

开态应力下电压和电流对AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管的退化作用研究

石磊 冯士维 石帮兵 闫鑫 张亚民

Degradation induced by voltage and current for AlGaIn/GaN high-electron mobility transistor under on-state stress

Shi Lei Feng Shi-Wei Shi Bang-Bing Yan Xin Zhang Ya-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 127303 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.127303

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.127303>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

阶梯氧化层新型折叠硅横向双扩散功率器件

New folding lateral double-diffused metal-oxide-semiconductor field effect transistor with the step oxide layer

物理学报.2015, 64(6): 067304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.067304>

新型缓冲层分区电场调制横向双扩散超结功率器件

New super junction lateral double-diffused MOSFET with electric field modulation by differently doping the buffered layer

物理学报.2014, 63(24): 247301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.247301>

具有N型缓冲层REBULF Super Junction LDMOS

New REBULF super junction LDMOS with the N type buffered layer

物理学报.2014, 63(22): 227302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.227302>

SnO₂/p⁺-Si异质结器件的电致发光: 利用TiO₂盖层提高发光强度

Electroluminescence from SnO₂/p⁺-Si heterostructured light-emitting device: enhancing its intensity via capping a TiO₂ film

物理学报.2014, 63(17): 177302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.177302>

GaN HEMT 欧姆接触模式对电学特性的影响

Effect of different ohmic contact pattern on GaN HEMT electrical properties

物理学报.2014, 63(11): 117302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.117302>

开态应力下电压和电流对 AlGa_N/Ga_N 高电子迁移率晶体管的退化作用研究*

石磊 冯士维[†] 石帮兵 闫鑫 张亚民

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

(2014年12月10日收到; 2015年1月30日收到修改稿)

通过采集等功率的两种不同开态直流应力作用下 AlGa_N/Ga_N 高电子迁移率晶体管 (HEMTs) 漏源电流输出特性、源区和漏区大信号寄生电阻、转移特性、阈值电压随应力时间的变化, 并使用光发射显微镜观察器件漏电流情况, 研究了开态应力下电压和电流对 AlGa_N/Ga_N 高电子迁移率晶体管的退化作用. 结果表明, 低电压大电流应力下器件退化很少, 高电压大电流下器件退化较明显. 高电压是 HEMTs 退化的主要因素, 栅漏之间高电场引起的逆压电效应对参数的永久性退化起决定性作用. 除此之外, 器件表面损坏部位的显微图像表明低电压大电流下器件失效是由于局部电流密度过高, 出现热斑导致器件损伤引起的.

关键词: AlGa_N/Ga_N 高电子迁移率晶体管, 电压, 电流, 退化

PACS: 73.40.Kp, 73.61.Ey, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.64.127303

1 引言

AlGa_N/Ga_N 高电子迁移率晶体管 (HEMTs) 因具有宽禁带、高电子迁移率、高击穿电场等特点, 且适合于大功率、高频率工作条件, 在近年来得到广泛的应用^[1-3]. 尽管已投入市场, 但其可靠性以及参数退化问题仍是制约器件发展的关键问题. Ga_N 基 HEMTs 的退化和失效机理是多方面的复杂过程, 对于器件退化原因的解释有多种机理. Jungwoo 等^[4,5] 提出基于逆压电效应的失效机理, 栅极靠漏极一侧处于高反偏电场的作用下, 当超过临界电压时, 由于逆压电效应导致晶体缺陷产生. Dammann 等^[6] 提出漏源电流的退化可能是由于高场下热电子引起的缺陷导致的. 国内的谷文萍等^[7] 的研究表明热电子效应和虚栅填充表面态对器件起到退化作用. 目前集中于研究电压对于 Ga_N 基 HEMTs 退化的作用, 但实际应用中器件往往也处于大电流下, 关于电流和电压两者中何者起

主要作用需要更深入的研究.

本文研究了电压和电流对 AlGa_N/Ga_N HEMTs 退化的影响. 实验在高温环境下对器件施加直流开态应力, 对比研究了等功率应力下施加不同电压和电流的器件, 对不同应力时间后的器件参数进行了测量, 并对样品进行了微区分析, 观察总结了电压和电流两者对于器件退化的影响并给出理论分析.

