

栅宽对 AlGaIn/GaN HEMTs 亚阈值摆幅的影响

季启政^{1,2}, 刘峻³, 杨铭⁴, 马贵蕾¹, 胡小锋¹, 刘尚合¹

(1. 陆军工程大学石家庄校区电磁环境效应重点实验室, 河北石家庄 050003; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;
3. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏南京 210044; 4. 北京东方计量测试研究所, 北京 100094)

摘要: 制备了不同栅极宽度的 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管, 通过测量各器件电容-电压曲线和转移特性曲线, 得到了栅沟道载流子输运特性以及亚阈值摆幅, 结果显示当栅极宽度从 10 μm 增加到 50 μm 时, 亚阈值摆幅下降了 40.3%。定性且定量地分析了亚阈值摆幅值随栅极宽度变化的原因, 发现不同的栅极宽度对应不同的极化散射强度, 亚阈值摆幅的变化是由栅沟道载流子输运特性和极化散射效应造成的。为 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管开关性能优化提供了新的视角与维度, 将促进其更好地应用于无线通信、电力传输以及国防军工领域。

关键词: AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管; 亚阈值摆幅; 极化; 散射

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61904007)

中图分类号: TN386.3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)06-1486-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230004

Gate Width Influence on Subthreshold Swing of AlGaIn/GaN HEMTs

Ji Qi-zheng^{1,2}, Liu Jun³, Yang Ming⁴, Ma Gui-lei¹, Hu Xiao-feng¹, Liu Shang-he¹

(1. Army Engineering University, Shijiazhuang Campus, National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

3. School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

4. Beijing Orient Institute of Measurement and Test, Beijing 100094, China)

Abstract: AlGaIn/GaN high electron mobility transistors (HEMTs) with different gate widths are prepared. The gate-channel carrier transport characteristics and the subthreshold swing (SS) are obtained by measuring the capacitance-voltage curve and transfer characteristic curve of each HEMT. The results show that the SS value decreases by 40.3% with gate width increasing from 10 μm to 50 μm . The factors affecting the subthreshold swing variation are analyzed qualitatively and quantitatively. It is found that different gate widths correspond to different polarization scattering intensity, and the SS behavior results from gate-channel carrier transport characteristics and polarization scattering effect. This provides a new perspective and dimension for AlGaIn/GaN HEMTs switching performance optimization, which will promote its better application in wireless communication, power transmission and defense industry.

Key words: AlGaIn/GaN high electron mobility transistors; subthreshold swing; polarization; scattering

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61904007)

1 引言

基于 AlGaIn/GaN 异质结材料制备的 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (High Electron Mobility Transistors, HEMTs) 具有高击穿电压、高临界电场、高载流子迁移率和饱和漂移速率以及高抗辐射和抗腐蚀性能, 这使得 AlGaIn/GaN HEMTs 器件在武器装备、航空航天、无线

通信、电力传输等国防军工和国民经济领域都有着极其广阔的应用前景^[1-5]。其中, 亚阈值摆幅 (Subthreshold Swing, SS) 是 AlGaIn/GaN HEMTs 非常重要的开关特性核心参数, 也是其面向实际应用的关键参数。目前国内外已开展了从器件制备工艺以及结构设计角度优化亚阈值摆幅特性的相关研究^[6-9], 但从极化库仑场 (Polarization Coulomb Field, PCF) 散射的角度优化亚阈值

摆幅的研究很少,而 PCF 散射已被证明是 AlGaIn/GaN HEMTs 中的重要散射机制^[10-14],从 PCF 散射的角度来看,器件尺寸与载流子输运特性直接相关,从而与亚阈值摆幅直接相关.因此,从 PCF 散射的角度研究器件尺寸对 AlGaIn/GaN HEMTs 亚阈值摆幅的影响,对于进一步改善 AlGaIn/GaN HEMTs 的开关特性并促进其更好地应用于国民经济和国防军工军事领域,具有非常重要的意义.

