

研究背景

氮化镓高电子迁移率晶体管 (GaN HEMT) 是用作高功率信号放大器和高频开关的理想器件, 而 GaN HEMT 中显著的自热效应会降低器件性能并且减少器件使用寿命

GaN HEMT 近结热运输过程有三个典型特点:

- ▶ 热源相比于器件整体尺寸很小, 扩展热阻主导 HEMT 中的传热过程
- ▶ 声子-边界散射导致 GaN 层等效热导率降低
- ▶ 热源尺寸和声子自由程相当引起的准弹道运输使得热点温度进一步提高

同时, 由于电子焦耳热是高度偏置依赖的, 即栅极电压和漏极电压会显著影响沟道内的产热分布, 从而同时影响热扩展过程及声子弹道运输。目前还没有对于 GaN HEMT 中声子运输偏置依赖性的定量研究

TCAD 仿真及声子蒙特卡洛模拟

采用 Sentaurus TCAD 对器件进行仿真, 将得到的产热分布输入到声子蒙特卡洛模拟中作为声子发射热源。电子输运采用漂移-扩散模型 (DDM) 描述, 声子色散采用 Born-von Karman 模型, 界面声子穿透率采用扩散失配模型 (DMM)

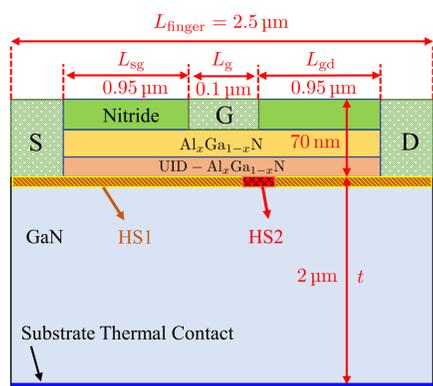


Figure 1: GaN HEMT 结构示意图

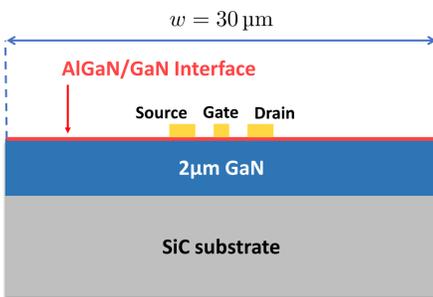


Figure 2: GaN/SiC 器件示意图, TCAD 仿真区域位于源极和漏极之间

偏置依赖的产热分布及双热源模型

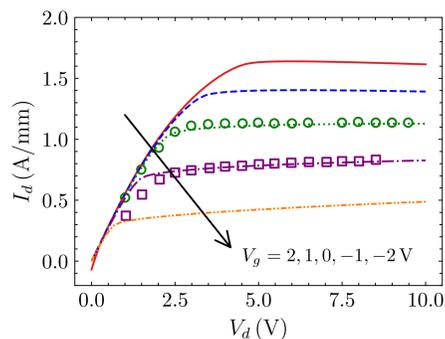


Figure 3: 器件输出曲线, 曲线: TCAD 仿真结果; 符号: 实验值

$$\begin{cases} P_1 = I_d V_d, P_2 = 0, & V_d \leq V_{dsat} \\ P_1 = I_d V_{dsat}, P_2 = I_d (V_d - V_{dsat}), & V_d > V_{dsat} \end{cases}$$

双热源模型:

当器件处于线性区时, 产热均匀地分布在沟道内 ($L_{HS1} = L_{finger}$); 当器件进入饱和区后, 新增加的产热集中在栅极下方靠近漏极一侧的小区域内 ($L_{HS2} = 0.16 \mu m$)

HEMT 的温度分布

$P_{diss} = 5 W/mm$, (a) $V_g = 2V, V_d = 3.8V$ 及 (b) $V_g = -1V, V_d = 6.7V$ 时 GaN 层的温度分布