2 样品与实验方案

样品采用金属有机化学气相沉积法在 SiC 衬底上生长 Ga_N 缓冲层和 AlGa_N 势垒层. 源(漏)区的欧姆接触由 Ti/Al/Ni/Au 构成, 栅极金属由 Ni/Au 构成, 均采用电子束蒸发技术制备. 样品栅极长度为 1.1 μm, 宽度为 150 μm. 栅极-漏极间距为 2.4 μm, 栅极-源极间距为 1.5 μm. 器件表面有 100 nm 厚的 Si₃N₄ 钝化层, 总体结构如图 1 所示.

设计了两组实验对器件进行退化, 其开态

* 国家自然科学基金 (批准号: 61376077) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4132022, 2132023) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: shwfeng@bjut.edu.cn

应力条件分别为: 漏源电压 $V_{DS} = 28 \text{ V}$, 漏源电流 $I_{DS} = 75 \text{ mA/mm}$ (样品A); $V_{DS} = 14 \text{ V}$, $I_{DS} = 150 \text{ mA/mm}$ (样品B). 因此样品A和B的功率相等, 均为 2.1 W/mm . 样品A和B施加功率时均置于恒温平台上, 管壳温度保持 $150 \text{ }^\circ\text{C}$. 实验中每 12 h 测量一次参数(在最初 24 h 内额外在 8 h 处多测量一次), 测量时先停止电应力, 而后器件静置 4 h 再进行测量. 测量参数包括漏-源电流-电压 (I - V) 特性曲线 ($V_{DS} = 0\text{--}5 \text{ V}$, 步长为 0.05 V , 栅源电压 $V_{GS} = 0, -0.3, -0.6, -0.9, -1.2, -1.5 \text{ V}$), 源区大信号寄生电阻 R_S , 漏区大信号寄生电阻 R_D , 转移特性曲线 I_{DS} - V_{GS} ($V_{DS} = 5 \text{ V}$, $V_{GS} = -2\text{--}-0.5 \text{ V}$, 步长为 0.005 V), 阈值电压 $V_{GS(th)}$ ($V_{DS} = 5 \text{ V}$, $I_{DS} = 1 \text{ mA/mm}$, 提取自转移特性曲线).

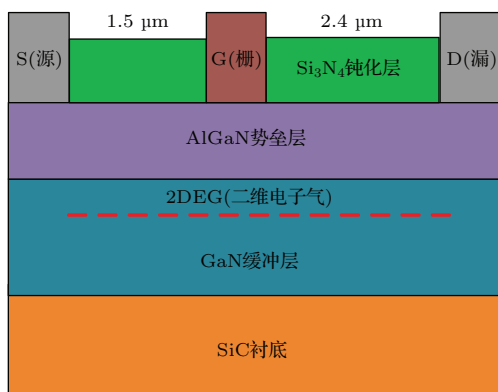


图1 器件结构截面图

Fig. 1. Cross section of device structure.

3 实验结果与分析

实验过程中前后参数出现了不同程度的退化. 图2是样品的漏-源 I - V 特性曲线在 192 h 应力施加前后的变化. 从图2可以看到: 样品A的漏-源 I - V 特性曲线出现了较明显的下移, 说明漏源电流输出能力出现了下降; 而样品B在 0 和 192 h 两组曲线位置接近重合, 即漏源电流输出能力基本不变. 由图2所示结果可初步认为, 同样功率条件下高电压相比大电流对于器件参数的退化效果更为显著.

图3给出了样品A和B的源区大信号寄生电阻 R_S , 漏区大信号寄生电阻 R_D 在实验过程中的变化(栅极电流注入方法测量)^[8,9]. 两者的 R_S 和仅样品B的 R_D 总体略呈缓慢上升. 样品A的 R_D 则

呈现出较明显的增大, 并且最为突出的增大出现在最初 $0\text{--}8 \text{ h}$.

