

氮化镓高电子迁移率晶体管的物理失效分析 技术研究进展

安蒙恩, 修慧欣

上海理工大学材料与化学学院, 上海

收稿日期: 2023年5月6日; 录用日期: 2023年6月9日; 发布日期: 2023年6月16日

摘要

氮化镓(GaN)基高电子迁移率晶体管(HEMTs)由于具有高截止频率、高工作电压和工作温度范围广泛等特点, 越来越多地应用于高频和高功率器件等电力电子领域。然而, 在实际应用中, 在高温高压等极端情况下, GaN HEMTs会出现退化甚至失效, 这使得失效后器件的物理分析对于提高可靠性和进一步的器件优化至关重要。本文介绍了分析器件失效机制的分析方法, 对失效后物理表征技术工作原理、表征范围及研究进展方面进行了简要综述, 为进一步提高器件可靠性和器件的进一步优化提供了参考。

关键词

氮化镓(GaN), 高电子迁移率晶体管(HEMT), 物理失效分析技术

Research Progress of Physical Failure Analysis Techniques for Gallium Nitride High Electron Mobility Transistors

Meng'en An, Huixin Xiu

School of Materials and Chemistry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 6th, 2023; accepted: Jun. 9th, 2023; published: Jun. 16th, 2023

Abstract

Gallium nitride (GaN)-based high electron mobility transistors (HEMTs) are increasingly used in power electronics fields such as high frequency and high power devices due to their high cut-off frequency, high operating voltage and wide operating temperature range. However, in practical

applications, GaN HEMTs will degrade or even fail under extreme conditions such as high temperature and high pressure, which makes the physical analysis of the failed devices crucial for improving reliability and further device optimization. In this paper, the analysis methods of device failure mechanism are introduced. The working principle, characterization range and research progress of post-failure physical characterization technology are briefly reviewed, which provides a reference for further improving device reliability and further optimization of devices.

Keywords

Gallium Nitride (GaN), High Electron Mobility Transistors (HEMT), Physical Failure Analysis Technology

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

GaN HEMT 器件由于具有高截止频率、高工作电压和工作温度范围广泛等特点, 在高功率、高频应用领域得到了广泛的应用[1] [2]。二维电子气体(2DEG)的高电荷密度和 GaN 的宽带隙(~3.4 eV)使得 GaN HEMT 器件呈现出低电阻和高功率密度的特性[3]。高饱和电子迁移率提高了 GaN 射频系统的开关频率, 减小器件尺寸的同时降低器件的功率损耗[4]。此外, 当使用碳化硅(SiC)衬底时, GaN 的低本征载流子浓度和 SiC 的高导热性提供了更高的工作温度, 能够保证 GaN HEMT 器件在极端环境条件下工作[5] [6]。

由于 GaN 材料具有优异的物理和化学性能, 使得 GaN HEMT 器件完美地满足现代无线通信和电力电子器件的要求, 从而加速了众多应用的增长, 例如电池充电器[4]、毫米波功率放大器[7]、低噪声放大器[5]、阈值开关器件[2]、功率转换器[8]、还有卫星通信[9]等。可是, GaN HEMT 器件虽然应用范围广泛, 但是还有很多可靠性的问题, 比如容易失效和退化, 制约着 GaN HEMT 器件的发展, 采用合理的失效分析技术能够为寻找器件失效原因和提高可靠性提供合理有效的方案[10]。

当 GaN HEMT 器件功率和高频器件运行出现失效时, 对于宏观失效类型, 例如击穿、漏电、阈值电压偏移等可以通过 I-V 曲线和 C-V 曲线进行常规电学性能测试, 对于微观失效类型, 如泄露路径[11] [12] [13], 内部缺陷[14] [15]、外延结构的失效[16] [17]、二维电子气 2DEG 的充放电[18]等局部偏差行为, 需要采用定位技术来精准识别。因此, 光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、电致发光显微镜(EL)、锁相锁定红外热成像(LIT)、阴极发光光谱(CL)、深能级瞬态光谱(DLTS)、聚焦离子束(FIB)、高分辨率透射电子显微镜(TEM)、能量色散光谱仪(EDS)是失效后微观分析失效的首选。

本文对光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、电致发光显微镜(EL)、锁相锁定红外热成像(LIT)、阴极发光光谱(CL)、深能级瞬态光谱(DLTS)、聚焦离子束(FIB)、高分辨率透射电子显微镜(TEM)、能量色散光谱仪(EDS)失效分析技术的工作原理、表征范围、研究进展进行了叙述, 能够了解 GaN HEMT 退化机制, 进一步提高可靠性提供参考。

2. GaN HEMT 器件物理失效分析技术

2.1. 光学显微镜(OM)

光学显微镜是一种观察 GaN HEMT 器件表面和外围形态的标准方法。它的工作原理是利用凸透镜的

放大成像原理, 将人眼不能分辨的微小物体放大到人眼能分辨的尺寸, 分辨率为 200 nm。光学显微镜通常用于观察 GaN HEMT 器件金属半导体界面的平坦性[19]。也可以在化学拆封后使用 OM 观察 GaN HEMT 器件失效后衬底的形貌和材料的表面粗糙度[20]。

2010 年 Gong 等人[19]研究了不同温度的快速退火对器件可靠性的影响。当温度超过 800℃以后, 通过使用 OM 发现 Ti/Al/Ni/Au 欧姆接触结构表面出现大量凸起, 金属表面粗糙度变大, 栅极和栅极会有短路的现象出现。通过对工艺过程观察发现金属 Al 在高温快速热退火过程中会熔化, 在金属层内扩散, 与其他金属形成 Al-Ni、Al-Au 合金, 随着温度降低聚合在一起, 造成了金属表面粗糙度的增大, 电流部分不均匀, 短路发生。

2015 年 Alexei 等人[20]研究了 300℃高温存储 10 h 后, 两种不同合金欧姆接触结构对 GaN HEMT 器件退化机制的影响。结果发现两种堆叠的接触电阻相似, 但 Ti/Al/Mo/Au 表现出更好的边缘敏锐度和表面形貌。同时研究了蓝宝石和 SiC 衬底上生长的 AlGaIn/GaN 欧姆接触的结构特性。与蓝宝石上的 AlGaIn/GaN 接触点相比, SiC 上的 AlGaIn/GaN 欧姆接触点显示出更高的接触电阻值。如图 1 所示在光学显微镜下用背面照明对合金界面进行了研究, 在表面观察到与螺纹位错有关的合金夹杂物并且蓝宝石衬底具有更多的缺陷和杂质。

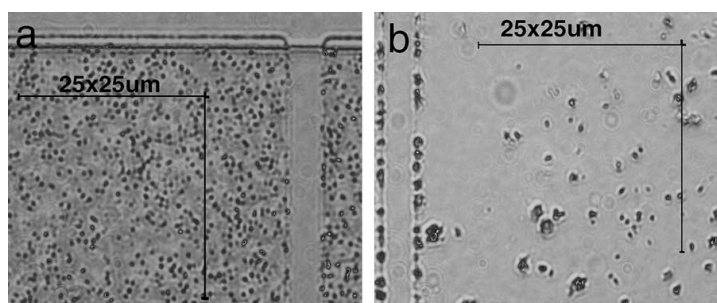


Figure 1. Optical images of AlGaIn surface for structure on sapphire (a) and SiC (b) substrates [20]

图 1. 蓝宝石(a)和 SiC (b)衬底上结构的 AlGaIn 表面的 OM 图像[20]

2.2. 扫描电子显微镜(SEM)

扫描电镜是在 GaN HEMT 器件上进行各种高分辨率表面研究的一种基本工具。SEM 的工作原理是利用一束初级电子束进行扫描样品表面, 在样品表面形成二级电子、背散射电子等信号, 信号由探测器收集, 由闪烁器转化为光学号, 经过光倍增管和放大器将光信号转换为电信号, 显示出与初级离子束相同的扫描图像。当 SEM 对 GaN HEMT 器件进行扫描时, 二级电子携带着表面性质的信息, 如表面形态和电势[20], 背散射电子则用于区分材料和密度。扫描失效部位产生的模拟信号被相应的探测器接收并转换成电信号, 电信号被放大并转换为图像信号, 提供 GaN HEMT 器件失效的详细信息, 如栅漏极裂纹、栅极损坏区域和栅极肖特基接触的表面形貌[21]。在掺杂组分不同的 GaN HEMT 器件中, SEM 也能够用于观察 pn 结的形状、掺杂区域。

2017 年 Shanker [22]等人研究了电效应和热效应对 GaN HEMT 器件雪崩不稳定性和安全操作区域(SOA)边界的影响。在 10 ns 脉冲应力下对器件进行了黑暗和紫外的退化分析, 发现陷阱的产生和载流子的捕获导致电场向漏极边缘偏移并达到峰值, 通过 SEM 揭示了存在和不存在载流子捕获的不同失效模式。如图 2 所示在黑暗条件下, G/S 区出现失效图 2(a), 肖特基接触失效图 2(b), 而在紫外线照射下, G/D 区出现失效图 2(c)。其主要原因是紫外照射下, 栅极和漏极边缘形成热点, 在漏极附近产生热应力, 导致