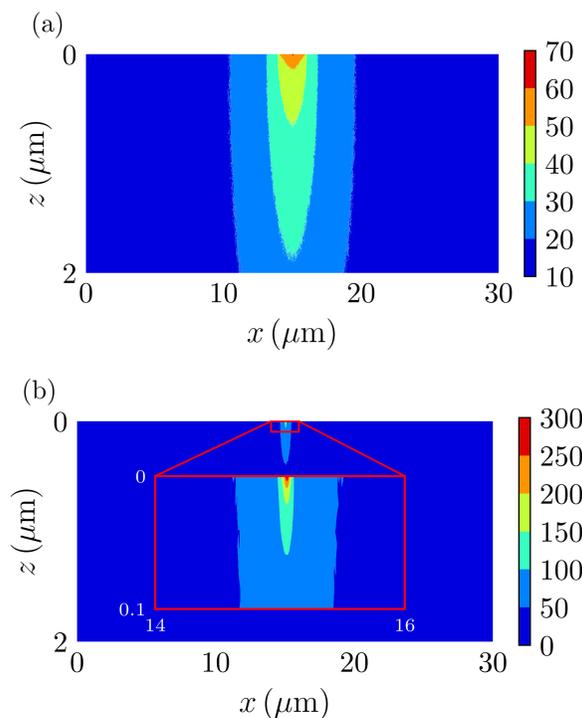


Figure 4: MC 模拟得到的不同电压偏置下 GaN 层的温度分布 (a) $V_g = 2V, V_d = 3.8V$ and (b) $V_g = -1V, V_d = 6.7V$, 总功率均为 $P_{diss} = 5 W/mm$

$P_{diss} = 5 W/mm$ 时, 不同电压偏置下 AlGaIn/GaN 界面处的温度分布。由于产热分布的不同, 温度分布出现了显著区别

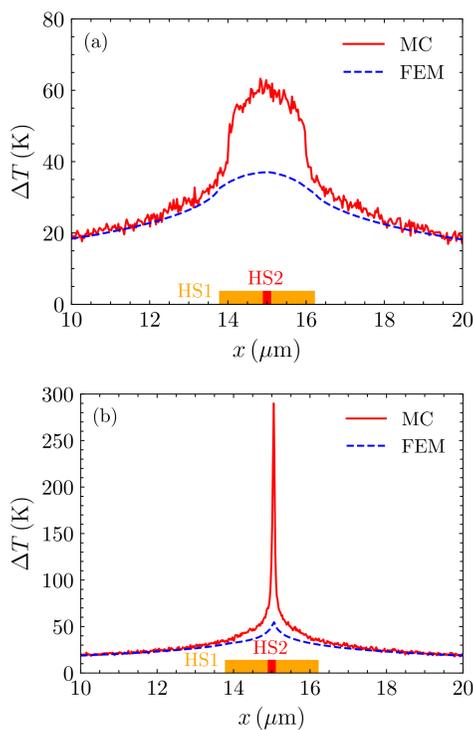


Figure 5: 总功率为 $P_{diss} = 5 W/mm$ 时不同电压偏置下 AlGaIn/GaN 表面温度分布 (a) $V_g = 2V, V_d = 3.8V$ and (b) $V_g = -1V, V_d = 6.7V$

不同栅压下 GaN 层相对最高温升随总功率的变化

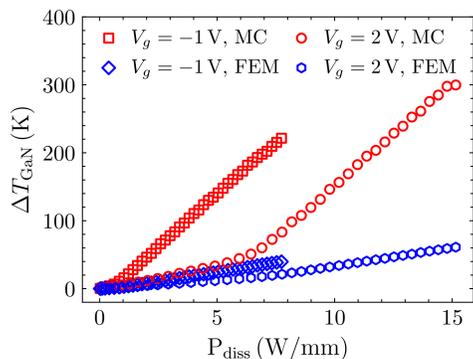


Figure 6: GaN 层的温升随总功率 P_{diss} 的变化

当器件由线性区进入饱和区后, 热源面积减小使得声子弹道运输强度增加, MC 模拟结果大幅高于有限元预测结果

GaN 层热阻分析

- 💡 在不同电压偏置下, 由声子-边界散射引起的跨平面弹道效应基本不变, 体现为 GaN 薄膜的等效热导率随着厚度的减小而降低
- 💡 当器件由线性区进入饱和区后, 热源尺寸和声子自由程相当引起的弹道效应迅速增加

