

GaN HEMT 栅极 TiN PVD 工艺异常与后道 H₂O₂ 腐蚀机理及器件电学特性影响分析报告

文档分类：工艺集成与技术评估报告 | 技术领域：GaN-on-Si HEMT 功率器件工艺

在氮化镓 (GaN) 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 功率器件的栅极 (Gate) 工艺 flow 中，GT TiN (栅极氮化钛) 通常作为肖特基金属栅、势垒层 (Barrier layer) 或欧姆接触的帽层，对调节栅极功函数、控制晶格应力及拦截漏电流具有决定性作用。本报告系统分析了当 GT TiN 的双重图形化 (DP) 或沉积方式采用 PVD 时，前道功率漂移与后道化学清洗液 (H₂O₂) 对薄膜特性及器件关态漏电流 (I_{goff}) 的微观与宏观影响机理。

一、PVD 磁控溅射工艺中：总 Power 不变，DC Current 偏大的物理机理及影响

在直流反应磁控溅射 (Reactive DC Magnetron Sputtering) 薄膜沉积工艺中，基本的功率平衡方程为：

$$P = V \times I$$

当 PVD 机台或反应腔室 (Chamber) 的总功率 (Power, P) 设定值保持恒定，而监控反馈的直流电流 (DC Current, I) 发生向上偏大异常时，由公式可知，直流电压 (DC Voltage, V) 必然发生向下等比例偏移。这种“低电压、大电流”的电学异常通常由腔室内部阻抗降低、气体离化率变大或靶材表面局域磁场增强引起，对 TiN 薄膜物理性质会带来一系列链式反应：

1. 溅射离子轰击动能减弱，薄膜致密性 (Density) 下降

直流电压 V 直接决定了被加速的 Ar⁺ 离子轰击 Ti 靶材表面的初始动能。当电压偏低时，高能反向散射的氩原子以及溅射出来的 Ti 原子携带的动能显著减小，到达晶圆表面 (Wafer Surface) 的迁移率 (Adatom Mobility) 受限。这导致薄膜无法有效致密化，柱状晶粒 (Columnar Grains) 之间的晶界变宽、孔隙率增加，薄膜密度明显低于正常 Window 下的沉积薄膜。

2. 应力状态 (Film Stress) 向拉应力偏移

正常高电压轰击下，较强的“离子轰击效应” (Ion Bombardment) 会将原子强制嵌入格点中，从而在膜内产生压应力 (Compressive Stress)。一旦电压降低，原子间的挤压效应减弱，薄膜的本征应力会大幅向拉应力 (Tensile Stress) 方向偏移，可能引发后续微裂纹或机械层面的晶格失配。

3. 化学计量比 (Stoichiometry) 不均匀与电阻率 (Rs) 升高

在大电流、多离子通量下，Ti 靶材表面的刻蚀率加速，但在反应溅射中，通入的 N₂ 气体可能来不及与过量的 Ti 原子进行充分且深度的饱和反应。因此，薄膜中局部可能富集未被完全氮化的非化学计量比 Ti 组分。此外，由于膜质疏松和晶界缺陷多，薄膜的方块电阻 (Rs) 和本征电阻率会发生显著上浮，并在暴露空气后极易吸附氧气发生自然氧化。

二、后道制程涉及到 H₂O₂ 时，对 TiN Damage 的化学影响

在后道的金属剥离 (Lift-off)、干法刻蚀后的残渣清洗 (Stripping) 或化学机械平坦化 (CMP) 工艺中，双氧水 (H₂O₂) 作为一种强氧化剂被广泛应用。TiN 薄膜在含有 H₂O₂ 介质中的化学稳定性极差，易发生严重的化学溶蚀 (Chemical Dissolution)。

1. H₂O₂ 对标准 TiN 膜层的腐蚀损伤机理

在水溶液中，H₂O₂ 会优先将 TiN 表面的难溶性低价钛迅速氧化为高价钛氧化物或氢氧化物 (如 TiO₂ 键能)，进而与溶液中的络合剂反应或在微酸/微碱环境下直接溶解，生成可溶性的钛过氧化物络合物：



