N_{\text{S}}(V), \quad (5)$$

代入 (4) 式可得

$$E_{\text{S}}(V) = \frac{e[\sigma_{\text{P}}(-) - n_{2\text{DEG}}(V)]}{\epsilon_{\text{r}}\epsilon_0}, \quad (6)$$

由于 2DEG 耗尽前的偏压主要施加在势垒层中, 电容的变化主要由栅极以下沟道 2DEG 面密度变化引起. 因此, 偏压下的 2DEG 浓度 $n_{2\text{DEG}}(V)$ 可由 C - V 曲线积分得到

$$n_{2\text{DEG}}(V) = \frac{1}{eA} \int_{V_{\text{pin-off}}}^V C(V) dV, \quad (7)$$

式中 $V_{\text{pin-off}}$ 为夹断电压 (约 2.5 V). 由 (7) 式可求得异质界面的 2DEG 浓度约为 $5.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. 虽然 $\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{N}$ 的极化面电荷密度理论上是 $1.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 但是报道的实验结果只有理论值的一半左右^[13,14], 所以 $\sigma_{\text{P}}(-)$ 取 $0.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

由 (6) 和 (7) 式得到的 AlGaIn 表面势垒电压与电场的依赖关系如图 4 所示. 当电压低于 1.6 V 时, 电压与电场保持良好的线性关系:

$$E_{\text{S}}(V) = E_0 + \eta V, \quad (8)$$

其中 $\eta = 4.65 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, $E_0 = 6.2 \times 10^5 \text{ V/cm}$, 与文献报道的结果一致^[15]. 随着电压进一步增加, 电场逐渐饱和.

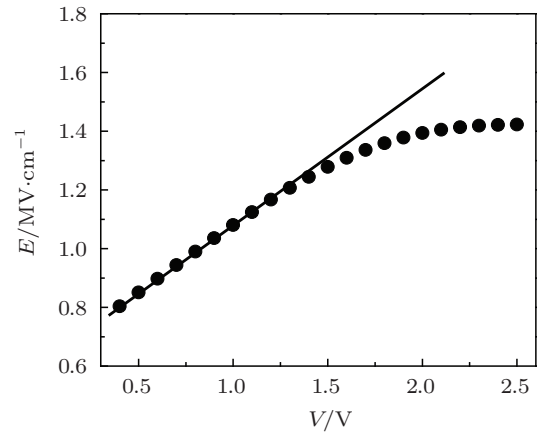


图 4 AlGaIn 势垒表面电场与电压的依赖关系

将图 4 中的电场-电压数据与对应的电流数据相结合, 可得到如图 5 所示的电场与电流的依赖关系. 经过测量, 器件在退化前后的电容没有明显的变化, 因此退化前后的电压与电场依赖关系基本不变. 可以看出, 退化前后的 $\log(I_{\text{FP}}/E)$ 与 \sqrt{E} 遵循很好的线性关系, 符合 FP 发射的特征, 表明退化前后的漏电流传输机理都是 FP 发射. 经线性拟合, 得到退化前斜率 $K_1 = 0.0052$, 截距 $D_1 = -19.7$; 退化后斜率 $K_2 = 0.0029$, 截距 $D_2 = -16.1$. 和退化前相比, 退化后斜率减少、截距增加, 由 (2) 式可确定是 FP 导电系数 σ_{FP} 增加、发射系数 β 减少所致. 由于应力下 β 减小, ϕ_{B} 增加, 其他参量为定值, 因此是 σ_{FP}

的增加导致了漏电流的增加. 对于斜率减少的原因, 我们起初认为是 GaN 相对介电常数 ϵ_r 增加导致. Ryuzaki 等 [16] 在研究 SiO₂ 薄膜时认为介电常数的增加可能源于湿气的影响. 但在本工作中, 采用的实验条件可基本排除湿气的影响. Yeargan 等 [17] 曾在考虑材料内电子水平变化的补偿效应基础上提出 FP 扩展模型, 综合考虑了自由电子、施主缺陷和受主缺陷的影响, 该模型对解释此处的漏电流退化具有一定的指导作用.