开裂。

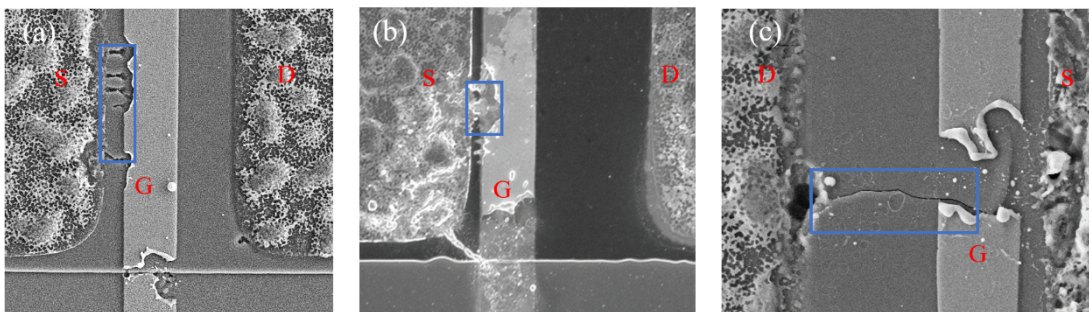


Figure 2. (a) SEM images of failure under 10 ns pulse stress and dark conditions, (b) SEM images of Schottky failure under 10 ns pulse stress and dark conditions, and (c) SEM images of failure under 10 ns pulse stress and ultraviolet conditions [22]

图 2. (a) 在 10 ns 脉冲应力, 黑暗条件下失效后的 SEM 图像, (b) 在 10 ns 脉冲应力, 黑暗条件下肖特基失效的 SEM 图像, (c) 在 10 ns 脉冲应力, 紫外条件下失效后的 SEM 图像[22]

2019 年, Vivek 等人[23]研究了在增强的电磁场中, 氮化镓基高电子迁移率晶体管(GaN-HEMT)高频功率放大器的失效机理。在磁场作用下漏极和栅极的金属电极在失效器件中熔化, 物理分析和仿真实证了工作电流密度和附近线圈磁场诱导的涡流的共同作用是潜在的失效机理。这两种电流在漏极金属和栅极金属的金属化中引起了显著的焦耳加热, 从而导致了它们的熔化和器件失效。如图 3 所示, 通过使用 SEM 在受损的漏极管和栅极区域可以看到明显的裂缝层。

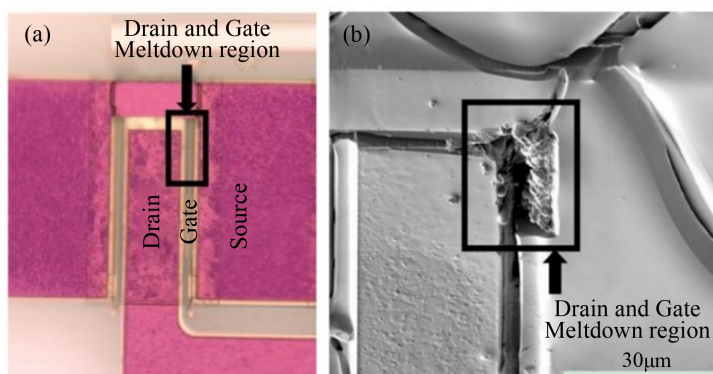


Figure 3. (a) SEM images of GaN HEMT gate and drain before melting (2000 times), (b) SEM images of GaN HEMT gate and drain after melting (3500 times) [23]

图 3. (a) GaN HEMT 栅极和漏极未熔化前 SEM 图(2000 倍), (b) GaN HEMT 栅极和漏极熔化后 SEM 图(3500 倍) [23]

2.3. 电致发光显微镜(EL)

EL 是 GaN HEMT 器件中发现和定位器件内部不同缺陷的有力工具, 如泄露电流、肖特基界面的退化、氮化镓缓冲层的分流等[24]。EL 的工作原理是在高场强作用下, 器件内部的热电子会加速运动, 激发电子空穴对, 激发的过程中碰撞发光中心, 导致电子发生能级跃迁、变化, 发出光亮。EL 发光强度可以用来表明 GaN HEMT 器件的热电子流分布, 确定泄露电流在强电场中的位置。当有电流泄漏、电场挤压、位错或破坏性缺陷时, 失效区会发射光子, 发射的光子被光电探测器如电荷耦合检测器(CCDs)或光

电倍增管收集转换成电信号, 最后形成器件的电致发光(EL)图像, 通过将 EL 图像叠加在反射图像上, 可以确定失效区域的位置[25]。在 GaN HEMT 失效后分析中, 根据探测系统和未封装器件, 可以检测器件在不同工作条件下的 EL 模式。因此, 可以通过 EL 图像中热点的强度、空间分布和光谱特征及其随时间的变化来分析破坏机理[26] [27]。

2013 年, Matteo 等人[26]研究非破坏性击穿状态下偏置的 GaN HEMTs 器件的击穿机制, 发现击穿源于两种不同的机制, 从击穿电流角度来看主要取决于栅极电压, 栅极电压接近阈值电压, 主要是电子从源极向漏极的空间电荷注入。当负栅极电压数值加大, 击穿电流来自于栅极电子的注入。通过 EL 测试了不同栅压情况下, 击穿电流的位置, 如图 4 所示当 HEMT 在可持续 $V_G = -6$ V 的击穿条件下偏置时, 沿栅极检测到显著的发光。

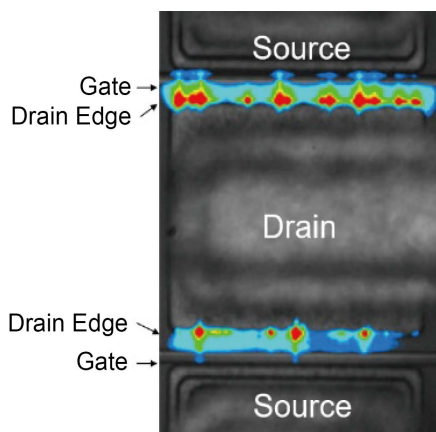


Figure 4. At $V_G = -6$ V, $I_D = 600$ μ A/mm Color luminescence mode measured on HEMT under A/mm breakdown conditions [26]

图 4. 在 $V_G = -6$ V, $I_D = 600$ μ A/mm 击穿条件下 HEMT 上测量的彩色发光模式[26]

2017 年, Dammann 等人[27]在开态直流测试中, 研究栅极金属化和栅极形状对 100 nm AlGaIn/GaN HEMTs 在 SiC 衬底上毫米波应用的可靠性和射频性能的影响。采用 EL 和透射电镜进行物理失效分析, 发现 NiPtAu T 型栅极器件的主要失效机理为栅极下方的凹坑和 Ni 空洞形成。如图 5(a)所示, 在 DC-应力(比较 LUT 值)后, 与漏电流降低相对应的关态 EL 强度明显降低。如图 5(b)和图 5(c)所示, 应力诱导的亚阈值电流增加局限在器件的中心部分。使用编号栅极 3 (图 5(c))的 TEM 片 1 (pos 1)研究了亚阈值增加的物理来源。外部编号栅极 1 (图 5(d))在初始和应力后具有最低的开态 EL 强度。

2017 年, Rossetto 等人[28]研究了软开关和硬开关条件对 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管动态电阻的影响, 发现在 $V_{DS} = 600$ V 的软开关条件下, 器件的动态导通电阻 R_{ON} 没有增加, 硬开关条件会导致动态电阻 R_{ON} 显著增加。通过研究动态导通 R_{ON} 增加对温度的依赖性, 以及动态导通 R_{ON} 变化与 EL 强度增加之间的相关性, 发现热电子效应对硬开关下的动态性能起主要作用。如图 6 所示器件对应于在运行 60 秒内测量到的平均 EL 信号, 同时设备从关态状态反复切换到开状态。在软开关(DGD = 0.4 μ s)中, 观察到一个小的热点, 表明存在导致栅漏的局部泄漏路径。当向硬开关方向移动时(即向负 DGD 值移动), 信号强度增加, 发射模式变得几乎均匀, 说明这种模式与热电子发光是一致的: 电子从源均匀地注入, 并在高电场的作用下向漏极加速。

