

GaN MMIC 中 SiN 介质 MIM 电容的可靠性*

王鑫华 王建辉 庞磊 陈晓娟 袁婷婷 罗卫军 刘新宇†

(中国科学院微电子研究所, 微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029)

(2011 年 12 月 23 日收到; 2012 年 2 月 24 日收到修改稿)

本文通过恒定应力加速实验对 GaN 微波单片集成电路中 SiN 介质 MIM 电容的可靠性进行了评估, 研究了高场下 MIM 电容的两种失效模式、临界介质击穿电荷密度以及平均失效前时间. 通过不同温度下介质电容的导电特性求解了介质内的缺陷能级. 重点分析了 SiN 介质 MIM 电容的退化机理, 研究认为高应力下介质内产生新的施主型缺陷, 并占据主导地位, 其缺陷能级逐渐向深能级转移; 缺陷的持续增加加剧了介质内载流子的散射, 导致应力后期泄漏电流降低. SiN 介质 MIM 电容退化机理的研究为加固介质电容提供了依据.

关键词: SiN, MIM 电容, 缺陷, 平均失效前时间

PACS: 73.40.Rw, 77.55.-g, 71.55.-i

1 引言

GaN 微波单片集成电路 (MMIC) 电路中的主要器件有高电子迁移率器件 (HEMT) 和 SiN 介质的 MIM 电容等^[1,2]. 单片电路的可靠性基本取决于主要器件的可靠性. SiN 介质 MIM 电容的失效仅次于 HEMT, 但在实际使用过程中 MIM 电容的失效却不易察觉. 往往这些失效会错误地归结为 HEMT 的失效. 因此研究高可靠的介质电容对稳定单片电路非常重要. 另外, MIM 电容的介质和钝化所用的介质往往同时淀积, 因此通过介质电容的可靠性来评估介质淀积工艺的水平变得很有意义. 时间依赖介质击穿模型 (TDDB) 是表征介质电容失效的有效模型^[3]. 通过恒定电压加速实验和斜坡电压加速实验可以对介质电容进行寿命估计^[4-8], 同时对介质电容失效机理的研究为进一步提高介质质量指明了方向^[9,10], 为更准确的寿命评估提供了理论基础^[11]. 本文将对 GaN MMIC 中未优化的 SiN 介质 MIM 电容进行可靠性评估, 研究介质电容的失效模式、失效机理, 为加固介质电容的可靠性提供

依据, 同时进一步地推动和完善 SiN 介质淀积的过程工艺控制.

2 试验方法及过程

加速应力实验是评估器件可靠性的有效方法. 通过加速电场和温度均可加速电容的失效. 本试验选取电场作为器件加速老化的因子, 采用恒定应力模式. 这要求实验需要合理地选取加速电压, 既保证器件不瞬间击穿, 又要保证在适当的时间内失效. 为方便测试, 实验选用 120 nm 厚度的 SiN 介质 MIM 电容做样品, 尺寸 100 μm \times 100 μm . 更厚的介质电容击穿电压超过设备可提供的最大电压. SiN 介质采用 PECVD 淀积, 温度条件为 180 $^{\circ}\text{C}$. 确定介质电容的瞬间击穿电压 (大约在 75 V), 在击穿电压以下以 3 V 为梯度递减选取合适的加速电压 V_{stress} , 即 65 V, 62 V, 59 V, 56 V, 53 V. 将样品分为 5 组, 每组 6 只, 分别对应不同的加速电压进行实验. 通过显微镜观察电容宏观结构, 以出现击穿点为失效判据. 实验中设备自动记录介质泄漏电流, 应力前后采集介质电容的 I - V 特性.

* 国家重点基础研究计划 (973) 项目 (批准号: 2010CB327500) 资助的课题.

† E-mail: xyliu@ime.ac.cn

3 分析与讨论

3.1 失效模式

实验中 MIM 电容出现两种类型的失效模式, 一种为金属键与电容上极板的空气桥熔断(图 1(a)); 另一种为介质击穿(图 1(b)). 两种失效模式发生的条件有所不同. 前一种失效发生在大于瞬态击穿电压的电应力下, 此时泄漏电流较大, 金属空气桥先于介质击穿, 可见该 MIM 电容瞬态失效的瓶颈在于金属空气桥的热熔断; 后一种失效发生在应力电压小于瞬态击穿电压的加速老化过程中, 表现为介质硬击穿(包括电容上下极板击穿). 两种失效模式说明空气桥工艺和结构可以进一步改进, 同时介质缺陷需重点研究.