本文选择栅极宽度作为典型的器件尺寸来分析 PCF 散射对亚阈值摆幅的影响,制备了三组不同栅极宽度的 AlGaIn/GaN HEMTs 器件,并测试了电容-电压(C - V)曲线和转移特性曲线.提取了 AlGaIn/GaN HEMTs 器件中所有主要的散射机制所对应的迁移率组分,并分析了 PCF 散射和亚阈值摆幅之间的关系.

2 实验

本研究中所用 AlGaIn/GaN HEMTs 器件是基于 AlGaIn/GaN 异质结材料制备的,异质结材料和器件结构示意图如图 1 所示. AlGaIn/GaN 异质结材料采用金属有机化学气相沉淀(Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)于蓝宝石衬底上生长,自衬底向上分别是 40 nm 的 AlN 成核层、1.5 μm 的 GaN 缓冲层、0.5 nm 的 AlN 插层、18 nm 的 $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{N}$ 势垒层、2DEG 层、0.5 nm 的 AlN 插层、1.5 μm 的 GaN 缓冲层、40 nm 的 AlN 成核层.器件结构如图 1 所示,源极和漏极通过电子束蒸发工艺蒸镀 Ti/Al/Ni/Au 多层金属并在 N_2 环境中 800 $^\circ\text{C}$ 高温 30 s 快速热退火的方式形成欧姆接触,源极和漏极欧姆接触的宽度为 50 μm ,通过传输线法(Transmission Line Method, TLM)测试,得出器件欧姆接触电阻为 $0.98 \Omega \cdot \text{mm}$.栅极通过电子束蒸发工艺蒸镀 Ni/Au 双层金属形成肖特基接触.栅源间距(L_{GS})和栅漏间距(L_{GD})均为 24 μm .器件 1 的栅极宽度(W_{G})为 10 μm ;器件 2 的 W_{G} 为 20 μm ;器件 3 的 W_{G} 为 50 μm .栅极长度(L_{C})均为 12 μm .

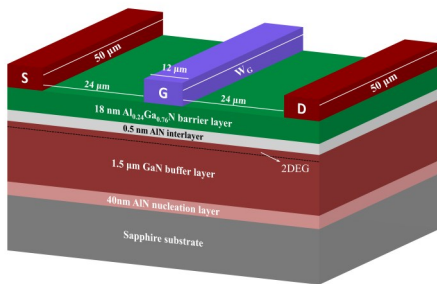


图 1 AlGaIn/GaN 异质结材料及器件结构示意图

器件制备采用光刻、电子束蒸发、欧姆退火等传统微纳加工工艺:源极和漏极通过电子束蒸发工艺蒸镀 Ti/Al/Ni/Au 多层金属并在 N_2 环境中 800 $^\circ\text{C}$ 高温 30 s 快速热退火的方式形成欧姆接触,源极和漏极欧姆接触的宽度为 50 μm ,通过传输线法(Transmission Line Method, TLM)测试,得出器件欧姆接触电阻为 $0.98 \Omega \cdot \text{mm}$.栅极通过电子束蒸发工艺蒸镀 Ni/Au 双层金属形成肖特基接触.栅源间距(L_{GS})和栅漏间距(L_{GD})均为 24 μm .器件 1 的栅极宽度(W_{G})为 10 μm ;器件 2 的 W_{G} 为 20 μm ;器件 3 的 W_{G} 为 50 μm .栅极长度(L_{C})均为 12 μm .

器件电学特性测试采用半导体参数测试仪完成. C - V 曲线的测试是以栅极和源极为测试端口,扫描偏压范围覆盖器件阈值电压前后较大范围,在 1 MHz 这一最合适的频率下测试得到 C - V 曲线,在该频率下测得的 C - V 曲线可以很好地摒弃表面态或界面态的影响,从而只反映二维电子气(Two-Dimensional Electron Gas, 2DEG)的信息.转移特性曲线测试是将漏源偏压 V_{DS} 固定,栅源偏压 V_{GS} 覆盖阈值电压前后较大范围,测试漏源电流 I_{DS} 随 V_{GS} 的变化.