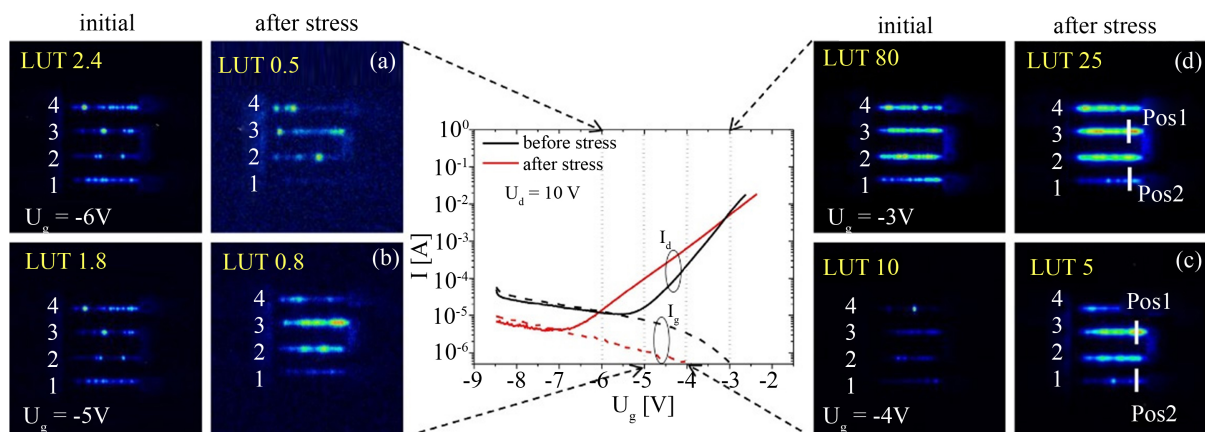


Figure 5. Electroluminescence images before and after open state DC stress. EL images were captured at $U_g = -6$ V (a: off state), $U_g = -5$ V, $U_g = -4$ V (b, c: subthreshold), and $U_g = -3$ V (d: on state) [27]

图 5. 开态 DC 应力前后的电致发光图像。EL 图像在 $U_g = -6$ V (a: 关态)、 $U_g = -5$ V、 $U_g = -4$ V (b, c: 亚阈值)和 $U_g = -3$ V (d: 开态)下拍摄[27]

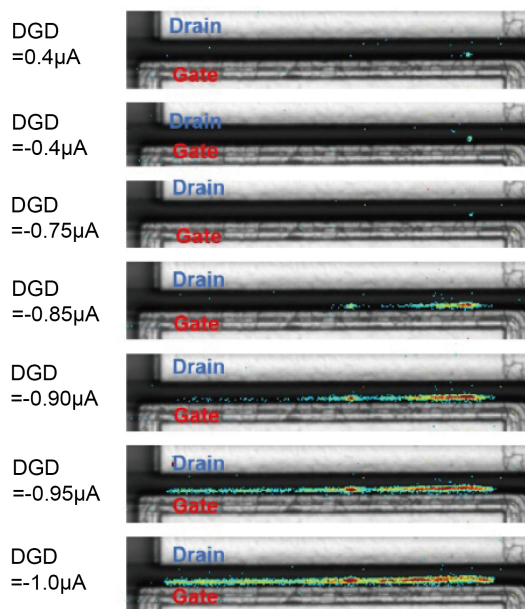


Figure 6. EL signal detected during DGD pulse measurement from 0.4 to $-1 \mu\text{s}$ [28]

图 6. DGD 从 0.4 到 $-1 \mu\text{s}$ 脉冲测量过程中检测到的 EL 信号 [28]

2.4. 锁相锁定红外热成像(LIT)

LIT 是在 GaN HEMT 器件中用于观察内部缺陷位置和局部热量的有力工具[29] [30]。LIT 以脉冲式电信号的形式对被测器件应用定期热激发, 然后使用热成像摄像机监测温度变化。高灵敏度红外摄像机(光谱范围 $3\sim 5 \mu\text{m}$)能够捕捉器件表面产生的热响应, 锁定过程可以记录热响应的幅值和相位信号, 再通过对多个周期进行微积分可以获得非常高的信号噪音比。这种信号能够使 LIT 具有高空间分辨率(高达 $1.5 \mu\text{m}$)和高热灵敏度(几 μK), 满足观察缺陷位置的要求[31]。当泄露路径或者缺陷部位局部电阻率增加时, PEM 不能直接显示出局部电阻率在增加, 而高分辨率的 LIT 可以测量电流流动产生的局部热量, 显示电阻率

的增加。由于红外能够穿透 GaN HEMT 器件及其异质结构, 所以 GaN HEMT 器件也可以从器件后面进行研究, 获得直接的光学通道区域。这种方法一是能够避免通道上方的金属触点中发生的散热, 二是可以使从正面看到平滑的 LIT 图像[32]。

2020 年, Maset 等人[31]研究观察两种不同商用 GaN HEMT 结构在常规条件下测试电路的雪崩击穿退化行为, 测试结果表明, GaN HEMT 不存在雪崩能力, 当漏极电压持续增加时, 会导致器件发生击穿。同时使用曲线/示踪分析仪、LIT 和聚焦离子束对击穿机制进行了分析, 证明了高压冲击电离是导致两种结构击穿的主要失效机制。如图 7 所示通过锁定热成像获得的两个器件(左: p-GaN 和右: MISHEMT)的退化区域。

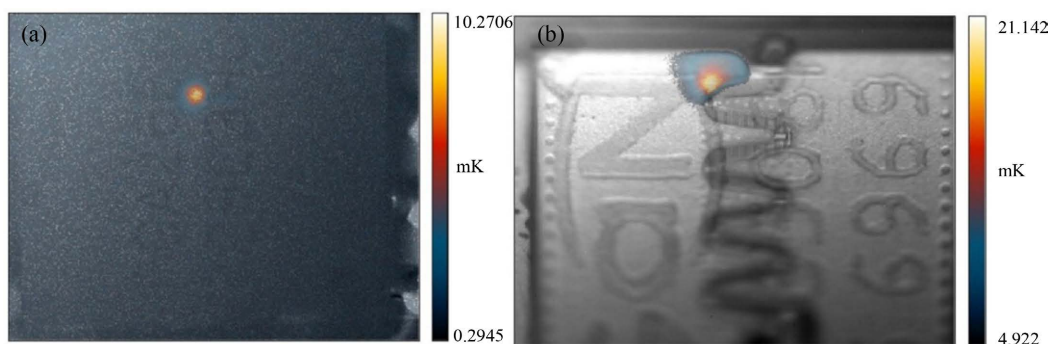


Figure 7. LIT plot obtained by applying source drain voltage (a) p-GaN structure $V_{DS} = 1.58$ V plot; (b) MISHEMT structure $V_{DS} = 11.23$ V [31]

图 7. 施加源漏电压获得的 LIT。(a) p-GaN 结构 $V_{DS} = 1.58$ V; (b) MISHEMT 结构 $V_{DS} = 11.23$ V [31]

2021 年, Miquel 等人[32]在真实工作条件(电和热)下探究单片微波集成电路(MMIC)一部分的氮化镓(GaN)高电子迁移率晶体管(HEMT)的热阻提取方法。通过使用 LIT, 热源调频所提供的热场约束, 可以推断出每个器件的功耗, 从而可以实现单个热阻的提取, 得到 MMIC 中集成的每个 HEMT 的局部热阻的合理值(即 $57.8 \pm 3.4^\circ\text{C}/\text{W}$ 和 $24.8 \pm 1.4^\circ\text{C}/\text{W}$)。如图 8 所示, LIT 通过测量电流流动产生的局部热量, 可以清楚地区分 GaN HEMT 器件在不同集成电路间的温度分布。

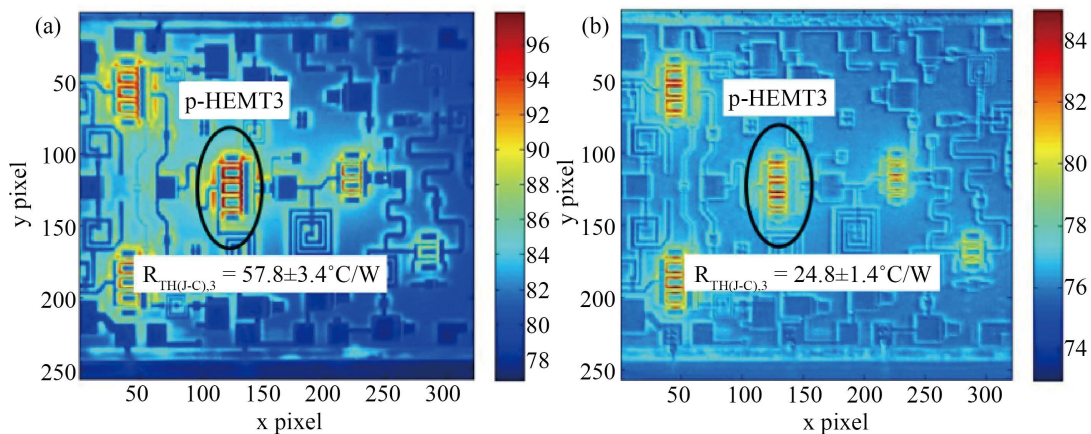


Figure 8. Real temperature maps of two integrated circuits represented in $^\circ\text{C}$, highlighting their maximum values $R_{TH(j-c), i}$ values [32]

图 8. 以 $^\circ\text{C}$ 表示的两个集成电路的真实温度图, 突出显示它们的最大值 $R_{TH(j-c), i}$ 值[32]

2.5. 阴极荧光(CL)

CL 是 GaN HEMT 器件中用于识别缺陷类型和分布的有力工具, 如结构缺陷定位和局部电子结构的变化[33]。CL 的工作原理是当电子束轰击到材料时, 会导致器件缺陷位置的电子发生电子跃迁, 从而辐射出红外、可见光等信号。CL 结合扫描电镜对器件进行观察时, 纳米尺寸的电子束探针可以在 GaN HEMT 器件中诱导局部光电发射, 光子发射可以对电子束诱导的电子空穴通过重新结合, 结合产生的信号能够确定结构缺陷的位置和类型, 发射光子的能量取决于局部能带结构和载流子的扩散, 根据能量的变化可以确定用于研究能带结构和亚纳米级别缺陷的分布[34]。