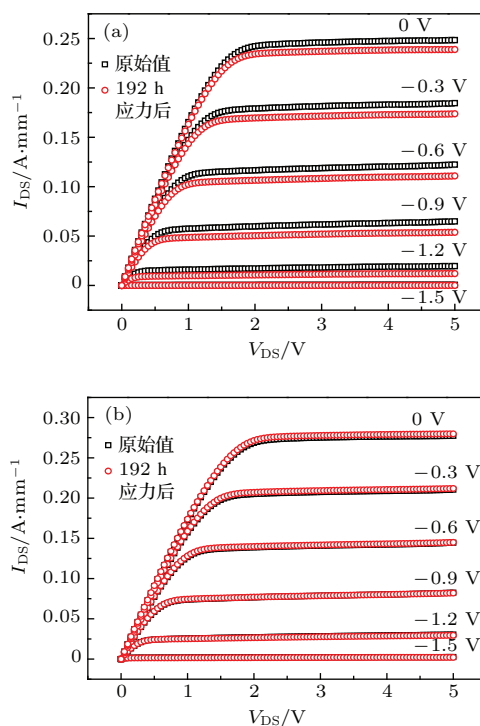


图2 (网刊彩色) 漏-源 I - V 特性曲线在实验前后的变化 ($V_{DS} = 0\text{--}5 \text{ V}$; 步长为 0.05 V ; $V_{GS} = 0, -0.3, -0.6, -0.9, -1.2, -1.5 \text{ V}$) (a) 样品A; (b) 样品B

Fig. 2. (color online) The drain-source I - V characteristics before and after the stress: (a) device A; (b) device B. $V_{DS} = 0\text{--}5 \text{ V}$, step is 0.05 V ; $V_{GS} = 0, -0.3, -0.6, -0.9, -1.2, -1.5 \text{ V}$.

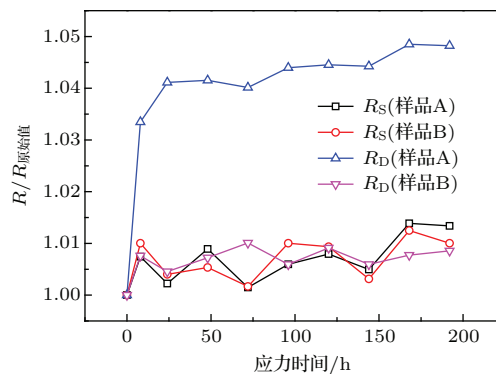


图3 (网刊彩色) 归一化 R_S 和 R_D 随应力时间的变化

Fig. 3. (color online) The changes of the normalized R_S and R_D with stress time.

考虑到样品A比样品B的漏源电流更小, 因此引起样品A的 R_D 增大更明显的主要原因应是高的漏源电压. 样品A自身的 R_S 和 R_D 的不同表现也证明了这点, 经过其漏极和源极的电流大小是一致的, 因此认为是栅漏电压 V_{GD} 和栅源电压 V_{GS} 不同导致的, 栅源之间的反向偏压相对很小, 而栅漏

之间 28 V 左右反向偏压导致了 R_D 的增大. 这同 Jungwoo 和 del Alamo [5] 的研究结果是一致的, 逆压电效应导致栅极靠近漏极一侧下方的缺陷增大, 降低了该区域下方二维电子气的浓度, 导致 R_D 的增大. 对样品 B 而言, 14 V 的反偏电压还未达到逆压电效应产生明显效果的临界电压, 因此 R_D 变化很小.

高电场下也可能伴随热电子效应和栅极电子注入的影响. 根据 Barry 等的研究, 当电场强度 $E > 2.7$ kV/cm 时热电子效应已较为明显 [10,11], 本实验中即使在 $V_{DS} = 14$ V 时, E 约为 28 kV/cm, 已足够产生热电子效应, 因此应该观察到样品 A 和 B 出现同样变化才对, 但并非如此. 这是因为在热电子效应中, 参数退化是热电子溢出沟道被陷阱俘获导致, 该退化是非永久性退化 [6,12], 撤除应力到测量参数之间的 4 h 间隔内, 陷阱将电子释放, 使得参数恢复 [7,13]. 类似的, 其他诸如栅极电子注入引起的陷阱填充的影响也在该间隔时间内消失 [4,14]. 因此样品 B 参数基本不变, 而样品 A 在高电压应力下发生了逆压电效应引起的永久性变化, 测量出的参数变化体现出的是该永久退化.