3 结果和分析

图 2 所示为三组不同栅极宽度 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的 C - V 曲线.利用该曲线,在不同栅压下,栅沟道中的 2DEG 电子密度($n_{2\text{D}}$)可由下式计算得到^[15]:

$$n_{2\text{D}} = \int_{V_{\text{T}}}^{V_{\text{GS}}} \frac{C dV}{Me} \quad (1)$$

其中, C 为测试得到的电容值; V_{T} 为阈值电压,该值可通过对 C - V 曲线微分得到; M 为肖特基接触面积; e 为电子电荷.计算出的 $n_{2\text{D}}$ 结果如图 3 所示.从图 2 中可以看出虽然器件 1 的 C 值相对更大,但其阈值电压相对较大,虽然器件 3 的 C 值最小,但器件 3 的阈值电压相对较小,因此根据式(1)计算出三组器件的 $n_{2\text{D}}$ 之间的整体差异不大.此外,根据阈值电压特性,可以排除窄沟道效应对器件特性的影响^[16].

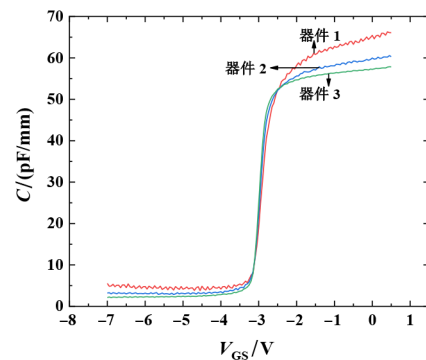


图 2 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的实测 C - V 曲线

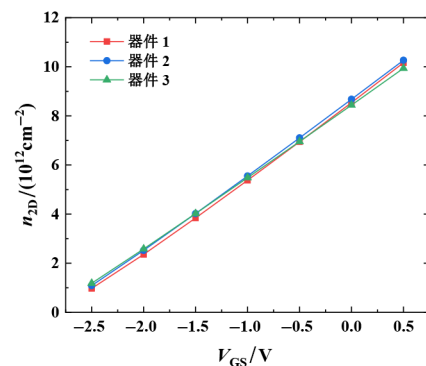


图 3 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的 2DEG 电子密度 $n_{2\text{D}}$ 随栅偏压变化

图4为1 V漏源电压 V_{DS} 对应的线性区转移特性曲线.从图中可以看出,器件开启时,在相同的 V_{GS} 下, I_{DS} 随栅极宽度的增加而增加.对于栅沟道中的电子,其2DEG电子迁移率(μ_n)可由下式计算得到^[15,17]:

$$\mu_n = \frac{I_{DS} L_G}{en_{2D} W_G [V_{DS} - I_{DS} (R_d + R_s + 2R_c)]} \quad (2)$$

$$R_d = \frac{L_{GD}}{en_{2D0} \mu_{n0} W_G} \quad (3)$$

$$R_s = \frac{L_{GS}}{en_{2D0} \mu_{n0} W_G} \quad (4)$$

其中, R_d 为栅漏接触区电阻; R_s 为栅源接触区电阻; R_c 为欧姆接触电阻; n_{2D0} 和 μ_{n0} 分别为 $V_{GS}=0$ V时栅极下沟道中的2DEG电子密度和电子迁移率.其中 n_{2D0} 可根据图3得到,再利用 $V_{GS}=0$ V时的 V_{DS} 和 I_{DS} ,将式(3)和式(4)代入式(2),即可获得 μ_{n0} .表1为各器件 n_{2D0} 和 μ_{n0} 对应取值.

表1 器件1到器件3的 n_{2D0} 和 μ_{n0} 取值

	器件1	器件2	器件3
$n_{2D0}/(10^{12} \text{ cm}^{-2})$	8.538	8.675	8.439
$\mu_{n0}/(\text{cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1})$	1077	1434	2008

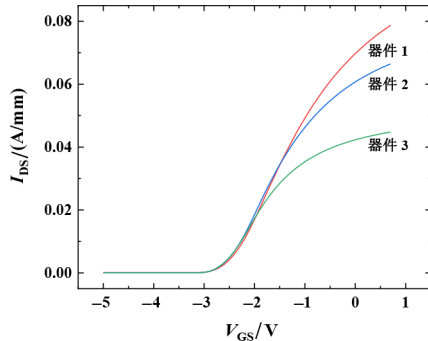


图4 AlGaIn/GaN HEMTs器件的转移特性曲线

通过实验数据计算得到的2DEG电子迁移率如图5所示.三组器件的迁移率曲线都随着栅极电压的增加而上升.器件3的迁移率最大,器件1的迁移率最小.