2018 年, Monachon 等人[35]对氮化镓高电子迁移率晶体管衬底堆栈结构进行的示例来评估定量在加速微电子发展和失效分析(FA)方面的潜力, 使用 Attolight AllalinTM 工具, 在 7 kV 加速电压下进行, 高分辨率地图在 5 kV 加速电压下进行测试, 显示了阴极发光光谱(CL)具有缺陷识别、堆栈层识别等功能。如图 9(a)所示在相同条件下分别制备了具有不同层的样品, 用于原位高分辨 x 射线衍射(HR-XRD)测量, 以确定每一层的应变和成分。图 9(b)显示整个堆栈的图谱, 每个不同的峰值使用不同的颜色高亮显示, 如 AlGa_N 中 Al 成分不同显示出不同的颜色, 最特别是在 C-GaN 层能看到明显的缺陷。

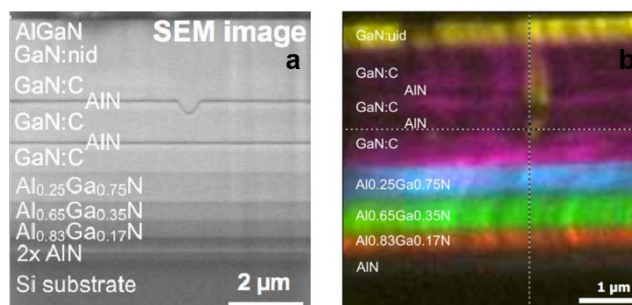


Figure 9. (a) shows the scanning electron microscopy details of the AlGa_N layer stack on a silicon substrate. (b) A hyperspectral image of CL 128 × 128 pixels, with different colors representing different AlGa_N compositions [35]

图 9. (a) 为硅衬底上 AlGa_N 层堆栈的扫描电镜细节。(b) 为 CL 128 × 128 像素的高光谱图, 用不同的颜色表示不同的 AlGa_N 组成[35]

2022 年 Anshu 等人[36]通过使用阴极发光(CL)光谱作为加速电压的函数, 研究了 AlGa_N/GaN HEMT 结构中不同外延层的辐射缺陷。当电子束加速电压低于 1 kv 时, CL 谱获得 GaN 帽层和 AlGa_N 势垒层缺陷的信息, 具有高质量 GaN 帽层的样品在 CL 光谱中表现出表面量子阱跃迁, 发射峰强度与 AlGa_N 势垒层中的缺陷有关, 峰强度越高, 势垒层中的缺陷越多; 当电子束加速电压大于 2 kv 时, CL 谱可以获得缓冲层的缺陷信息。

2.6. 深能级瞬态光谱(DLTS)

DLTS 是 GaN HEMT 器件中用于检测禁带缺陷、缺陷能级的重要工具[37]。DLTS 的实质是反向偏置 pn 结的高频电容热扫描, 工作原理是对器件的 pn 结进行反向偏置, 周期性的进行脉冲, 耗尽区的厚度会产生变化, 电容相应的也随着变化, 通过对脉冲后瞬态电容的变化, 可以计算出器件缺陷参数。DLTS 在 GaN HEMT 失效器件中可以测量每个陷阱的活化能、浓度分布和载流子俘获截面外, 还可以显示出陷阱的位置和浓度[37]。也可以在 GaN HEMT 失效器件中测量多子陷阱、少子陷阱[38] [39]。

2022 年, Chen 等人[39]使用各种 DLTS 方法研究了肖特基型 p-GaN HEMTs 中 p-GaN 层中的少数载

流子(电子)陷阱。如表 1 所示通过温度扫描 ODLTS 发现了三个电子陷阱 E1、E2 和 E3, 以及活化能、俘获截面和陷阱浓度。研究了三种电子陷阱的载流子捕获动力学, 在 300 K 时, E2 和 E3 的发射时间常数分别为 0.21 和 1.40 s, 它们相邻存在于带隙中, 活化能均超过 0.6 eV, 表明所有电子陷阱都位于 p-GaN 层内部, 而不是与表面相关, 从而证明了 p-GaN 层中少数载流子陷阱特性是 p-GaN 栅极 HEMT 的动态退化的原因。

Table 1. Properties of electron traps extracted from temperature scanned DLTS [39]

表 1. 从温度扫描 DLTS 中提取电子陷阱的性质[39]

陷阱编号	E_C-E_T (eV)	俘获面积(cm^2)	$N_T \times 10^{15}$ (cm^{-3})
E1	0.29 ± 0.03	2.94×10^{-17}	1.08
E2	0.69 ± 0.04	5.61×10^{-14}	1.65
E3	0.77 ± 0.03	2.57×10^{-13}	1.73

2.7. 聚焦离子束(FIB)

FIB 是目前用于结构探究、电路调整和物理失效分析的基本工具。在器件上进行纳米级别的切割, 能够达到内部结构和界面的小缺陷[40]。在 FIB 系统中, 离子源产生稳定的离子束, 通过聚焦和扫描模块控制离子束光斑的大小和强度, 样品台改变切割的位置[41]。在 GaN HEMT 失效器件中可以通过与 GaN 器件结构相关的 EL 和 LIT 图像的有限分辨率导航到达大概的缺陷位置, 运用提前制备 FIB 诱导的标记, 并通过 EL 和 LIT 成像, 从 GaN HEMT 器件结构定位到具体的缺陷位置[28] [31]。通常情况下使用 FIB 解剖和 SEM、TEM 结合分析失效器件, 获得 AlGaIn/GaN 界面、栅极损耗情况和位错路径等关键信息[42]。

2014 年, Simon 等人[42]针对高电子迁移率晶体管(HEMT)结构的 TEM 研究, 提出了一种基于聚焦离子束(FIB)的先进样品制备技术。通过使用 FIB 将背面制备法和 SEM 厚度端点检测两种方法结合起来制备非常薄且均匀的 TEM 样品, 用于寻找 GaN HEMT 器件的原子分辨率表征点蚀失效模式和精确测量亚纳米分辨率的 AlN 间隔层厚度。如图 10(a)所示, 金属栅极边缘的 AlGaIn 屏障(厚度 35 nm)上的点蚀缺陷的原子分辨率 TEM 图像, 图 10(b)为 GaN 和 AlGaIn 势垒之间的 AlN 间隔层的原子分辨率 TEM 图像。

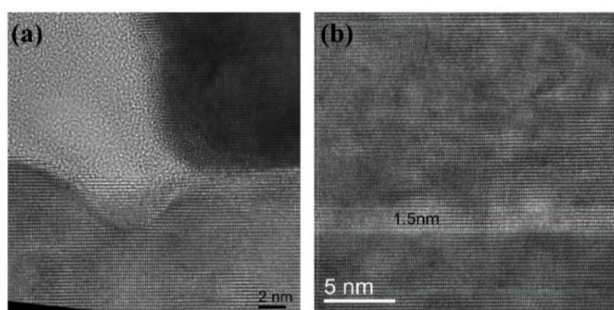


Figure 10. TEM images of pitting corrosion phenomenon (a) and AlN layer; (b) in GaN HEMT devices using FIB new preparation method [42]

图 10. 使用 FIB 新型制备方法 GaN HEMT 器件中点蚀现象 (a)和 AlN 层(b)的 TEM 图[42]

2022 年, Chen 等人[43]对 GaN HEMT 器件栅极引脚的缺失、部分栅极引脚和栅极帽层的缺失、栅极结构的完全缺失和场板的缺失等异常栅极结构进行了分类, 并通过直流测试、FIB 和 SEM 结合分析了

被破坏的栅极器件的异常表现, 判断失效器件中是否存在栅极结构缺失。如图 11 所示, 栅极引脚的部分缺失和未缺失的 FIB 与 SEM 结合的照片, 从图中看出正常形态器件栅极下有介质, 且与外延层无接触, 其主要原因是光刻板脏点导致栅极引脚处光刻不全, 从而导致栅极引脚缺失。

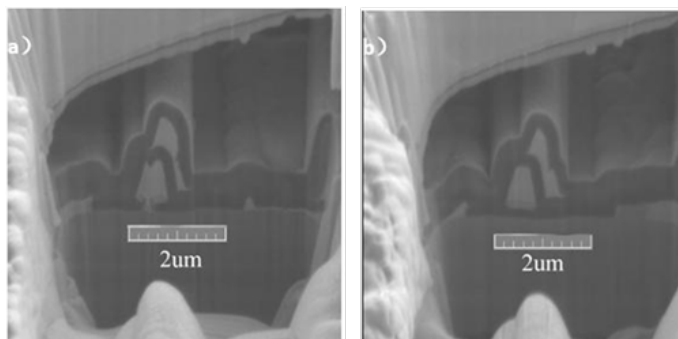


Figure 11. Gate foot missing morphology. (a) Normal morphology; (b) failure morphology [43]

图 11. 栅极引脚缺失形态。(a) 正常形态; (b) 失效形态[43]

