

氮化镓晶体管中非傅里叶热扩展的偏置依赖性研究



沈扬¹ Xue-Song Chen² Yu-Chao Hua³ 李含灵¹ Lan Wei² 曹炳阳^{1,*}

¹清华大学航天航空学院, 工程力学系

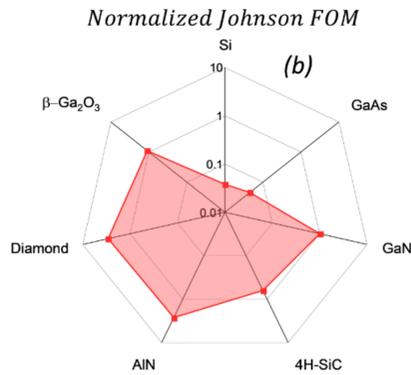
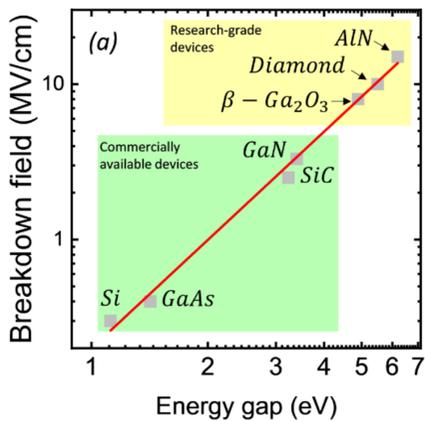
²滑铁卢大学, 计算机与电气工程系 ³南特大学综合理工学院, LTEN实验室

*Email: caoby@tsinghua.edu.cn



1. 研究背景

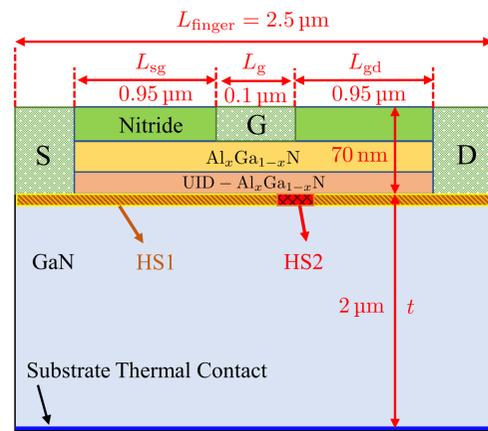
氮化镓 (GaN) 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 是高频及高功率应用场景的理想器件, 但自热效应会显著降低器件性能和可靠性



- 器件工作时的产热分布显著受到电压偏置的影响
- 器件内部的传热是非傅里叶热扩展过程, 在研究热扩展过程的同时需考虑声子输运的尺寸效应
- 目前尚缺乏对产热及非傅里叶热扩展过程的耦合定量研究, 亟需开展器件的跨尺度电热联合模拟