利用转移特性曲线,还可以得到器件的亚阈值摆幅SS特性.SS是指器件在亚阈值工作状态将漏源电流

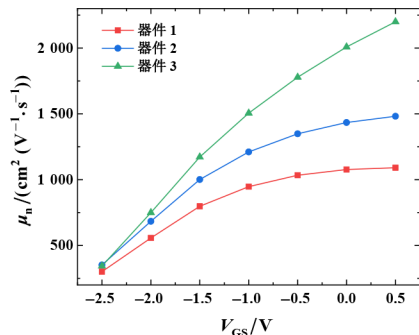


图5 AlGaIn/GaN HEMTs器件的栅沟道电子迁移率随栅极电压变化

提升一个数量级所需栅极电压增量,能够反映器件在开启与关闭之间转换的速度,可以通过下式得到^[18]:

$$SS^{-1} = \frac{\partial \lg(I_{DS})}{\partial V_{GS}} \quad (5)$$

研究用器件的亚阈值工作状态范围在 $V_{GS}=-3.1 \sim -2.8$ V,SS值取该电压范围内的最小值.图6是根据器件的转移特性曲线得到的SS值随栅宽变化曲线,从中可以看出SS值随着 W_G 的增加而减少,器件3的SS相比器件1降低了40.3%.针对该现象作如下分析.

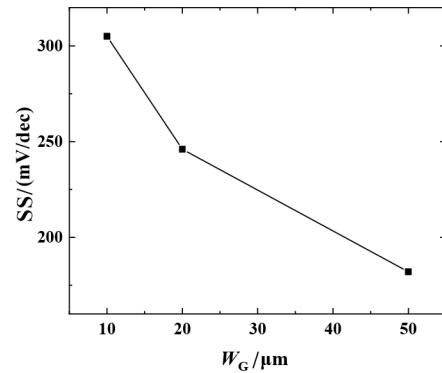


图6 AlGaIn/GaN HEMTs器件的亚阈值摆幅SS随栅宽 W_G 变化

漏源电流 I_{DS} 由漂移电流和扩散电流共同组成.在亚阈值区域内,受栅极电压的影响,漏源电场下的漂移电流可以忽略不计^[19], I_{DS} 主要由扩散电流组成,此时的 I_{DS} 可近似表示为^[20]

$$\begin{aligned} I_{DS} &= eW_G D_n \frac{n_{2D}}{L_G} \\ &= K_B T_e W_G \mu_n \frac{n_{2D}}{L_G} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,电子扩散系数 D_n 是迁移率 μ_n 的函数, $D_n = K_B T_e \mu_n / e$; K_B 为玻尔兹曼常数; T_e 为电子温度; μ_n 与 n_{2D} 为栅极电压 V_{GS} 的函数.从中也可以看出扩散电流 I_{DS} 不仅与电子浓度相关,同时与迁移率有关.将式(6)代入式(5)中,对应的亚阈值摆幅可表达为

$$SS^{-1} = \frac{1}{\ln 10} \cdot \left(\frac{1}{\mu_n} \frac{\partial \mu_n}{\partial V_{GS}} + \frac{1}{n_{2D}} \frac{\partial n_{2D}}{\partial V_{GS}} \right) \quad (7)$$

从式(7)中可以看出,AlGaIn/GaN HEMTs器件的SS值由 μ_n 和 n_{2D} 共同决定.图3显示器件1、器件2和器件3的 n_{2D} 差异很小.因此,在本研究中,三组AlGaIn/GaN HEMTs器件的 n_{2D} 对SS的贡献几乎相同.由此可知,AlGaIn/GaN HEMTs的SS值随栅极宽度增加而减小主要受到 μ_n 的影响.