2.8. 高分辨率透射电子显微镜(TEM)

TEM 是在 GaN HEMT 器件上进行更高分辨率表面研究的一种基本工具[44]。它的工作原理是对电子束进行加速和聚集, 投射到厚度非常小的样品上, 电子与样品的原子发生碰撞, 电子从各种角度散射, 由散射角的大小确定样品的大小和厚度, 形成不同的暗像。通过 FIB 切割 GaN HEMT 样品(厚度~10 nm)进行 TEM 放大图像, 能够在原子尺度上观察欧姆和肖特基接触。TEM 能提供电子衍射图, 用于晶体样品的分析, 衍射对比可以对 GaN HEMT 器件中的晶体缺陷进行分类, 结合能量色散 x 射线能谱(EDXS)或者电子能量损失能谱(EELS)可以测定异质界面的材料组成和相[45]。也可以详细地观察和研究 GaN 晶体管结构的寿命退化机制, 如“点蚀”[46]、栅极界面腐蚀[27] [47]、沿位错或界面形成的短路径[48]、位错和空穴等[49]。

2018 年, Hu 等人[48]研究了不同强度 SHI 辐照后 AlGaIn/GaN HEMT 器件的电学性能退化和结构损伤, 当强度为 1540-MeV Bi 离子在 1.7×10^{11} ions/cm² 的辐照下, 饱和电流大幅度降低, 阈值电压正向漂移了约 85%。分析表明, SHI 辐照引起的缺陷和失调是器件退化的原因, 导致 2DEG 载流子迁移率和片状载流子密度下降。如图 12(a)所示, 离子轨道穿透整个栅极区和异质结区。图 12(a)中标记的轨道的高分辨率图像如图 12(b)和图 12(c)所示。穿透 GaN HEMT 整个外延层的轨迹如图 12(d)和图 12(e)所示。

2019 年 Zahabul 等人[49]研究了离子辐照对高电子迁移率的 AlGaIn/GaN 电子晶体管的影响。用 1.5 MeV Au⁺离子对 GaN HEMT 器件进行离地法向表面辐照, 辐照过后通过 TEM 观察到器件层产生大量的空位、间隙和位错等缺陷。证明了击穿电压是由于这些缺陷在器件层中充当电荷陷阱, 由此积累了大量电荷而被降低。如图 13(a)显示了缓冲层的击穿和在漏极通道处产生的位错。图 13(b)和图 13(c)分别为缓冲层位错的亮场和高分辨率 TEM 图像。图 13(d)~(f)显示了用于绘制样品中原子应变的 GPA 技术。

2.9. 能量色散光谱仪(EDS)

EDS 是在 GaN HEMT 器件上进行成分分析的基本工具。EDS 的工作原理是当入射电子束对样品的内层电子进行轰击, 轰击后电子发生轨道跃迁, 原先轨道的空位会被外轨道电子填充, 填充剩余的能量就是 x 射线, 由于每个元素都有自己的 x 射线, 将它们展开成能谱, 就可以根据能量值的大小确定元素

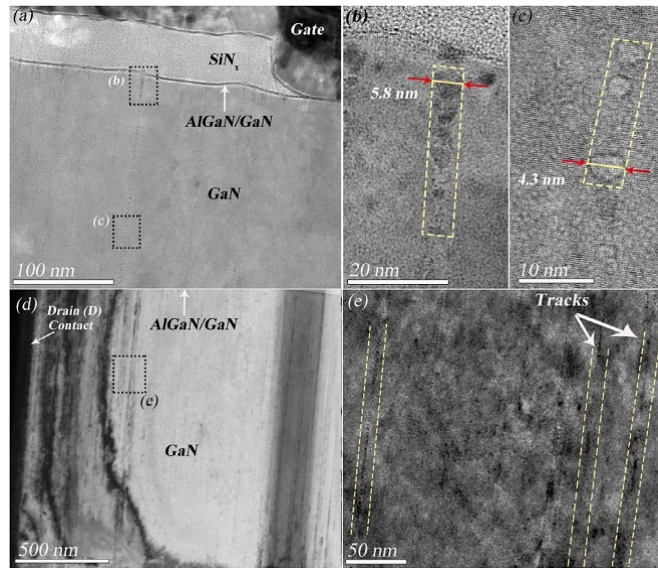


Figure 12. 1540-MeV 209Bi ion irradiation 1.7×10^{11} ions/cm² TEM images of AlGaIn/GaN HEMT devices: (a) Gate region cross-section; (b) The orbital image of the heterojunction region shown in Figure (a); (c) The image shown in Figure (a) has a depth of approximately 500 nm; (d) Traces formed at the drain; (e) As shown in Figure (d), the trajectory appears at a depth of approximately 500 nm [48]

图 12. 1540-MeV 209Bi 离子辐照 1.7×10^{11} ions/cm² 的 AlGaIn/GaN HEMT 器件的 TEM 图像: (a) 栅极区域截面; (b) 图(a)所示异质结区域轨道图像; (c) 图(a)所示深度约 500 nm 图像; (d) 在漏极形成的痕迹; (e) 如图 (d)所示, 轨迹出现在深度约 500 nm 处[48]

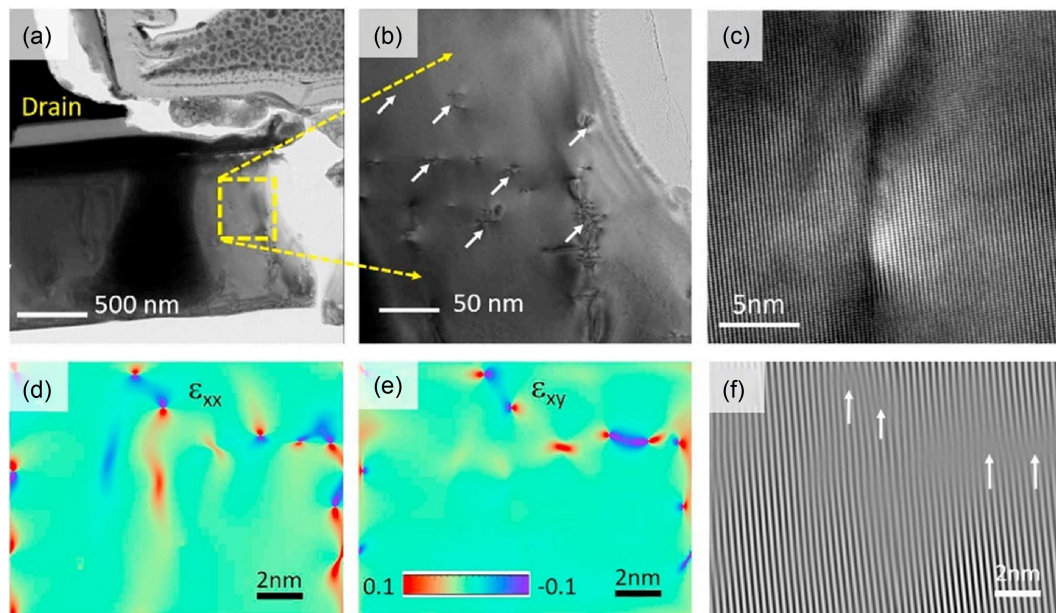


Figure 13. (a) TEM bright field image at the drain side of drain-gate region, (b) Dislocations in the GaN layer, and (c) High resolution TEM (HRTEM) image of screw dislocations in GaN layer, (d, e) normal and shear strain field associated with dislocations and (f) Simulated lattice fringes with the dislocations [49]

图 13. (a) 漏栅区漏端 TEM 明场像, (b) GaN 层中的位错, 以及(c) GaN 中的螺旋位错的高分辨率 TEM 图像。(d, e)与位错相关的法向应变场和剪切应变场, 以及(f)与位错的模拟晶格条纹[49]

的种类, 根据能谱的强度就可以分析元素的含量。因此利用 EDS 可以实现对 GaN HEMT 器件失效区域成分的定性和定量分析[50]。TEM 和 EDS 的结合通常用于研究 GaN HEMT 器件失效区域的内部结构, 如 2DEG 通道[51]、栅极金属接触层[47] [52]、缓冲层[53] [54] [55]等。

2016 年 Farid [53]等人研究了基于硅衬底的 AlGaIn/GaN HEMT 射频功率放大器在雷达工作条件下的失效机理。在老化测试中, 器件在 250°C 的热调节烤箱中老化 200 小时, 然后再在 300°C 的烤箱中老化 200 小时。老化实验表明栅极金属触点对温度非常敏感, 栅极区域老化过程的不可逆部分主要由热应力引起。如图 14 所示金属区表面出现强烈而密集的裂纹, 使用 EDS 证实了在 Ni 层和 AlGaIn 层之间存在 Au 夹杂物。