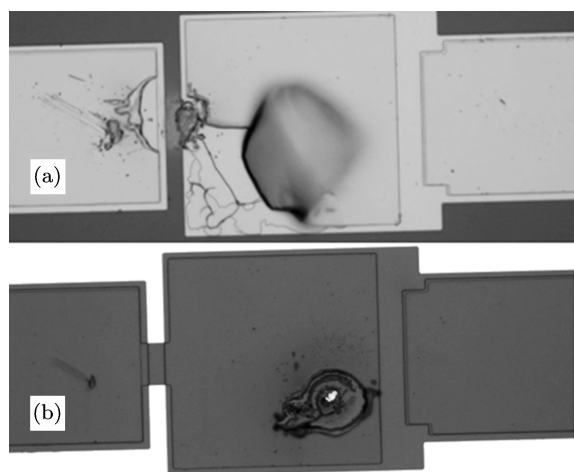


图 1 MIM 电容失效后光学照 (a) 空气桥熔断; (b) 介质硬击穿(背光)

3.2 缺陷能级

介质的缺陷可以通过电容的导电特性有所反映. 图 2 为不同温度下 MIM 电容测试结构的泄漏电流, 可以看出其高场和低场导电规律截然不同. 当电场强度低于 3 MV/cm 时(即低场), $I-V$ 特性满足欧姆定律和 arrhenius 模型^[3],

$$J_{\Omega} = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_{\Omega}}{kT}\right) \times E, \quad (1)$$

其中, σ_0 是导电系数, E_{Ω} 是激活能, E 是电场强度, k 是波尔兹曼常数, T 是绝对温度. 介质表现的欧姆机理被认为是一种跳跃导电模式. 载流子通过直接隧穿的方式从一个缺陷态到另一个缺陷态, 从而实

现导电. 由于测试设备的精度原因, 低电场下测得的介质电流波动性较大, 不利于数据分析. 在更高的场强下, $I-V$ 特性表现出 Frenkel-Poole 导电机理. 非阻塞型接触的绝缘层 Frenkel-Poole 电流密度表达式为^[3]

$$J_{FP} = \sigma_{FP} E \exp\left[\frac{-\left(\phi_t - \beta\sqrt{E}\right)}{kT}\right], \quad (2)$$

其中, ϕ_t 是缺陷能级, σ_{FP} 是 Frenkel-Poole 导电系数, k 是波尔兹曼常数, $\beta = \sqrt{\frac{q}{\pi\epsilon_0\kappa}}$ 为 Frenkel-Poole 发射系数, ϵ_0 是真空介电常数, κ 是 SiN 相对介电常数. 对 (2) 式进行适当的变化, 可得

$$\ln\left(\frac{I}{V}\right) = \ln\left(\frac{A\sigma_{FP}}{d}\right) - \frac{\phi_t}{kT} + \frac{\beta}{kT} \frac{1}{\sqrt{d}}\sqrt{V}, \quad (3)$$

其中, d 为介质厚度, A 为电容面积. 根据 (3) 式绘制关于 $\ln\left(\frac{I}{V}\right) - \sqrt{V}$ 的曲线, 曲线的斜率 $K = \frac{\beta}{kT\sqrt{d}}$, 曲线在纵坐标的截距 $D = \ln\left(\frac{A\sigma_{FP}}{d}\right)$