已有研究表明, μ_n 由AlGaIn/GaN HEMTs器件中的散射机制决定的.声子散射、界面粗糙(InterFace Roughness,IFR)散射、位错(DISlocation,DIS)散射以及PCF散射在AlGaIn/GaN HEMTs器件中是主要的散射机

制^[21-23]. 声子散射包括极性光学声子 (Polar Optical Phonon, POP) 散射和声学声子 (Acoustic Phonon, AP) 散射, 其散射强度随着 n_{2D} 的增加而增强, 因此与声子散射对应的迁移率会随着 n_{2D} 的增加而降低; 对于 IFR 散射, 由于 n_{2D} 越大, 异质界面处能带弯曲越大, 电子波函数将更靠近异质界面, 因此沟道电子会对异质界面粗糙程度更加敏感, 与 IFR 散射相对应的电子迁移率同样会随着 n_{2D} 的增加而降低. 此外, 本研究中的

三组 AlGaIn/GaN HEMTs 器件是在同一异质结材料上制备的, 每组器件内部的位错密度相同, 各器件中与 DIS 散射相对应的电子迁移率应是一致的. 因此, 三组器件电子迁移率的差异 (图 5) 不是由 POP, AP, IFR 和 DIS 散射决定的. PCF 散射源于 AlGaIn/GaN 界面分布不均匀的附加极化电荷 $\Delta\sigma$ (图 7), 附加极化电荷会对沟道中的载流子形成 PCF 散射势 $V(x, y, z)$ ^[22] 如下:

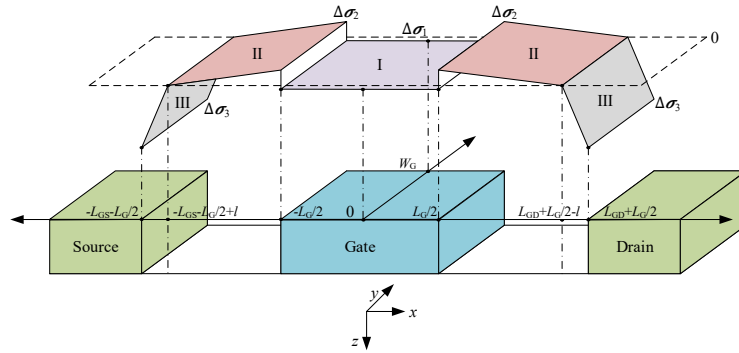


图 7 AlGaIn/GaN 界面处附加极化电荷分布示意图

$$\begin{aligned}
 V(x, y, z) = & -\frac{e}{4\pi\epsilon_s} \int_{-L_{GS}-\frac{L_G}{2}}^{-L_{GS}-\frac{L_G}{2}+l} dx' \int_0^{W_G} \frac{\Delta\sigma_3 \cdot (-x' - L_{GS} - L_G/2 + l)}{l \cdot \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} dy' \\
 & -\frac{e}{4\pi\epsilon_s} \int_{-L_{GS}-\frac{L_G}{2}+l}^{-\frac{L_G}{2}} dx' \int_0^{W_G} \frac{\Delta\sigma_2 \cdot (-x' - L_{GS} - L_G/2 + l)}{(-L_{GS} + l) \cdot \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} dy' \\
 & -\frac{e}{4\pi\epsilon_s} \int_{-\frac{L_G}{2}}^{\frac{L_G}{2}} dx' \int_0^{W_G} \frac{\Delta\sigma_1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} dy' \\
 & -\frac{e}{4\pi\epsilon_s} \int_{\frac{L_G}{2}}^{L_{GD}+\frac{L_G}{2}-l} dx' \int_0^{W_G} \frac{\Delta\sigma_2 \cdot (x' - L_{GD} - L_G/2 + l)}{(-L_{GD} + l) \cdot \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} dy' \\
 & -\frac{e}{4\pi\epsilon_s} \int_{L_{GD}+\frac{L_G}{2}-l}^{L_{GD}+\frac{L_G}{2}} dx' \int_0^{W_G} \frac{\Delta\sigma_3 \cdot (x' - L_{GD} - L_G/2 + l)}{l \cdot \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} dy'
 \end{aligned} \quad (8)$$

其中, ϵ_s 为 GaN 介电常数; l 为欧姆接触金属原子横向扩散距离. 从式(8)中可以看出 PCF 散射强度与器件尺寸密切相关, 因此三组器件电子迁移率的差异 (图 5) 只能归因于散射强度与器件尺寸密切相关的 PCF 散射, 在 PCF 散射的影响下, 2DEG 的电子迁移率随着 n_{2D} 的增加

而增加, PCF 散射是亚阈值摆幅随栅极宽度变化的主要影响因素.