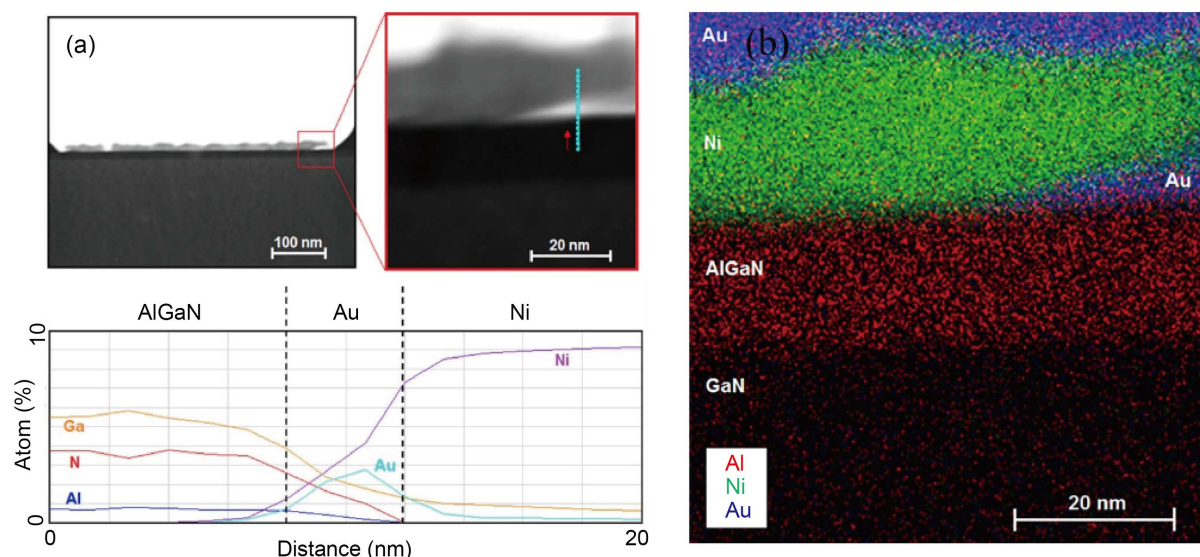


Figure 14. (a) Energy spectrum measurement of Schottky contacts of aged components (passing through the blue line) (b) EDS diagram of Schottky contacts of aged components (at the gate edge and drain side) [53]

图 14. (a) 老化部件的肖特基触点的能谱测量(穿过蓝线);(b) 老化部件的肖特基接触的 EDS 图(在栅极边缘和漏极侧) [53]

2018 年, Islam 等人[47]通过器件微观结构的实时可视化来探究 GaN HEMTs 实际的击穿机制。通过亮场、衍射(TEM)和能量色散光谱技术(EDS), 再使用顺变电磁法, 进行表征各种元素的晶格缺陷和扩散, 监测晶体管失效期间的微观结构质量, 从而证明了缺陷和界面是漏极和源极端导致击穿机制的关键因素。栅极和漏极区域的能量色散(EDS)光谱如图 15 所示。图 15(a)~15(d)清楚显示栅极区域镓和氮通过栅极扩散。图 15(e)~15(h)氮扩散现象未出现在漏极区域。图 15(i)和图 15(j)分别显示了栅极和漏极区域的成分变化。

当 GaN HEMT 器件功率和射频器件运行出现失效时, 对于不同微观失效类型的分析可以采用不同的物理失效分析技术。OM、SEM 和 TEM 都可以对失效器件形貌进行观察, 但是由于分辨率的不同, 对于失效类型的表征也呈现出不同, 例如对于位错的位置的定位和分析, SEM 能进行定位区域, 进一步的对位错进行分析只能使用更高分辨的 TEM。EL、LIT、CL 都可以对器件进行失效器件进行缺陷定位, 但是由于工作原理的不同, 除了能够进行缺陷定位还具有不同的表征范围。FIB 和 EDS 对于失效器件通常结合 SEM 和 TEM 进行观察, 进行不同的失效类型分析。如表 2 所示, 对本文几种物理失效技术的表征范围和失效类型进行了总结。

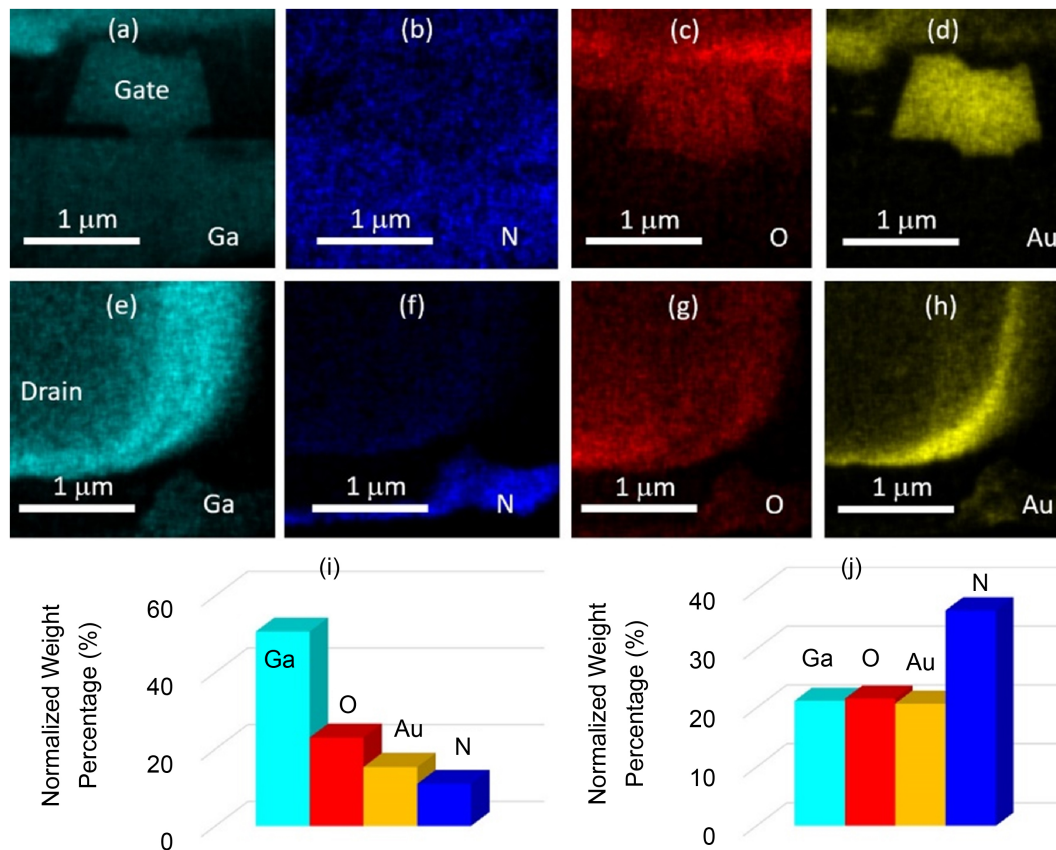


Figure 15. Energy dispersion spectra of failed GaN HEMT samples in the (a)~(d) gate and (e)~(h) drain regions. (i) and (j) the proportion of elements in the gate and drain regions [47]
图 15. 失效 GaN HEMT 试样在(a)~(d)栅极和(e)~(h)漏极区域的能量色散谱。(i)和(j)栅极区和漏极区各元素占比[47]

Table 2. Summary of physical failure analysis techniques for GaN HEMT devices
表 2. GaN HEMT 器件物理失效分析技术总结

失效分析技术	表征范围	失效类型
OM	表面形貌和界面平坦性	欧姆接触点失效[19] [20]
SEM	表面形态、电势和材料密度	栅漏极裂纹、损坏[22] [23]
TEM	高分辨率表面形貌、晶体分析	栅极界面腐蚀、位错空穴[48] [49]
EL	定位泄露路径和失效位置	缓冲层分流、界面退化[25] [26] [27] [28]
LIT	定位缺陷位置、检测局部热量	泄露电流、电阻率增大[31] [32]
CL	识别陷阱类型、定位缺陷分布	外延层杂质、电子结构变化[35]
DLTS	检测缺陷能级和陷阱浓度	少数载流子陷阱变化[39]
FIB	结构和失效界面探究	栅极引脚缺失、点蚀[42] [43]
EDS	成分定性和定量分析	栅漏极击穿、腐蚀[53] [54]

3. 结论

近年来, 由于半导体技术的飞速发展, GaN HEMT 器件在高功率高频等领域所占地位越来越重, 但

是由于技术和理论限制, 此类器件的可靠性一直受到约束, 可靠性和失效机制分析技术对器件失效原因分析有着重要的作用。GaN HEMT 器件失效部位表面形貌、欧姆接触、肖特基接触的观察采用 OM 和 SEM, GaN HEMT 器件电流泄露路径, 内部结构缺陷、陷阱浓度可以采用 LIT、CL、EL、DLTS 进行定位和测量, 而对于 GaN HEMT 器件的外延结构、2DEG 通道、元素分析可以采用 TEM 和 EDS 结合进行高分辨观察。通过物理失效技术分析是期待 GaN HEMT 器件在未来生产中做出优化和改进, 器件的可靠性能够有更加有效的解决方案。