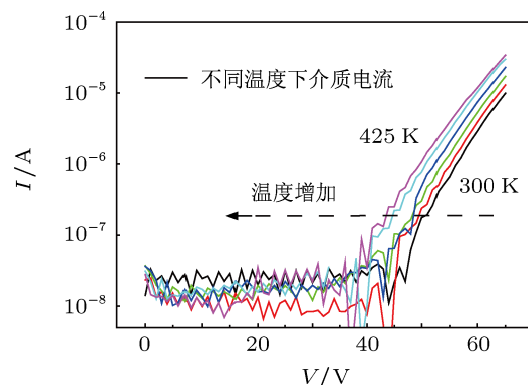


图 2 不同温度下 MIM 电容测试结构的泄漏电流

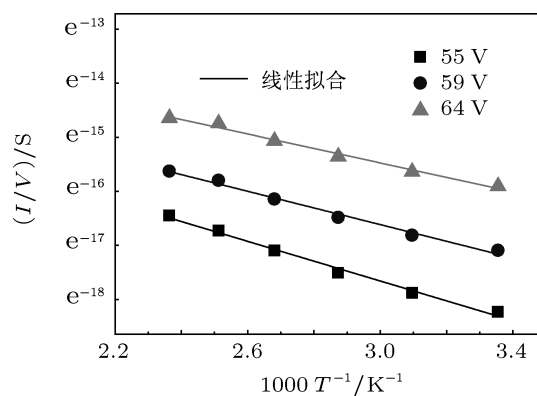


图 3 不同电压下介质电容的 $\ln(I/V)-1000/T$ 关系图

$-\frac{\phi_t}{kT}$, 很容易得到 $\beta = 3.4 \times 10^{-4} \text{ V}^{1/2}\text{cm}^{1/2}$. 图 3 为不同电压下介质电容关于 $\ln(I/V)$ 的 Arrhenius 对数图, 线性拟合斜率 $\text{slope} = (\beta\sqrt{E} - \phi_t)/k$, 其对应的加速电场分别为 4.6 MV/cm, 4.9 MV/cm, 5.2 MV/cm, 进而推导出 $\phi_{t1} = 0.89 \text{ eV}$, $\phi_{t2} = 0.89 \text{ eV}$, $\phi_{t3} = 0.90 \text{ eV}$. 由此可见, 缺陷能级与加速电场的大小无关.

3.3 临界击穿电荷密度

表 1 为电容在各加速电压下的平均失效前时间和平均电流变化量 (6 个样品的平均值). 在电容介质击穿时, 泄漏电流的增加量很小, 由此看出 MIM 电容的失效原因不是单纯的电流增大, 而是电流在时间上的积累达到了电容介质所能承受的最大电荷负载进而造成物理击穿, 这满足时间依赖介质击穿模型. 导致介质层击穿的电荷密度 Q_{bd} 可表示为 [12]

$$Q_{bd} = \int_0^{t_{bd}} J(t)dt, \quad (4)$$

其中, $J(t)$ 为通过测试样品的电流密度. Scarpulla 等人 [3] 研究的 SiN MIM 电容在常温下的击穿电荷密度 Q_{bd} 涵盖 0.1—150 C/cm² (介质厚度 200 nm, 面积 2560 μm²), 并认为最高值 150 C/cm² 为本征

表 1 电容在各加速电压下的平均电流变化和平均失效前时间

恒定应力电压/V	65	62	59	56	53
初始平均电流/μA	13	6.2	2.7	1.31	0.62
失效时平均电流/μA	22	7.1	4.1	1.64	0.77
MTTF/s	72	130	789	1545	2265

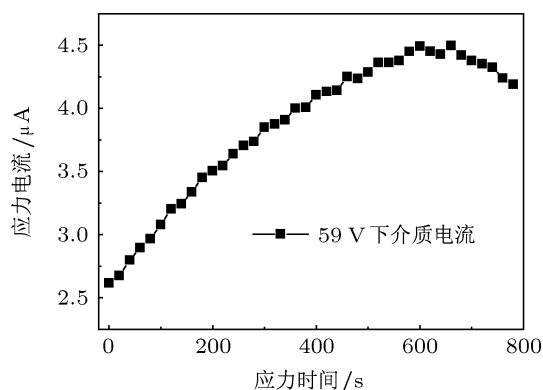


图 4 介质电容的泄漏电流随时间的变化情况

击穿电荷密度, 较小的 Q_{bd} 源于介质的非本征击穿, 主要是工艺中引入的杂质与缺陷的影响. 图 4 为加速电压为 59 V 时某个 MIM 电容的泄漏电流随时间的变化情况. 恒定应力下泄漏电流先逐渐增加, 到达一定程度后开始下降, 接着电容击穿. 该现象与 SiO₂ 介质电容在恒加速电压下的应力电流单调降低的退化特性不同 [10], 不能简单的归结为介质内逐渐增强的负电荷中心对电子注入的阻挡作用使隧穿有效面积降低. 这在下一部分深入讨论. 由图 4 可以估算得 MIM 电容样品的 Q_{bd} 大约为 30.2 C/cm², 远小于已报道的本征值. 有分析认为, 较大的电容面积也影响 Q_{bd} , 因为电容面积越大, 原始缺陷存在的概率越大, 同时在高场下介质产生新缺陷的概率越大, 从而降低了 Q_{bd} 值. 工艺过程中引入的杂质、局部的微粒、界面不平整等因素是导致 Q_{bd} 降低的关键因素, 也是优化电容制备工艺的重点.

