

AlGaIn/GaN HEMT 漂移区动态电阻分析

于国浩, 蔡勇, 王越, 赵德胜, 曾春红, 侯克玉, 董志华, 张宝顺
(中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 纳米器件与应用重点实验室,
江苏苏州 215123)

a) ghyu2009@sinano.ac.cn b) ycai2008@sinano.ac.cn

摘要:

AlGaIn/GaN HEMT 适合应用于高压大功率器件, 但在高电压动态使用时, 存在导通电阻增加的现象[1, 2]。目前可以有效降低动态导通电阻的方法有: 场板结构[3, 4]和 AlN 介质层[5]等。本论文采用叠层双栅结构 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 该器件在栅电极之上新增加了一个通过介质层 (Si_3N_4) 与栅电极相隔离并可以单独加信号控制的顶栅。在动态下工作时, 顶栅电极的脉冲输入信号与栅电极的脉冲输入信号同步。在器件关态时, 顶栅电极加 0V 偏置; 在器件开态时, 顶栅电极加正电压。顶栅在器件开态下所加正电压越大, 器件的动态导通电阻越小。

器件结构:

器件所选用的外延材料为 2 英寸蓝宝石衬底 MOCVD 外延的 AlGaIn/GaN 异质结, AlGaIn 厚度为 $2\text{ }\mu\text{m}$, $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 厚度为 30nm, 中间为 1nm 的 AlN 插入层。霍尔测试得: 2DEG 面密度为 $1.44\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$, 电子迁移率 $1080\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 方块电阻为 $400\text{ }\Omega/\square$ 。与普通的 AlGaIn/GaN HEMT 器件相比, 双栅 HEMT 器件, 具有一个覆盖于栅电极上方的顶栅电极, 顶栅电极和栅电极之间采用 165nm 厚度的 Si_3N_4 介质层相隔离, 顶栅将栅电极完全覆盖, 并且向源端延伸 $L_{\text{FP1}}=2\text{ }\mu\text{m}$, 向漏端延伸 $L_{\text{FP2}}=4\text{ }\mu\text{m}$, 如图 1 (a) 所示, 双栅器件的顶栅电极具有单独的引线 pad, 可以加独立信号控制, 如图 1 (b) 所示。双栅器件的栅宽 100 μm , 栅长 $L_g=2\text{ }\mu\text{m}$, 栅源间距 5 μm , 栅漏间距为 12 μm 。

器件性能:

双栅 HEMT 器件的直流特性, 如图 2 所示, 器件的阈值电压为 -3.5V, 峰值跨导为 7.5mS, 最大饱和漏电流为 $36\text{mA}@V_g = 1\text{V}$, 器件的导通电阻为 $110\text{ }\Omega$ 。动态特性测试: 漏端利用高压源表加 200V 的偏置, 设置电路负载电阻 R_d 为 20K Ω , 双栅电极采用同步双通道脉冲控制, 频率 0.24MHz, 占空比为 50%, 上升沿和下降沿时间为 0.1 μs 。栅电极导通态所加电压为 +1V, 关断态所加电压为 -5V。

定义双栅器件开态工作模式: 关断态时, 顶栅电极加 0V 电压; 开态时, 顶栅电极加正电压, 双栅 HEMT 器件在开态工作模式下的输入和输出特性曲线, 见图 3。取从关态到开态转换时, 器件输出电压下降到峰-峰值的 90% 所用时间为开态延迟时间, 取 11 μs 到 12 μs 的电压平均值所对应电阻为开态电阻。双栅 HEMT 器件顶栅作为源场板使用时, 即在开态工作模式下顶栅电极所加开态电压为 0V, 开态延迟时间为: 1.6 μs ; 导通态电阻为: 500 Ω 。双栅器件开态工作模式, 顶栅电极所加电压从 0V 变到 +30V 时, 器件的延迟时间和动态导通电阻分别从 1.6 μs 和 500 Ω 降低到 0.72 μs 和 415 Ω , 见表 1。

HEMT 器件动态工作, 关态时, 由于漂移区强电场强度的存在, 缺陷态会捕获负电荷; 开态时, 捕获的负电荷不能及时释放, 形成负电荷积累区, 耗尽相应沟道内的电子, 造成电流崩塌效应, 所以电流崩塌效应主要发生在漂移区。双栅 HEMT 器件, 关态时, 加 0V 电位的顶栅电极可以降低电场集中, 抑制缺陷态捕获负电荷; 开态时, 顶栅所加的正电压可以感生出一定量的 2DEG, 从一定程度上