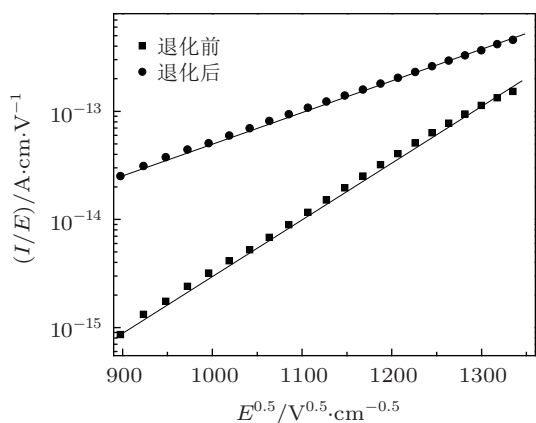


图5 退化前后的 $\log(I/E)-\sqrt{E}$ 曲线, 测试条件为在 -100 V 下退化 1800 s

在 FP 扩展模型中, FP 发射电流密度可表示为

$$J_{\text{FP}} = q\mu \frac{N_c(N_d - N_a)}{2N_a} E \exp\left[\frac{-q(\phi_B - \beta\sqrt{E})}{\xi kT}\right], \quad (9)$$

其中, ξ 是取决于费米能级位置的补偿因子, N_c 是导带底等效态密度, N_d, N_a 分别为施主及受主面密度, μ 是电子迁移率. ξ 的值由自由电子密度 N_0, N_a 和 N_d 三者关系决定. 若 N_0 远小于 N_a 和 N_d , 则 $\xi = 1$; 若 N_a 远小于 N_0 和 N_d , 则 $\xi = 2$; 若介于这两种极限情况之间, 则 ξ 值也介于 1 和 2 之间. 假设器件上持续加有一个高电场, 材料内部易产生新的施主缺陷, 则 N_d 会增加. 由于新的施主缺陷将提供更多自由电子, 则 N_d 的增加会导致 FP 发射电流的增加, 这与上面分析的 σ_{FP} 增加一致, 因为 σ_{FP} 在 (9) 式中的表现形式就是 $q\mu N_c(N_d - N_a)/2N_a$. N_d 和自由电子的增加会导致 N_a 降低, 使 ξ 从 1 向 2 变化. 由 (9) 式可知, 正是 ξ 的增加导致了图 5 中斜率的减小. 因此, 我们认为新缺陷的产生是导致器件退化的主要原因.

为验证上述观点, 在加压过程中使用 EMMI 对不同退化阶段的器件表面进行光发射观测. 在固定反偏电压 -120 V 下, 器件漏电流随时间的变化如图 6(a) 所示; 在 t 为 10 s, 500 s, 1800 s, 3600 s 四个

时刻的 EMMI 观测结果如图 6(b) 所示, 其中在每个时刻的观测时间均为 60 s. 在 $t = 10\text{ s}$ 时, 图 6(a) 中的漏电流还处于下降阶段, EMMI 照片中基本没有观察到红色“热点”(或“热点”相对较少); 而在退化现象出现后, 可以在栅电极边缘处明显地观察到热点, 并且随着漏电流增加, 热点密度越来越大. 这是由于被陷电子在场发射过程中释放能量, 被 EMMI 探测到而呈现为红色热点. 换言之, 热点位置可认为基本对应缺陷的位置. 热点密度随漏电流增加而增加, 表明缺陷密度也随之增加, 即材料内部随着时间的增加不断产生新的缺陷. 考虑到热点多分布在器件栅极边缘, 而栅极边缘是电场最高的区域, 因此这些缺陷的产生可能源于高电场 [8], 例如, 很高的电场可在 AlGaN 层中产生线性位错等缺陷 [5].