3.4 介质电容退化机理

为了进一步研究 MIM 电容的泄漏电流在恒定应力下的退化机理, 实验对同类样品应力前后介质电容的导电特性进行了分析. 根据 (3) 式绘制关于 $\ln\left(\frac{I}{V}\right) - \sqrt{V}$ 的曲线 (图 5), 它描述了应力前和经过 3 min 加速应力后的 MIM 电容导电特性的变化情况. I_{fresh} 表示应力前介质电流, I_{stress} 表示应力后介质电流. 通过线性拟合可得初始斜率 $K_1 = 3.8$, 初始截距 $D_1 = -46.0$; 应力后斜率 $K_2 = 3.3$, 应力后截距 $D_2 = -41.5$. 数据表明应力后斜率减小, 截距增加. 另外, 通过 Arrhenius 模型可以得到应力后介质缺陷能级 $\phi_t = 0.95 \text{ eV}$, 比应力前能级加深. 结合 (3) 式分析, 我们可以得出介质电容在高场应力下 Frenkel-Poole 导电系数 σ_{FP} 增加, Frenkel-Poole 发射系数 β 减小的结论.

结合图 4 介质电流的退化情况来看, 我们认为应力下早期的电流增加是 Frenkel-Poole 导电系数增加引起的. 从 (3) 式分析, 应力下 β 减小, ϕ_t 增加, 其他参量为定值, 所以只能是 σ_{FP} 增加才能引起介质电流的增加. 应力后期介质电流逐渐下降的现象与 SiO₂ 介质退化时的现象相似, 但无论是等效隧穿面积降低理论 [10] 或者负电荷缺陷中心诱发的反向附加电场理论都不能统一的解释这种退化现象,

因为应力电流降低的同时伴随着 β 的减小. 下面从四个方面阐述介质退化可能的机理. 第一, 等效隧穿面积的降低仅能使总导电电流降低, 它不能影响 Frenkel-Poole 曲线的斜率, 所以不能解释 β 的减小. 第二, 若考虑陷阱诱发的反向电场 E_t 的影响, Frenkel-Poole 电流密度可简单表述为

$$J_{\text{FP}} = \sigma_{\text{FP}} (V/d - E_t) \times \exp \left[\frac{-\left(\phi_t - \beta\sqrt{V/d - E_t}\right)}{kT} \right], \quad (5)$$

该模型可以解释缺陷诱发的反向电场增加而引起应力电流降低的现象, 但是从图 5 来看, 应力后的 Frenkel-Poole 曲线依然为线性且斜率降低, 则要求 E_t 是 V 的一次正系数函数; 另一方面, 应力后负电荷缺陷中心密度为定值, 理论上其产生的反向附加电场也应为定值, 则要求 E_t 与 V 无关. 所以该模型也不能很好的解释上述矛盾. 第三, 从发射系数的理论定义来看, β 的减小可认为是 SiN 介电常数的增加. Ryuzaki 等人 [13] 在研究薄 SiO₂ 介质击穿特性时认为 β 的减小可能是由于介质受潮导致介电常数增加. 但本实验前后经历仅几分钟, 且在密闭氮气空间中进行, 湿气对其的影响基本可以忽略. 第四, 综合考虑自由电子、施主型缺陷、受主型缺陷对介质电流的影响. Yeorgan 等人 [14] 曾提出 Frenkel-Poole 扩展模型, 该模型考虑了材料内电子水平变化的补偿效应. Frenkel-Poole 扩展模型可表示为

$$J_{\text{FP}} = q\mu \frac{N_c (N_d - N_a)}{2N_a} E \times \exp \left[\frac{-\left(\phi_t - \beta\sqrt{E}\right)}{\xi kT} \right], \quad (6)$$

其中, ξ 是补偿因子, 取决于费米能级的位置, N_c 是导带底等效态密度, N_d, N_a 分别是施主和受主的面密度, q 是电子电量, μ 是载流子迁移率. 当自由电子密度远小于施主和受主时, $\xi = 1$; 当受主面密度远小于自由电子和施主时, $\xi = 2$. 介于两极限之间时, ξ 介于 1 和 2. 对于本实验, SiN 介质在未施加高应力时, 材料内部的自由电子水平相比施主和受主缺陷来看比较低, 此时的介质导电机理可看作经典的 Frenkel-Poole 发射 ($\xi = 1$). 当高应力持续施加后, 介质内部产生新的施主型缺陷, 因此提供更多的自由电子, 这一点从应力早期介质电流的大幅