补偿负电荷区造成的 2DEG 降低，从而降低电流崩塌效应，图 4 所示为双栅器件的电阻模型图。

$$R_{on_D} = 2 R_{contact} + R_s + R_{channel} + \Delta R_{d1} // R_{d1} + R_{d2} \quad (1)$$

$$\Delta R_{d1} = \frac{L_{TD}}{(V_{TG} - V_1) C_{TG} \mu W} \quad (2)$$

材料方块电阻为 $400 \Omega/\square$ ，静态下的漂移区电阻 R_d ($R_{\square} \times L_{gd}/W$) 为 48Ω ，总静态电阻为 115Ω ，所以 $2R_{contact} + R_s + R_{channel}$ 为 67Ω 。顶栅电容 C_{TG} 为 $4.5 \times 10^4 \text{ pF/cm}^2$ ，材料的电子迁移率为 $1080 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。 V_1 为串联电阻分压，计算得 0.45V 。

将以上参数带入式 (1) 和 (2) 可以得到 R_{d1} 、 R_{d2} 和 R_{on_D} 的关系，通过拟合可以求得 R_{d1} 和 R_{d2} ，如图 5 所示。 R_{d1} 为 80Ω ， R_{d2} 为 330Ω ，换算成方块电阻分别为 $2000 \Omega/\square$ 和 $4125 \Omega/\square$ 。可以看出漂移区靠近漏端一侧的电流崩塌比靠近栅端一侧更严重。图 6 所示为双栅器件的动态开启时的输出电流和电压关系，取值范围为 t_0 到 t_1 时刻。顶栅电极加 $+30\text{V}$ 电压时，器件的漏端电流远远高于顶栅加 0V 电压下器件的漏端电流。器件的开启漏端电流决定了器件的开启速度。而顶栅所加正电压感生的 2DEG 主要补偿漂移区栅端一侧的导通电阻，所以漂移区栅端一侧的导通电阻值对器件的开启时间影响较大。

结论:

采用双栅结构的 AlGaIn/GaN HEMT 器件的开态顶栅加正电压工作模式，顶栅电极加 $+30\text{V}$ 的电压比源场板器件具有更好的抑制电流崩塌的效果，器件的开启延迟时间和动态导通电阻分别降低了 55% 和 17% 。基于此种工作模式，我们设计了双栅 HEMT 器件的电阻模型，通过拟合的方式分析了栅漏电极之间动态电阻的分布情况，发现漂移区靠近漏端一侧的导通电阻对器件的导通电阻影响更大，漂移区靠近栅端一侧的导通电阻对器件的开启时间影响更大。

感谢中科院苏州纳米所纳米加工平台和测试分析平台的支持和帮助！

参考文献:

- [1] Binari S C, Ikossi K, Roussos J A , et al. Trapping effects and microwave power performance in AlGaIn/GaN HEMTs [J]. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48 (3) : 465-471.
- [2] Lee J S, Kim J W , Lee J H, et al. Reduction of current collapse in AlGaIn/GaN HFETs using AlN interfacial layer [J]. Electron Lett, 2003, 39 (9) :750-751.
- [3] Wu Y F, Saxler A ,Moore M , et al. $30\text{W}/\text{mm}$ GaN HEM Ts by field plate optimization [J]. IEEE Electron Device Lett, 2004, 25(3):117-119.
- [4] Rongming Chu, Andrea Corrión, Mary Chen, et al. 1200-V Normally Off GaN-on-Si Field-Effect Transistors With Low Dynamic ON-Resistance [J]. IEEE Electron Device Lett., 2008, 32(5): 824-826.
- [5] Sen Huang, Qimeng Jiang, Shu Yang, Chunhua Zhou, and Kevin J. Chen, Effective Passivation of AlGaIn/GaN HEMTs by ALD-Grown AlN Thin Film [J], IEEE Electron Device Lett., 2012, 33: 516-518.