参考文献

- [1] Faraji, R., Farzanehfard, H., Kampitsis, G., Mattavelli, M., Matioli, E. and Esteki, M. (2020) Fully Soft-Switched High Step-Up Nonisolated Three-Port DC-DC Converter Using GaN HEMTs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **67**, 8371-8380. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2944068>
- [2] Huang, X., Fang, R., Yang, C., Fu, K., Fu, H., Chen, H., Yang, T.-H., Zhou, J., Montes, J., Kozicki, M., Barnaby, H., Zhang, B. and Zhao, Y. (2019) Steep-Slope Field-Effect Transistors with AlGaIn/GaN HEMT and Oxide-Based Threshold Switching Device. *Nanotechnology*, **30**, Article ID: 215201. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab0484>
- [3] Zeng, C., Xu, W., Xia, Y., Pan, D., Wang, Y., Wang, Q., Zhu, Y., Ren, F., Zhou, D., Ye, J., Chen, D., Zhang, R., Zheng, Y. and Lu, H. (2019) Investigations of the Gate Instability Characteristics in Schottky/Ohmic Type p-GaN Gate Normally-Off AlGaIn/GaN HEMTs. *Applied Physics Express*, **12**, Article ID: 121005. <https://doi.org/10.7567/1882-0786/ab52cc>
- [4] Zhong, M., Niu, Y.X., Cheng, H.Y., Yan, C.X., Liu, Z.Y. and Song, D.B. (2020) Advances for Enhanced GaN-Based HEMT Devices with p-GaN Gate. *Materials Science Forum*, **1014**, 75-85. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1014.75>
- [5] Gaska, R., Gaevski, M., Jain, R., Deng, J., Islam, M., Simin, G. and Shur, M. (2015) Novel AlInN/GaN Integrated Circuits Operating up to 500°C. *Solid-State Electronics*, **113**, 22-27. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2015.05.007>
- [6] Panda, D.K., Amarnath, G. and Lenka, T.R. (2018) Small-Signal Model Parameter Extraction of E-Mode N-Polar GaN MOS-HEMT Using Optimization Algorithms and Its Comparison. *Journal of Semiconductors*, **39**, Article ID: 074001. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/39/7/074001>
- [7] Mi, M.H., Ma, X.H., Yang, L., Lu, Y., Hou, B., Zhang, M., Zhang, H.S., Wu, S. and Hao, Y. (2019) Record Combination $f_{\max} \cdot V_{\text{br}}$ of 25 THz·V in AlGaIn/GaN HEMT with Plasma Treatment. *AIP Advances*, **9**, Article ID: 045212. <https://doi.org/10.1063/1.5090528>
- [8] Taylor, A., Lu, J.C., Zhu, Y.L., Bai, K., McAmmond, M. and Brown, A. (2018) Comparison of SiC MOSFET-Based and GaN HEMT-Based High-Efficiency High-Power-Density 7.2 kW EV battery chargers. *IET Power Electronics*, **11**, 1849-1857. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0467>
- [9] Zhai, W., Zhang, J., Chen, X., Bu, R., Wang, H. and Hou, X. (2017) FEM Thermal and Stress Analysis of Bonded GaN-on-Diamond Substrate. *AIP Advances*, **7**, Article ID: 095105. <https://doi.org/10.1063/1.4995005>
- [10] Cai, X., Du, C., Sun, Z., Ye, R., Liu, H., Zhang, Y., Duan, X. and Lu, H. (2021) Recent Progress of Physical Failure Analysis of GaN HEMTs. *Journal of Semiconductors*, **42**, Article ID: 051801. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/42/5/051801>
- [11] Xu, N., Hao, R., Chen, F., Zhang, X., Zhang, H., Zhang, P., Ding, X., Song, L., Yu, G., Cheng, K., Cai, Y. and Zhang, B. (2018) Gate Leakage Mechanisms in Normally off p-GaN/AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors. *Applied Physics Letters*, **113**, Article ID: 152104. <https://doi.org/10.1063/1.5041343>
- [12] Turuvekere, S., Karumuri, N., Rahman, A.A., Bhattacharya, A., DasGupta, A. and DasGupta, N. (2013) Gate Leakage Mechanisms in AlGaIn/GaN and AlInN/GaN HEMTs: Comparison and Modeling. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **60**, 3157-3165. <https://doi.org/10.1109/TED.2013.2272700>
- [13] Besendörfer, S., Meissner, E. and Friedrich, J. (2022) Statistical Investigation of Dislocation Induced Leakage Current Paths in AlGaIn/GaN HEMT Structures on Si and the Impact of Growth Conditions. *Applied Physics Express*, **15**, Article ID: 095502. <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ac8639>
- [14] Wang, X., Chen, W., Sun, R., Liu, C., Xia, Y., Xin, Y., Xu, X., Wang, F., Chen, X., Chen, Y. and Zhang, B. (2022) Degradation Behavior and Mechanism of GaN HEMTs With P-Type Gate in the Third Quadrant under Repetitive Surge Current Stress. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **69**, 5733-5741. <https://doi.org/10.1109/TED.2022.3200928>
- [15] Ruzzarin, M., Meneghini, M., Barbato, A., Padovan, V., Haerberlen, O., Silvestri, M., Detzel, T., Meneghesso, G. and Zanoni, E. (2018) Degradation Mechanisms of GaN HEMTs with P-Type Gate Under Forward Gate Bias Overstress.

- IEEE Transactions on Electron Devices*, **65**, 2778-2783. <https://doi.org/10.1109/TED.2018.2836460>
- [16] Del Alamo, J.A. and Lee, E.S. (2019) Stability and Reliability of Lateral GaN Power Field-Effect Transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **66**, 4578-4590. <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2931718>
- [17] Tallarico, A.N., Stoffels, S., Posthuma, N., Bakeroot, B., Decoutere, S., Sangiorgi, E. and Fiegna, C. (2019) Gate Reliability of p-GaN HEMT with Gate Metal Retraction. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **66**, 4829-4835. <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2938598>
- [18] Shankar, B., Raghavan, S. and Shrivastava, M. (2020) Distinct Failure Modes of AlGaIn/GaN HEMTs under ESD Conditions. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **67**, 1567-1574. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.2974508>
- [19] Gong, R., Wang, J., Liu, S., Dong, Z., Yu, M., Wen, C.P., Cai, Y. and Zhang, B. (2010) Analysis of Surface Roughness in Ti/Al/Ni/Au Ohmic Contact to AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors. *Applied Physics Letters*, **97**, Article ID: 062115. <https://doi.org/10.1063/1.3479928>
- [20] Vertiatchikh, A., Kaminsky, E., Teetsov, J. and Robinson, K. (2015) Structural Properties of Alloyed Ti/Al/Ti/Au and Ti/Al/Mo/Au Ohmic Contacts to AlGaIn/GaN. *Solid-State Electronics*, **50**, 1425-1429. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2006.07.003>
- [21] Luo, T. and Khurshed, A. (2008) Elemental Identification Using Transmitted and Backscattered Electrons in an SEM. *Physics Procedia*, **1**, 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2008.07.091>
- [22] Shankar, B., Soni, A., Singh, M., Soman, R., Chandrasekar, H., Mohan, N., Mohta, N., Ramesh, N., Prabhu, S., Kulkarni, A., Nath, D., Muralidharan, R., Bhat, K.N., Raghavan, S., Bhat, N. and Shrivastava, M. (2017) Trap Assisted Avalanche Instability and Safe Operating Area Concerns in AlGaIn/GaN HEMTs. *Proceedings of 2017 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, Monterey, 2-6 April 2017, WB-5.1-WB-5.5. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2017.7936414>
- [23] Moldovan, G., Lotharukpong, S. and Wilshaw, P. (2014) Automated Defect Analysis in Solar Cells Using ERIC. ISTFA 2014. 40th International Symposium for Testing and Failure Analysis. *Proceedings of the ISTFA 2014 40th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, Houston, 9-13 November 2014, 156-159. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.istfa2014p0156>
- [24] Sangwan, V., Tan, C.M., Kapoor, D. and Chiu, H.-C. (2020) Electromagnetic Induced Failure in GaN-HEMT High-Frequency Power Amplifier. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **67**, 5708-5716. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2931233>
- [25] Graff, A., Simon-Najasek, M., Poppitz, D. and Altmann F. (2018) Physical Failure Analysis Methods for Wide Band Gap Semiconductor Devices. *Proceedings of 2018 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, Burlingame, 11-15 March 2018, 292-297. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2018.8353557>
- [26] Meneghini, M., Zanandrea, A., Rampazzo, F., Stocco, A., Bertin, M., Cibir, G., Pogany, D., Zanoni, E. and Meneghesso, G. (2013) Electrical and Electroluminescence Characteristics of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors Operated in Sustainable Breakdown Conditions. *Japanese Journal of Applied Physics*, **52**, Article ID: 08JN17. <https://doi.org/10.7567/JJAP.52.08JN17>
- [27] Dammann, M., Baeumler, M., Polyakov, V., Brückner, P., Konstanzer, H., Quay, R., Mikulla, M., Graff, A. and Simon-Najasek, M. (2017) Reliability of 100 nm AlGaIn/GaN HEMTs for mm-Wave Applications. *Microelectronics Reliability*, **76-77**, 292-297. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.07.008>
- [28] Rossetto, I., Meneghini, M., Tajalli, A., Dalcanale, S., De Santi, C., Moens, P., Banerjee, A., Zanoni, E. and Meneghesso, G. (2017) Evidence of Hot-Electron Effects during Hard Switching of AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **64**, 3734-3739. <https://doi.org/10.1109/TED.2017.2728785>
- [29] Zhen, R.T.N., Venkatarayalu, D., Zhongqiang, I., Atmosukarto, A.B., Premkumar, K.K., Thinn, T., Tict, E. and Ming, X. (2021) Localization of Hotspots from Lock-In Thermography Images for Failure Analysis. *Proceedings of 2021 IEEE 23rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, Singapore, 7-9 December 2021, 45-49.
- [30] Schmidt, C., Wadhwa, K., Reverdy, A. and Reinders, E. (2013) Localization of Electrical Active Defects Caused by Reliability-Related Failure Mechanism by the Application of Lock-in Thermography. *Proceedings of 2013 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, Anaheim, 14-18 April 2013, 5B.4.1-5B.4.6. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2013.6532027>
- [31] Martínez, P.J., Letz, S., Maset, E. and Zhao, D. (2020) Failure Analysis of Normally-Off GaN HEMTs under Avalanche Conditions. *Semiconductor Science and Technology*, **35**, Article ID: 035007. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab6bad>
- [32] Vellvehi, M., Perpina, X., Leon, J., Avino-Salvado, O., Ferrer, C. and Jorda, X. (2021) Local Thermal Resistance Extraction in Monolithic Microwave Integrated Circuits. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **68**, 12840-12849. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3040684>
- [33] Monachon, C., Zielinski, M.S., Gachet, D., Sonderegger, S., Muckenhirn, S., Berney, J., Poppitz, D., Graff, A., Breuer,