除以上几种退化机理之外, 自热效应的影响也需加以分析. 自热效应主要取决于器件温升, 等功率应力下的器件温升相同, 自热效应对二者的影响应该是相同的, 样品 A 和 B 之间的差别无法用自热效应来解释. 根据 Gaska 等 [15] 的研究, 自热效应对器件性能存在瞬态影响. 样品 B 基本不变, 说明自热效应即使有影响, 其影响也已在应力和测量间的 4 h 间隔内消失. 因此认为样品 A 的退化不是由自热效应导致, 其对于器件永久退化没有影响或影响很小.

图 4 是样品的转移特性曲线在实验前后的变化. 样品 A 的转移特性曲线向下漂移, 而样品 B 的曲线基本没有变化, 这和前边漏-源 $I-V$ 特性、 R_D 的变化是相一致的, 机理相同. 为了更深入地分析器件参数的变化, 我们从转移特性曲线中提取出了阈值电压 $V_{GS(th)}$ ($V_{DS} = 5$ V, $I_{DS} = 1$ mA/mm) 的变化, 如图 4 内插图所示.

样品 A 相比样品 B, $V_{GS(th)}$ 幅度 (绝对值, 不考虑正负号) 减小明显. 和前边的分析一致, 在样品 A 中, 高的栅漏反偏电压导致栅极靠近漏极一侧下方的缺陷增多, 二维电子气沟道内电子浓度下降. 因此在退化后, 如果 V_{GS} 仍等于未加应力时阈值电压

$V_{GS(th)}$ (原始值), 则 I_{DS} 必然小于阈值电流. 为使漏源电流达到阈值, 只能减小 V_{GS} 的幅度, 减小对于沟道的耗尽程度, 当下降到 V_{GS} 等于 192 h 处的阈值电压 $V_{GS(th)(192 h)}$ 时, 沟道内二维电子气浓度达到阈值浓度, 使得漏源电流等于阈值电流.

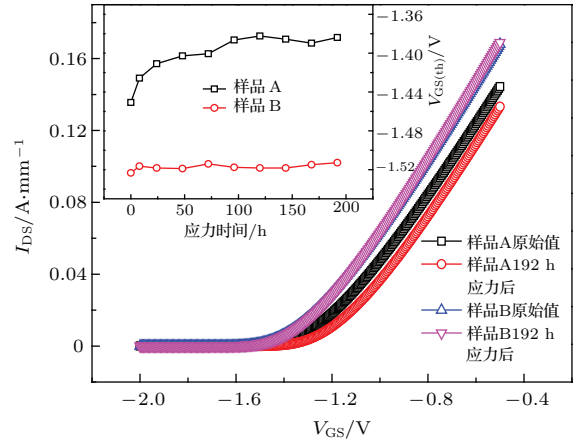


图 4 (网刊彩色) 应力前后的转移特性曲线 ($V_{DS} = 5$ V, $V_{GS} = -2 \sim -0.5$ V, 步长为 0.005 V). 内插图为阈值电压 $V_{GS(th)}$ 随应力时间的变化 ($V_{DS} = 5$ V, $I_{DS} = 1$ mA/mm)

Fig. 4. (color online) The transfer characteristics before and after stress ($V_{DS} = 5$ V, $V_{GS} = -2 \sim -0.5$ V, step is 0.005 V). Inset shows the change of $V_{GS(th)}$ with stress time ($V_{DS} = 5$ V, $I_{DS} = 1$ mA/mm).

样品在实验后的光发射显微镜 (EMMI) 图像如图 5 所示, 可以清楚地看到样品 A 比样品 B 的漏电情况明显加剧, 证明了高电压对于器件退化的作用, 另一方面也证明了前边讨论中认为是逆压电效应导致样品 A 参数变化. 热电子效应中电子被陷阱填充, 该现象只会导致栅极漏电流减少而非增大 [6], 而逆压电效应会导致漏电流加大 [5], 后者同观察到的 EMMI 图像相一致.