增加可以看出来. 施主型缺陷密度 N_d 增加, 在 (6) 式中也能得到介质电流增加的结论. 而 σ_{FP} 在 (6) 式中具体表现为 $q\mu [N_c (N_d - N_a)] / (2N_a)$, 这与上一段中分析认为 σ_{FP} 增加的结论也是符合的. 施主型缺陷和自由电子的增加使得受主型缺陷相对减少, 此时补偿因子 ξ 将从 1 向 2 变化, 这与实验结果 $\xi = 1.15$ 符合. 在应力后期介质电流开始下降, 从 (6) 式分析可能与迁移率和受主型缺陷的变化有关. 若受主缺陷在应力后期产生较多, 确实会造成介质电流下降, 但势必会使 ξ 减小, 这一现象需要实时测量高应力下的 MIM 电容的导电特性才能下结论. 而作者认为电子迁移率减小的解释似乎更合理. 介质中缺陷密度的增大使得载流子的散射增大, 散射势必引起载流子迁移率的下降, 进而使得介质泄漏电流的下降. 所以 Frenkel-Poole 扩展模型对研究 SiN 介质 MIM 电容的退化机理有重要作用.

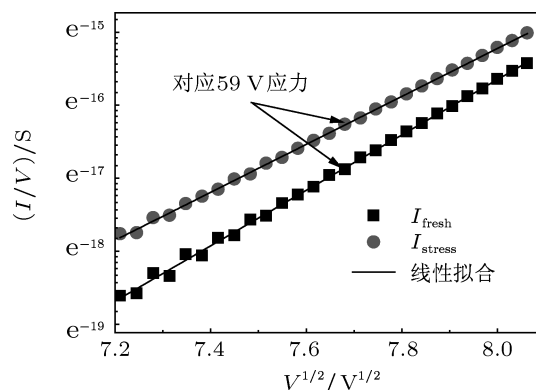


图5 介质电容应力前后 Frenkel-Poole 曲线的变化

3.5 平均失效前时间

实验对五组器件进行恒定应力加速老化, 相关数据见表 1. 采用线性电场模型外推平均失效前时间 MTTF, 该模型可以表达为 [15]

$$\text{MTTF} \propto \exp [-\gamma(E)], \quad (7)$$

其中, MTTF 为平均失效前时间, γ 为线性电场加速因子, E 为加速电场. 图 6 为 SiN 介质 MIM 电容 ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) 的加速寿命曲线, 其在 20 V 工作电压下的 MTTF 分别为 7.7×10^7 s, γ 为 37.5 nm/V. 该结果与国际水平有一定差距, 可能有几方面原因: 1) 目前 SiN 介质淀积工艺条件是应用于器件钝化层等结构的制备, 是否适用于高可靠的 MIM 电容的制备值得研究; 2) 实验选用的样品电容面积较大,

增加了缺陷产生的概率,降低了器件的可靠性;3) 电容上下金属电极的粗糙度在制备过程中没有重点考虑,而这一因素影响 MIM 电容的有效介质厚度,影响器件的可靠性.

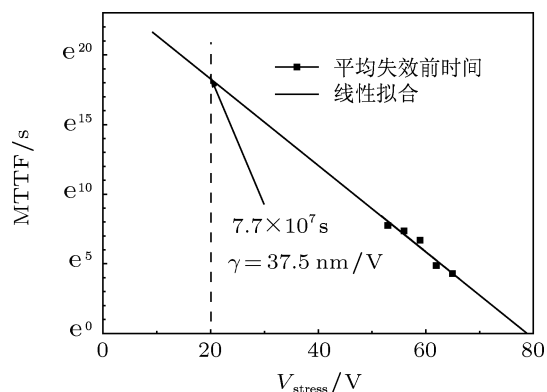


图6 SiN 介质 MIM 电容的加速寿命曲线

4 结论

本文对 GaN MMIC 中 SiN 介质 MIM 电容的可靠性进行了评估,确定了电容的两种失效模式.

通过研究不同温度下介质电容的导电特性求解了介质内的缺陷能级. 介质电容的临界击穿电荷密度较小,说明介质内缺陷主要是工艺过程中引入的杂质. 文章重点分析了介质电容在高场下的退化机理,通过研究恒定应力下介质电容泄漏电流的变化特点和应力前后介质电容导电特性,认为高应力下介质内产生新的施主型缺陷,并占据主导地位,其缺陷能级逐渐向深能级转移;缺陷的持续增加加剧了介质内载流子的散射,导致应力后期泄漏电流降低. 最后用线性电场模型外推的器件寿命 MTTF 为 7.7×10^7 s, 加速因子 γ 为 37.5 nm/V. 对 SiN 介质 MIM 电容可靠性的评估及相关退化机理的研究为进一步优化介质质量指明了方向.