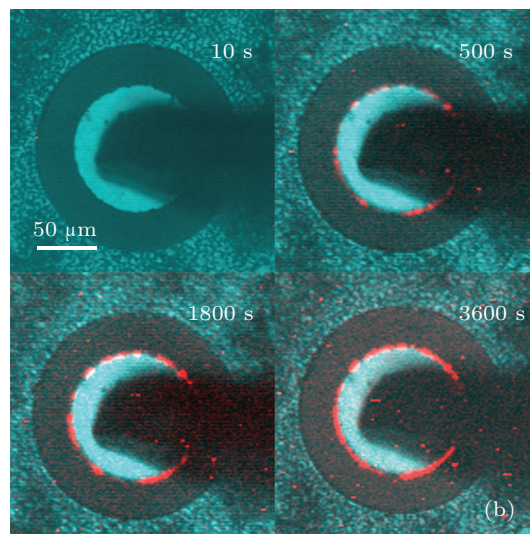
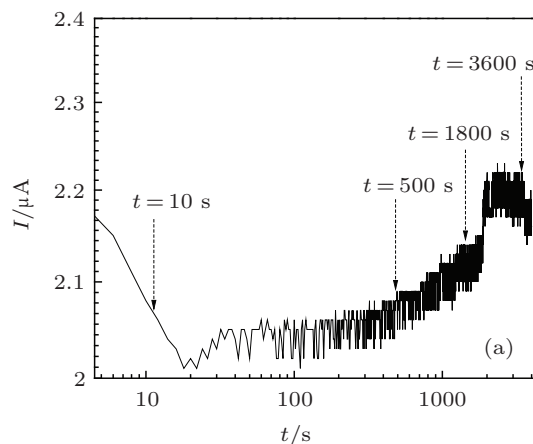


图6 (a) 固定反偏电压下器件漏电流随时间的变化; (b) 不同时刻器件表面的 EMMI 照片

当器件栅极加上反向电压时, 电子由栅极注入 AlGaN 层, 负电荷在 AlGaN 层积累, 导致图 2 和图

6(a) 中漏电流在起始阶段快速降低. 当电压较低时, 电子被 AlGa_N 层的固有缺陷捕获, 发生电子放电过程, 导致漏电流逐渐降低. 当电压高于临界值且持续一段时间后, 高电场使 AlGa_N 层中产生新缺陷, 缺陷密度的增加导致了 FP 发射电流 I_{FP} 的增加, 所以图 6(a) 中的漏电流随缺陷增多而增加. 值得指出的是, 退化过程中漏电流的增加总是伴随着较大的噪声, 这可能是由于随着缺陷的增多, 缺陷之间出现了重叠所致. 此外, 在应力后期, 图 6(a) 中的漏电流出现降低的情况, 这是由于缺陷密度的增大加剧了载流子散射, 使 (9) 式中的迁移率 μ 减小所致^[18], 这也再次验证了 FP 扩展模型对解释此类器件漏电流退化机理的正确性.

4 结论

为方便研究 AlGa_N/Ga_N HEMT 的漏电流退化机理, 制备了与其结构和特性等效的 AlGa_N/Ga_N 异质结肖特基二极管. 通过步进应力测试发现在反偏电压高于某临界值后, 器件漏电流开始出现退化. 将极化电场引入电流与电场的依赖关系后, 基于 I - V , C - V 测试验证了器件退化前后的漏电流传输机理均由电子 FP 发射主导. 分析了退化前后 $\log(I_{FP}/E)-\sqrt{E}$ 曲线斜率的变化情况, 并利用 EMMI 观测了不同退化阶段器件表面与缺陷对应的“热点”的变化情况, 确认了漏电流退化的机理是在高电场作用下, AlGa_N 层中产生了新缺陷, 缺陷密度的增加导致了 FP 发射电流的增加.