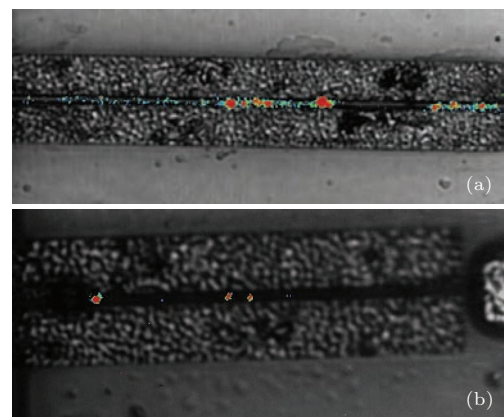


图 5 实验后样品 A 和 B 的表面 EMMI 图像 (a) 样品 A; (b) 样品 B

Fig. 5. The emission microscope images of the surface of sample A and B: (a) sample A; (b) sample B.

虽然从实验结果来看电压比电流的退化作用更为明显,但值得注意的是低电压大电流情况下器件时有发生突然损坏的情况.图6是损坏的局部图片,可以清楚地看到明显的烧毁痕迹.其损坏没有先兆,并未事先伴随相应的器件参数变化.这应该是由于大电流引起的局部温度过高导致的,尽管功率相等,但实际器件的热量分布不可能做到完全均匀,大电流情况下某些局部可以分配得到更大的电流.假设其区域的平均等效电阻为 R_{damage} ,该区域分配的电流密度为 J_{damage} ,在大电流情况下更容易超过安全值, $J_{\text{damage}}^2 \times R_{\text{damage}}$ 引起的区域热量堆积情况更为严重,局部热斑导致热-电反馈引起烧毁.因此,尽管低电压大电流下对于器件的参数退化作用很小,但是更有可能引起器件突然烧毁,需要加以注意.

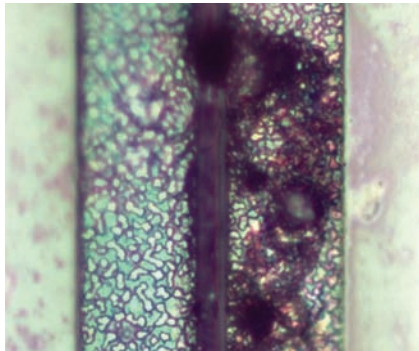


图6 低电压、大电流应力下器件的损坏局部显微图片
Fig. 6. The microscope image of damage area of the device under low voltage and high current stress.

4 结 论

在高温环境等功率应力条件下,高电压小电流相比于低电压大电流对于器件的退化作用更为明显.应力作用下的热电子效应、栅极电子注入、自热效应对器件性能的影响是可恢复的,其影响在应力和测量的间隔内均已消失.器件性能永久性退化主要是由于高电压下的逆压电效应导致的.逆压电效应除随应力电压增加外,也和电压作用时间呈正相关,器件在其作用下出现损伤是一个持续的而

非瞬态过程,集中发生在施加应力后的最初8 h内.另外大电流虽然对于器件退化作用很小,但高电流密度下容易局部过热出现热斑,从而导致器件的突然烧毁.