感谢中国科学院微电子研究所微波器件与集成电路实验室测试工程师欧阳思华和李颜奎对应力控制软件和高电压应力平台的制作和维护.

- [1] Dammann M, Cauml sar M, Konstanzer H, Waltreite P, Quay R, Bronner W, Kiefer R, Muuml ller S, Mikulla M, van der Wel P J, Rouml dle T, Bourgeois F, Riepe K 2010 *IEEE International Reliability Physics Symposium* Anaheim CA, USA, May 2–6, 2010 p129
- [2] Waltreite P, Bronner W, Quay R, Dammann M, Kiefer R, Muller S, Musser M, Kuhn J, van Raay F, Seelmann M, Mikulla M, Ambacher O, van Rijs F, Rodle T, Riepe K 2009 *Phys. Status Solidi A* **206** 1215
- [3] Scarpulla J, Eng D C, Olson S R, Wu C S 1999 *37th IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings*, San Diego CA, USA, March 23–25, 1999 p128
- [4] Cramer H C, Oliver J D, Porter R J 2006 *CS MANTECH Conference*, Vancouver, British Columbia, Canada, April 24–27, 2006 p91
- [5] Sefa D, Del Alamo J A, Gajewski D A, Allen H 2009 *CS MANTECH Conference*, Tampa Florida, USA, May 18–21, 2009
- [6] Slater R D 2010 *CS MANTECH Conference*, Portland Oregon, USA, May 17–20, 2010
- [7] Berman A 1981 *19th Annual Reliability Physics Proceedings*, Orlando FL, USA, April 7–9, 1981 p204
- [8] Hu H S, Zhang M, Lin L J 2000 *Acta Electron. Sinica* **28** 80 (in Chinese) [胡恒升, 张敏, 林立谨 2000 电子学报 **28** 80]
- [9] Lai S K 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 2540
- [10] Scott R S, Dumin N A, Hughes T W, Dumin D J, Moore B T 1995 *33rd IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings* Las Vegas NV, USA, April 4–6, 1995 p131
- [11] Scarpulla J, Ahlers E D, Eng D C, Leung D L, Olson S R, Chan-Shin W 1998 *GaAs Reliability Workshop Proceedings*, Atlanta GA, USA, November 1, 1998 p92
- [12] Huang Y, Niu L R, Lin L 2005 *Research & Progress of SSE* **25** 315 (in Chinese) [黄云, 钮利荣, 林丽 2005 固体电子学研究与进展 **25** 315]
- [13] Ryuzaki D, Ishida T, Furusawa T 2003 *J. Electrochem. Soc.* **150** F203
- [14] Yeagan J R, Taylor H L 1968 *J. Appl. Phys.* **39** 5600
- [15] Yeats B 1998 *IEEE Trans. Electron Dev.* **45** 939

Reliability of SiN-based MIM capacitors in GaN MMIC*

Wang Xin-Hua Wang Jian-Hui Pang Lei Chen Xiao-Juan Yuan Ting-Ting
Luo Wei-Jun Liu Xin-Yu[†]

(Key Laboratory of Microelectronics Device & Integrated Technology, Institute of microelectronics of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100029, China)

(Received 23 December 2011; revised manuscript received 24 February 2012)

Abstract

Reliability assessment of SiN MIM capacitors in GaN MMIC is performed by constant voltage stress test. Two kinds of failure modes, critical charge density at which the dielectric breaks down and mean time prior to failure are investigated. The trap energy level in SiN dielectric is obtained by temperature dependent current characteristics. The degradation mechanism of SiN MIM capacitor is analyzed. The research shows that new donor-like traps are generated at dominant position during the stress. And the trap energy level becomes deeper after stress. The increased trap accelerates the scattering of the carrier, which leads to the decrease of leakage current in the end. The investigation on the failure mechanism of SiN MIM capacitor provides a reference for reinforcing the dielectric capacitors.

Keywords: SiN, MIM capacitor, trap, MTTF

PACS: 73.40.Rw, 77.55.-g, 71.55.-i

* Project supported by the National Basic Research Program (973) of China (Grant No. 2010CB327500).

[†] E-mail: xyliu@ime.ac.cn