2. 电热耦合仿真方法开发

电学TCAD仿真+声子蒙特卡洛模拟

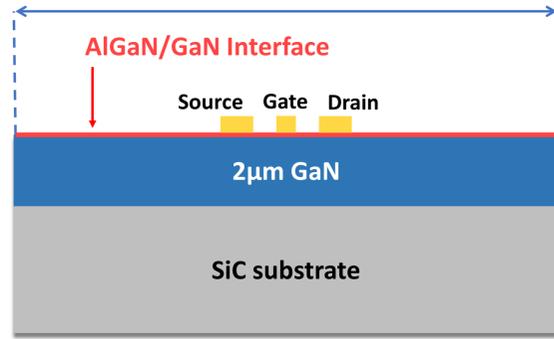


TCAD仿真

- 电子扩散-漂移方程
 - 电流连续性方程
 - 泊松方程
- 输出各个电压偏置下器件中的产热分布

产热分布

w = 30 micrometers



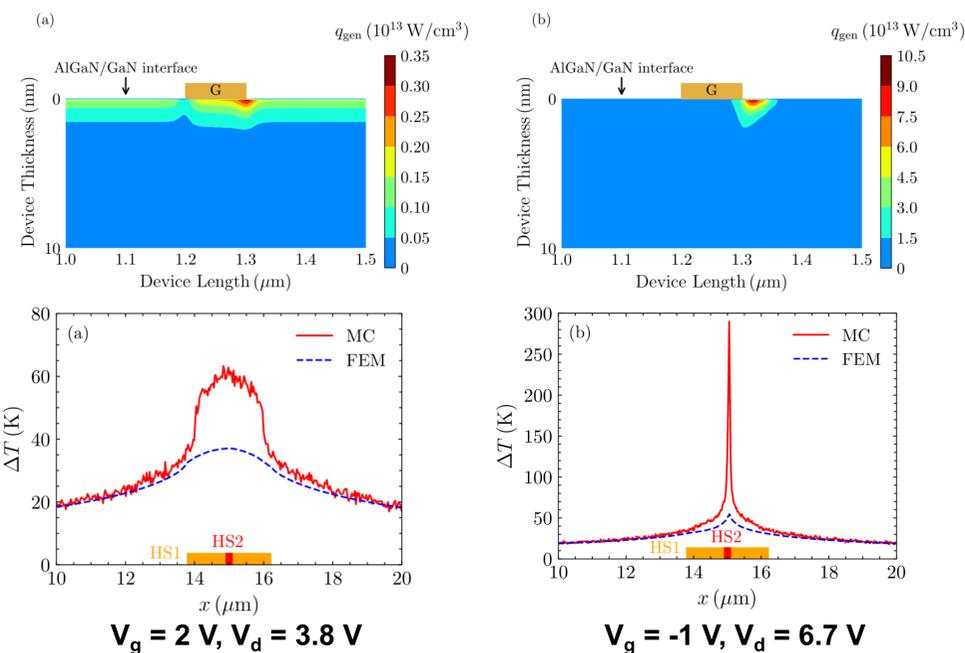
声子蒙特卡洛模拟 (MC)

- 声子玻尔兹曼方程
- 将TCAD输出的产热分布作为声子发射源, 输出器件温度场分布

3. 结果与讨论

(一) 首次揭示器件产热和温度分布的偏置依赖性

总功率均为5 W/mm时, 不同电压偏置下氮化镓器件沟道内的产热及温度分布

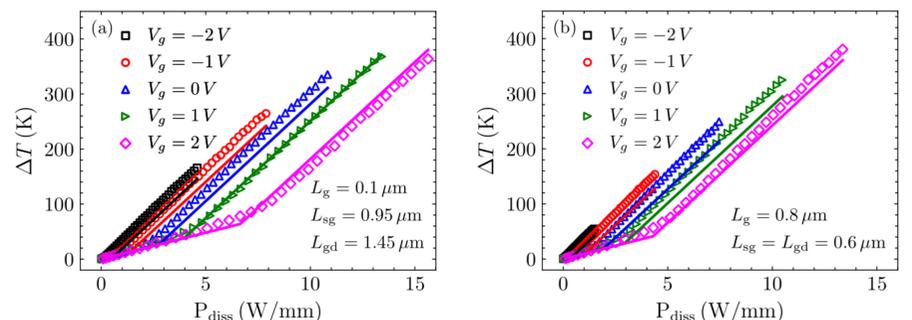


产热分布与电压偏置显著相关, 从而对弹道-扩散区的热扩展过程有显著影响, 使得器件结温有明显区别

(二) 建立了氮化镓器件的双热导率模型

$$T_m = T_0 + \frac{k_{bulk}}{k_{HS1}} P_1 R_1 + \frac{k_{bulk}}{k_{HS2}} P_2 R_2$$

- HS1: 表征沟道内均匀分布的产热
- HS2: 表征栅极下方靠近漏极一侧集中的产热
- P_1, P_2 : HS1中和HS2中的产热功率
- R_1, R_2 : 基于傅里叶定律预测的HS1和HS2的热阻
- $k_{bulk} = 220 \frac{W}{mK}, k_{HS1} = 94.47 \frac{W}{mK}, k_{HS2} = 47.38 \frac{W}{mK}$



曲线: 模型预测结果; 符号: 电热仿真结果

模型预测结果与电热耦合仿真结果吻合良好, 适用于不同几何参数的器件

结论

- 开发了晶体管在弹道-扩散区的电热耦合仿真方法, 可实现器件级的快速电热耦合研究
- 首次揭示了氮化镓器件在弹道-扩散区的产热及温度分布的偏置依赖特性
- 构建了可快速估计器件温升双等效热导率模型, 模型预测结果和电热耦合仿真结果吻合良好