参考文献

- [1] Soltani A, Rousseau M, Gerbedoen J C, Mattalah M, Bonanno P L, Telia A, Bourzgui N, Patriarche G, Ougazaden A, BenMoussa A 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 233506
- [2] Perez-Tomas A, Fontsero A, Sanchez S, Jennings M R, Gammon P M, Cordier Y 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 0235112
- [3] Huang J, Li M, Tang C W, Lau K M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 128102
- [4] Jungwoo J, Xia L 2007 *IEEE International Electron Devices Meeting* Washington DC, USA, December 10–12, 2007 p385
- [5] Jungwoo J, del Alamo J A 2008 *IEEE Electron Dev. Lett.* **29** 287
- [6] Dammann M, Pletschen W, Waltireit P, Bronner W, Quay R, Müller S, Mikulla M, Ambacher O, van der Wel P J, Murad S, Rödle T, Behtash R, Bourgeois F, Riepe K, Fagerlind M, Sveinbjörnsson E Ö 2009 *Microelectron. Reliab.* **49** 474
- [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 **58** 511]
- [8] Greenberg D R, del Alamo J A, Bhat R 1995 *IEEE Trans. Electron Dev.* **42** 1574
- [9] Greenberg D R, del Alamo J A 1996 *IEEE Trans. Electron Dev.* **43** 1304
- [10] Barry E A, Kim K W, Kochelap V A 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2317
- [11] Wang X D, Hu W D, Chen X S, Lu W 2012 *IEEE Trans. Electron Dev.* **59** 1393
- [12] Meneghini M, Stocco A, Silvestri R, Meneghesso G, Zanoni E 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 233508
- [13] Joh J, Del Alamo J A 2011 *IEEE Trans. Electron Dev.* **58** 132
- [14] Shi L, Feng S W, Guo C S, Zhu H, Wan N 2013 *Chin. Phys. B* **22** 027201
- [15] Gaska R, Osinsky A, Yang J W, Shur M S 1998 *IEEE Electron Dev. Lett.* **19** 89

Degradation induced by voltage and current for AlGaN/GaN high-electron mobility transistor under on-state stress^{*}

Shi Lei Feng Shi-Wei[†] Shi Bang-Bing Yan Xin Zhang Ya-Min

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 10 December 2014; revised manuscript received 30 January 2015)

Abstract

Voltage and current degrade the AlGaN/GaN high electron mobility transistors (HEMTs) under on-state stress. To determine which one dominates the degradation, two on-state stresses which have equal power are exerted on AlGaN/GaN HEMTs: high voltage and low current on sample A, low voltage and high current on sample B. In the former stress, drain-source voltage (V_{DS}) is 28 V, drain-source current (I_{DS}) is 75 mA/mm. In the latter stress, V_{DS} is 14 V and I_{DS} is 150 mA/mm. The package temperatures of samples A and B are kept at 150 °C. The samples are measured every 24 hours, with an extra measurement at the 8th hour in the first 24 hours (note that the time refers to the stressing time). There is an interval of 4 hours between the stressing and the measurement. The device parameters include drain-source current-voltage (I_{DS} - V_{DS}) characteristics, large-signal parasitic source resistance (R_S), large-signal parasitic drain resistance (R_D), and transfer characteristics between I_{DS} and gate-source voltage (V_{GS}). The emission microscope (EMMI) is used to study the leakage current after experiment. The I_{DS} - V_{DS} characteristics of sample B are kept constant after being stressed, while that of device A shifts downward after being stressed. R_S of sample A, R_S of sample B, and R_D of sample B increase slightly, R_D of sample A increases more obviously with most change happening in the first 8 hours. I_{DS} - V_{GS} characteristics of sample B kept constant, I_{DS} - V_{GS} characteristics of sample A shift downward. The changes of threshold voltage ($V_{GS(th)}$) is obtained from the transfer characteristics, and it is similar to the changes of transfer characteristics. The $V_{GS(th)}$ magnitude (absolute value) of sample A decreases obviously while that of sample B decreases slightly. The measurements show that the device under low voltage and high current stress degrades little and the device under high voltage and low current stress degrades more obviously. The EMMI images show that the leakage of sample A is greater than that of sample B. The analyses of the parameter change, experiment setting and EMMI image indicate that the voltage, rather than the current, dominates the degradation for AlGaN/GaN HEMTs. The influences of hot electron effect, gate electron injection, and self-heating are recoverable, and they vanish in the interval between the stressing and the measurements. The permanent degradation of device parameter is caused by the inverse piezoelectric effect induced by high electrical field between the gate and the drain. Besides, it is found that sudden failure without precursor is easy to happen to the device under low voltage and high current stress. The microscope image of damaged area shows that the failure is due to hot spot induced by high current density.

Keywords: AlGaN/GaN high electron mobility transistors, voltage, current, degradation

PACS: 73.40.Kp, 73.61.Ey, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.64.127303

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61376077) and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant Nos. 4132022, 2132023).

[†] Corresponding author. E-mail: shwfeng@bjut.edu.cn