- [1] Wang X W, Omair I S, Xi B, Lou X B, Richard J M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 232109
- [2] Zhang Z W, Zhu C F, Fong W K, Surya C 2011 *Solid-State Electronics* **62** 94
- [3] Toyoda S, Shinohara T, Kumigashira H, Oshima M, Kato Y 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 231607
- [4] Eastman L F, Tilak V, Smart J, Bruce M G, Eduardo M C, Dimtrov R 2001 *IEEE Transactions on Electron Devices* **48** 479
- [5] Joh J, Alamo J A 2008 *IEEE Electron Device Letters* **29** 287
- [6] Marcon D, Kauerauf T, Medjdoub T, Das J, Van H M 2010 *IEEE IEDM* San Francisco, CA Dec. 6–8, 2010 472
- [7] Gu W P, Hao Y, Zhang J C, Wang C, Feng Q, Ma X H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 511 (in Chinese) [谷文萍, 郝跃, 张进城, 王冲, 冯倩, 马晓华 2009 物理学报 textbf58 511]
- [8] Chang C Y, Douglas E A, Jinyhung K, Liu L 2011 *IEEE Trans. Device Mater. Rel.* **11** 187
- [9] Meneghesso G, Verzellesi G, Danesin F, Francesca D, Fabiana R 2008 *IEEE Trans. Device Mater. Rel.* **8** 332
- [10] Piner E, Singhal S, Rajagopal P, Therrien R, Roberts J C, Li T 2006 *IEDM* San Francisco, CA Dec. 11–13, 2006 411
- [11] Karmalkar S, Sathaiya D M 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3976
- [12] Yan D W, Lu H, Cao D S 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 153503
- [13] Garrido J A, Jiménez A, Muñoz E 1999 *Phys. Status Solidi A* **176** 195
- [14] Winzer A T, Goldhahn R, Gobsch G 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 181912
- [15] Kurtz S R, Allerman A A, Koleske D D, Peake G M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 4549
- [16] Ryuzaki D, Ishida T, Furusawa T 2003 *J. Electrochem. Soc.* **150** F203
- [17] Yeargan J R, Taylor H L 1968 *J. Appl. Phys.* **39** 5600
- [18] Wang X H, Wang J H, Pang L, Chen X J, Yuan T T, Luo W J, Liu X Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 177302 (in Chinese) [王鑫华, 王建辉, 庞磊, 陈晓娟, 袁婷婷, 罗卫军, 刘新宇 2012 物理学报 **61** 177302]

Degradation mechanism of leakage current in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors*

Ren Jian Yan Da-Wei[†] Gu Xiao-Feng

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry (Ministry of Education), Department of Electronic Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

(Received 3 March 2013; revised manuscript received 31 March 2013)

Abstract

In order to study the degradation mechanism of leakage current in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors (HEMTs), we have fabricated AlGaIn/GaN heterojunction Schottky diodes having equivalent structure and characteristics to AlGaIn/GaN HEMTs. Step stress tests were then performed to compare the leakage current changes at different gate voltages. The transport mechanism of leakage current before and after degradation was validated based on the current-voltage and capacitance-voltage measurements. The light emission from the device surface was examined by emission microscopy (EMMI) to investigate the time-dependent degradation of leakage current. Experimental results show that the leakage current increases with increasing time and is accompanied by a large noise when the applied gate voltage exceeds a critical value. After introducing the polarization field into the current-field dependence, $\log(I_{FP}/E)$ exhibits a good linear relationship with \sqrt{E} both before and after degradation, indicating that the leakage current is dominated by the Frenkel-Poole (FP) emission. The slope of $\log(I_{FP}/E)-\sqrt{E}$ curve decreases after degradation, and the 'hot spots' corresponding to defects are directly observed by EMMI at the gate edge of the degraded device, suggesting that the degradation mechanism is: New defects are induced by high electric field in the AlGaIn layer, and the increase of defect density leads to the increase of FP emission current.

Keywords: AlGaIn/GaN, high electron mobility transistor, leakage current, degradation mechanism

PACS: 72.80.ey, 73.40.kp, 73.40.-c

DOI: 10.7498/aps.62.157202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11074280), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK2012110), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. JUSRP51323B, JUDCF13038), PAPD of Jiangsu Higher Education Institutions, the Summit of the Six Top Talents Program of Jiangsu Province, China (Grant No. DZXX-053), and the Graduate Student Innovation Program for University of Jiangsu Province (Grant No. CXLX13-740).

[†] Corresponding author. E-mail: daweyan@jiangnan.edu.cn