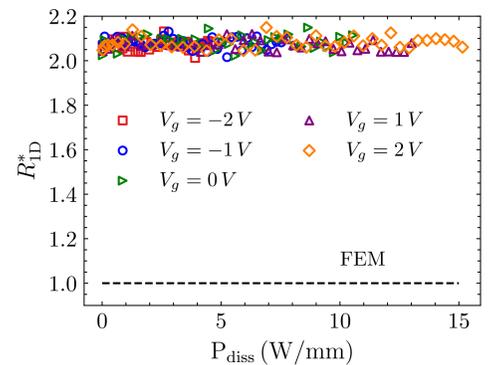


Figure 7: GaN 层的无量纲一维热阻 R_{TD}^* 随 P_{diss} 的变化, $R_{TD}^* = \frac{R_{TD}}{t/(wk_{bulk})}$

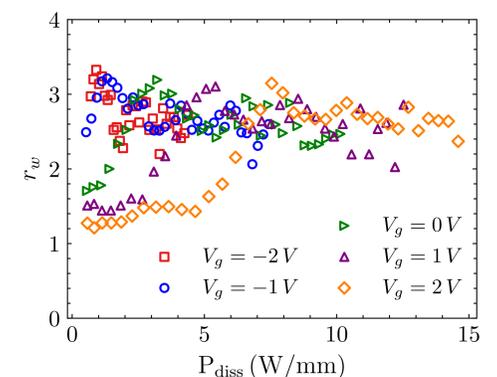


Figure 8: 热阻比 r_w 随 P_{diss} 的变化, $r_w = R_{diff, MC} / (R_{diff, FEM} \cdot R_{TD, MC})$, 其中 $R_{diff} = d\Delta T_{GaN} / dP_{diss}$

双热导率模型

不同的弹道效应可以在声子自由程中引入不同的抑制函数, 最终体现为等效热导率的减小,

$$k_{eff} = \frac{1}{3} \sum_j \int_0^{\omega_j} \hbar \omega \frac{\partial f_0}{\partial T} DOS_j(\omega) v_{g,\omega} l_{m,j} d\omega$$

其中

$$l_{m,j} = \frac{l_{0,j}}{(1 + \frac{2}{3} Kn_{t,\omega_j}) (1 + A_w (\frac{w_g}{w}, \frac{w}{t}) Kn_{w-\omega_j}) r_t r_{wg}}$$

当器件处于线性区时, $k_{HS1} = 94.47 W/m K$; 当器件处于饱和区时, $k_{HS2} = 47.38 W/m K$

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

其中 T_0 为有限元预测的 GaN 层底部温度, P_1, R_1 , 和 P_2, R_2 分别为 HS1 和 HS2 中的功率及其在 GaN 层的热阻

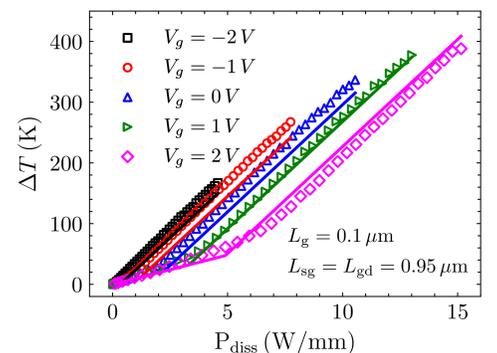


Figure 9: 不同电压偏置下 HEMT 的最大温升随 P_{diss} 的变化, 符号为 MC 模拟结果, 曲线为基于有限元仿真的双热源模型预测结果

Reference

- [1] Yang Shen, Xue-Song Chen, Yu-Chao Hua, Han-Ling Li, Lan Wei, and Bing-Yang Cao. Bias dependence of non-fourier heat spreading in gan hems. Submitted to IEEE Transactions on Electron Devices (Accepted), 2022.