- S., Kirste, L. and Asm, I.N.T. (2017) Failure Analysis and Defect Inspection of Electronic Devices by High Resolution Cathodoluminescence. *Proceedings of 43rd International Symposium for Testing and Failure Analysis*, Pasadena, 5-9 November 2017, 349-352. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.istfa2017p0349>
- [34] 杜成林, 蔡小龙, 孙梓轩, 刘海军, 张煜, 段向阳, 陆海. GaN HEMT 可靠性光学测试技术研究进展[J]. 半导体技术, 2020, 45(9): 657-668.
- [35] Monachon, C., Zielinski, M.S., Berney, J., Poppitz, D., Graff, A., Breuer, S. and Kirste, L. (2018) Cathodoluminescence Spectroscopy for Failure Analysis and Process Development of GaN-Based Microelectronic Devices. *Proceedings of 2018 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, Burlingame, 11-15 March 2018, 6B.2-1-6B.2-5. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2018.8353623>
- [36] Goyal, A., Yadav, B.S., Raman, R., Kumar, A., Dalal, S., Tyagi, R., Kumar, V. and Kapoor, A.K. (2021) Non Destructive Evaluation of AlGaIn/GaN HEMT Structure by Cathodoluminescence Spectroscopy. *Journal of Luminescence*, **232**, Article ID: 117834. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2018.8353623>
- [37] Pan, S.J., Feng, S.W., Li, X., Bai, K., Lu, X.Z., Zhang, Y.M., Zhou, L.X., Rui, E.M., Jiao, Q. and Tian, Y. (2022) Characterization of Traps in GaN-Based HEMTs by Drain Voltage Transient and Capacitance Deep-Level Transient Spectroscopy. *Semiconductor Science and Technology*, **37**, Article ID: 095017. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ac84fc>
- [38] 常雪婷. GaN 基 HEMT 器件缺陷表征研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [39] Chen, J., Huang, W., Qu, H., Zhang, Y., Zhou, J., Chen, B. and Zou, X. (2022) Study of Minority Carrier Traps in p-GaN Gate HEMT by Optical Deep Level Transient Spectroscopy. *Applied Physics Letters*, **120**, Article ID: 212105. <https://doi.org/10.1063/5.0083362>
- [40] 韩丹. 三维阵列及 V 形坑提升 GaN 基 LED 光电性能的研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [41] Wang, D.D., Huang, Y.M., Tan, P.K., Feng, H., Low, G.R., Yap, H.H., He, R., Tan, H., Dawood, M.K., Zhao, Y.Z., Lam, J. and Mai, Z.H. (2015) Two Planar Polishing Methods by Using FIB Technique: Toward Ultimate Top-Down Delayering for Failure Analysis. *AIP Advances*, **5**, Article ID: 127101. <https://doi.org/10.1063/1.4936941>
- [42] Chen, J.T., Bergsten, J., Lu, J., Janzen, E., Thorsell, M., Hultman, L., Rorsman, N. and Kordina, O. (2018) A GaN-SiC Hybrid Material for High-Frequency and Power Electronics. *Applied Physics Letters*, **113**, Article ID: 041605. <https://doi.org/10.1063/1.5042049>
- [43] Chen, Z., Shao, G., Chen, T., Ren, B., Zhang, C. and Sun, J. (2022) Study on Abnormal Gate Structures of GaN HEMT Devices. *Proceedings of 2022 IEEE 5th International Conference on Electronics Technology (ICET)*, Chengdu, 13-16 May 2022, 96-99. <https://doi.org/10.1109/ICET55676.2022.9825070>
- [44] Simon-Najasek, M., Huebner, S., Altmann, F. and Graff, A. (2014) Advanced FIB Sample Preparation Techniques for High Resolution TEM Investigations of HEMT Structures. *Microelectronics Reliability*, **54**, 1785-1789. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.07.101>
- [45] Gkanatsiou, A., Lioutas, C.B., Frangis, N., Polychroniadis, E.K., Prystawko, P., Leszczynski, M., Altantzis, T. and Van Tendeloo, G. (2019) Influence of 4H-SiC Substrate Miscut on the Epitaxy and Microstructure of AlGaIn/GaN Heterostructures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **91**, 159-166. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.11.008>
- [46] Marcon, D., Meneghesso, G., Wu, T.-L., Stoffels, S., Meneghini, M., Zanoni, E. and Decoutere, S. (2013) Reliability Analysis of Permanent Degradations on AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **60**, 3132-3141. <https://doi.org/10.1109/TED.2013.2273216>
- [47] Islam, Z., Haque, A. and Glavin, N. (2018) Real-Time Visualization of GaN/AlGaIn High Electron Mobility Transistor Failure at Off-State. *Applied Physics Letters*, **113**, Article ID: 183102. <https://doi.org/10.1109/TED.2013.2273216>
- [48] Hu, P.P., Liu, J., Zhang, S.X., Maaz, K., Zeng, J., Zhai, P.F., Xu, L.J., Cao, Y.R., Duan, J.L., Li, Z.Z., Sun, Y.M. and Ma, H.X. (2018) Degradation in AlGaIn/GaN HEMTs Irradiated with Swift Heavy Ions: Role of Latent Tracks. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **430**, 59-63. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.06.011>
- [49] Islam, Z., Paoletta, A.L., Monterrosa, A.M., Schuler, J.D., Rupert, T.J., Hattar, K., Glavin, N. and Haque, A. (2019) Heavy Ion Irradiation Effects on GaN/AlGaIn High Electron Mobility Transistor Failure at Off-State. *Microelectronics Reliability*, **102**, Article ID: 113493. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.113493>
- [50] Cho, S.J., Wang, C. and Kim, N.Y. (2013) Analysis and Optimisation of Ohmic Contact Resistance and Surface Morphology of a Ta-Based Diffusion Barrier Layer in AlGaIn/GaN HEMTs on Si (111) Substrates. *Solid-State Electronics*, **89**, 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2013.07.006>
- [51] Narang, K., Bag, R.K., Singh, V.K., Pandey, A., Saini, S.K., Khan, R., Arora, A., Padmavati, M.V.G., Tyagi, R. and Singh, R. (2020) Improvement in Surface Morphology and 2DEG Properties of AlGaIn/GaN HEMT. *Journal of Alloys and Compounds*, **815**, Article ID: 152283. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152283>
- [52] Whiting, P.G., Rudawski, N.G., Holzworth, M.R., Pearton, S.J., Jones, K.S., Liu, L., Kang, T.S. and Ren, F. (2017)

- Nanocrack Formation in AlGa_N/Ga_N High Electron Mobility Transistors Utilizing Ti/Al/Ni/Au Ohmic Contacts. *Microelectronics Reliability*, **70**, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.02.005>
- [53] Temcamani, F., Fonder, J.B., Latry, O. and Duperrier, C. (2016) Electrical and Physical Analysis of Thermal Degradations of AlGa_N/Ga_N HEMT under Radar-Type Operating Life. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **64**, 756-766. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2519342>
- [54] Tzeng, W., Jeng, Y., Chang, L.-C., Ho, Y.-T., Wu, C. and Hsu, C. (2019) Investigation on Different Buffer to Suppress the RF-loss in AlGa_N/Ga_N-on-Si HEMTs. *Proceedings of 2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*, Singapore, 25-28 November 2019, 1-3.
- [55] Borga, M., Meneghini, M., Benazzi, D., Canato, E., Pusche, R., Derluyn, J., Abid, I., Medjdoub, F., Meneghesso, G. and Zanoni, E. (2019) Buffer Breakdown in Ga_N-on-Si HEMTs: A Comprehensive Study Based on a Sequential Growth Experiment. *Microelectronics Reliability*, **100**, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.113461>