这一过程会导致 TiN 发生显著的侧向刻蚀 (Undercut) 或垂直减薄。

2. 前道 PVD 异常薄膜的加剧效应：更易发生严重腐蚀 (Damage 敏感度骤增)

当受到前述“DC Current 偏大”导致的低致密性、大晶界孔隙率的异常 TiN 薄膜遭遇后道 H₂O₂ 工艺时：

- **渗透路径倍增：** 疏松的柱状晶界和微孔隙为 H₂O₂ 液体分子提供了极佳的毛细管渗透通道，使化学反应不再局限于表面，而是迅速向薄膜深层乃至界面蔓延。
- **反应活性变高：** 未完全氮化的不稳定 Ti 组分及表面缺陷具有更低的活化能，极易与氧化剂反应。
- **结论：** 此状态下的 TiN 薄膜极易受到 H₂O₂ 侵蚀，其横向刻蚀速率 (Etch Rate) 将远超常态，导致严重的物理结构损毁和界面化学损伤。

三、联动效应对栅极关态漏电流 I_{goff} 的影响评估

I_{goff} (Gate Off-state Leakage Current) 是评估 GaN 功率器件关态静态功耗及可靠性的核心指标。前道 PVD 异常 (大电流/低电压) 与后道 H₂O₂ 腐蚀的联合作用，对 I_{goff} 具有决定性的破坏性影响，会导致漏电流呈数量级式增大 (恶化)。其物理机制如下：

1. 陷阱辅助隧穿 (TAT) 与肖特基势垒降低

当 GT TiN 作为肖特基栅金属直接与 AlGaIn 势垒层 (或 p-GaN 接触层) 接触时，被 H₂O₂ 深入侵蚀的晶界会在接触界面形成大量的界面缺陷态 (Interface States)。在反向偏压 (关态) 下，这些缺陷充当了电子跳跃的“中继站”，激发强烈的陷阱辅助隧穿 (Trap-Assisted Tunneling, TAT) 或 Poole-Frenkel 发射。同时，残留氧化层 TiO_xN_y 的存在会造成栅极有效功函数 (Effective Work Function) 向下漂移，降低了肖特基势垒高度 (Barrier Height)，导致反向饱和漏电流急剧飙升。

2. 形貌退化 (Undercut) 导致的边缘电场集中效应

由于异常薄膜横向刻蚀速率过快，后道 H_2O_2 极易在栅极根部造成严重的侧向掏空 (Undercut) 形貌。这使得原本平整的金属栅边缘变得崎岖不平，在器件处于高压关态 (Drain 加高压, Gate 加负压/零压) 时，突出的金属尖角会产生强烈的电场集中 (Electric Field Crowding) 效应。局部高电场不仅大幅降低了击穿电压 (BV)，还会通过强场发射进一步诱发严重的栅极横向漏电。

工艺集成总结 (Summary of Process Integration)

核心异常源	薄膜微观特性	后道 H_2O_2 响应	器件电学表征 (I_{goff})
PVD 总功率不变 DC Current 偏大	离子能量弱，薄膜孔隙率高、应力倾向拉应力、化学计量比偏离。	Etch Rate 异常偏高 横向 Undercut 严重	漏电流剧烈增大 肖特基势垒崩溃 容易引发早期击穿
PVD 正常 Window (对比组)	高能轰击致密性好，晶界紧密，电阻率稳定。	界面严重退化	

四、工艺优化与拦截建议 (Engineering Recommendations)

- Chamber 阻抗状态排查：** 立即针对 PVD 腔室进行诊断。重点排查靶材生命周期末期 (Life time end) 的靶面几何形貌变化、磁铁组 (Magnetron) 位移或冷却水温漂，修复 Chamber 阻抗漂移。
- VI 闭环控制链优化：** 调整机台软件控制逻辑，从单纯的“功率控制 (Power Control)”向“电压/电流交互限制模式”优化，确保工艺 Window 的刚性。
- 后道湿法时间窗口 (Window) 缩减：** 若前道 Film 处于交货边缘，必须在后道含 H_2O_2 步骤中严格按比例缩减 Step Time，或评估引入缓蚀剂 (如有机胺类或唑类)，阻断沿晶界的纵向渗透腐蚀。