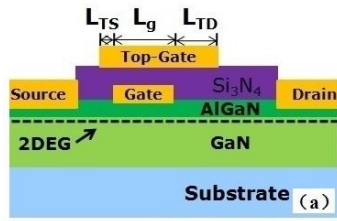


图 1 (a) 双栅 AlGaIn/GaN HEMT (DG-HEMT) 剖视图

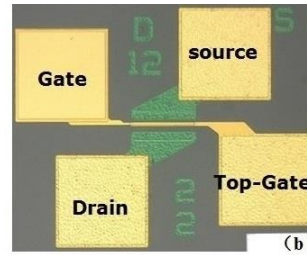


图 1 (b) 双栅器件的显微镜图片

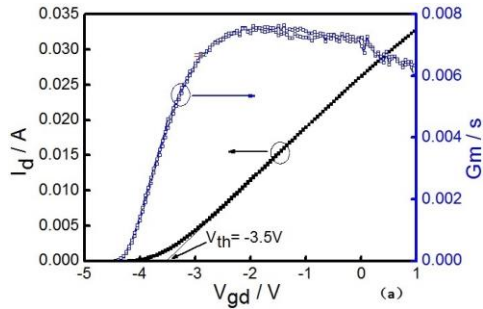


图 2 (a) 器件的转移特性

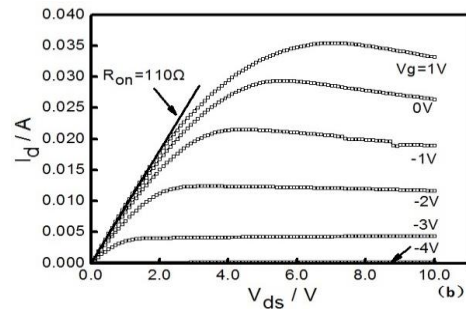


图 2 (b) 器件的输出特性

表. 1 τ_{fd} 和 $R_{on,D}$ 与开态下顶栅电压的关系

$V_{TG_on_state} (V)$	$\tau_{fd} (\mu s)$	$R_{on,D} (\Omega)$
0	1.60	500
10	0.94	460
20	0.78	430
30	0.72	415

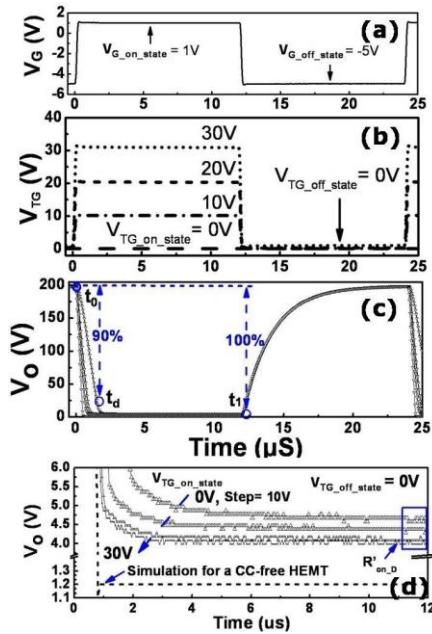


图 3 器件的动态输入、输出特性

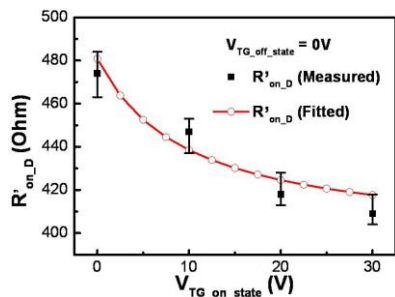


图 5 测试和模拟的导通电阻

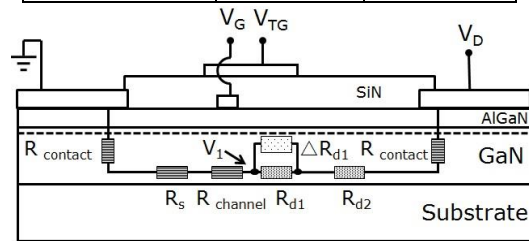


图 4 双栅器件电阻模型图

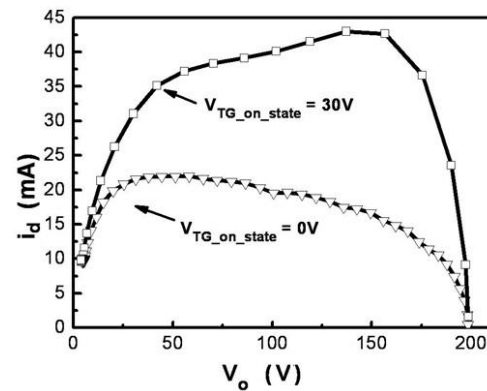


图 6 动态测试下器件开态 ($V_g=1V$) 输出电流