以上是定性分析, 下面开展定量分析, 以提供更明确的解析. 根据已有研究可以得到 POP 散射对应与电子能量 E 相关的动量弛豫率 $\tau_{POP}(E)$ ^[23-25] 如下:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{\tau_{POP}(E)} = & \frac{e^2 m^* \hbar \omega_{POP} (\epsilon_h^{-1} - \epsilon_s^{-1})}{8\pi^2 \hbar^3 [1 - f_0(E)]} \times \int (1 - \cos\theta) \{ [1 - f_0(E + \hbar\omega_{POP})] \\
 & \times \left[\exp\left(\frac{\hbar\omega_{POP}}{K_B T_e}\right) - 1 \right]^{-1} \times \int (q_x^2 + q_z^2)^{-1} \frac{b^6}{(b^2 + q_z^2)^3} dq_z \\
 & + [1 - f_0(E - \hbar\omega_{POP})] \Theta(E - \hbar\omega_{POP}) \\
 & \times \left[\left(\exp\left(\frac{\hbar\omega_{POP}}{K_B T_e}\right) - 1 \right)^{-1} + 1 \right] \times \int (q_x^2 + q_z^2)^{-1} \frac{b^6}{(b^2 + q_z^2)^3} dq_z \} d\theta
 \end{aligned} \quad (9)$$

其中, m^* 为电子有效质量; $\hbar\omega_{\text{POP}}$ 为 POP 能量; ε_h 和 ε_s 分别为高频介电常数和介电常数; 费米函数 $f_0(E) = 1/(\exp((E-E_F)/K_B T_e) + 1)$; E_F 为费米能级; q_{it} 和 q_{le} 分别为声子吸收和发射过程中的散射波矢; q_z 为垂直于 AlGaIn/GaN 界面 z 方向的波矢; $b = (33m^* e^2 n_{2D} / 8\varepsilon_s \hbar^2)^{1/3}$ 为变分参数; $\Theta(x)$ 为阶跃函数. θ 是平行于 AlGaIn/GaN

$$\frac{1}{\tau_{\text{AP}}(E)} = \frac{3bE_{\text{DP}}^2 m^* K_B T_e}{32\pi\hbar^3 C_L} \int \frac{1 - \cos\theta}{S^2(q, T_e)} d\theta + \frac{e^2 h_{14}^2 m^* K_B T_e}{4\pi\hbar^3} \int \frac{1 - \cos\theta}{qS^2(q, T_e)} \left[\frac{9}{32C_L} f_L(y) + \frac{13}{32C_T} f_T(y) \right] d\theta \quad (10)$$

其中, E_{DP} 为声学形变势能; h_{14} 为压电常数; C_L 和 C_T 分别为纵向弹性常数和横向弹性常数; $f_L(y) = (1+6y+12y^2+2y^3)/(1+y)^6$; $f_T(y) = (13+78y+72y^2+82y^3+36y^4+6y^5)/13(1+y)^6$; $y = q/b$. 屏蔽方程 $S(q, T_e)$ 为

$$S(q, T_e) = 1 + \frac{e^2 F(q) \Pi(q, T_e, E)}{2\varepsilon_s q} \quad (11)$$

因子 $F(q)$ 为

$$F(q) = \int_0^\infty \int_0^\infty \psi^2(z) \psi^2(z') \exp(-q|z-z'|) dz dz' \quad (12)$$

极化方程 $\Pi(q, T_e, E)$ 为

$$\Pi(q, T_e, E) = \frac{m^*}{4\pi\hbar^2 K_B T_e} \int_0^\infty \frac{1 - \Theta(q - 2k_F) [1 - (2k_F/q)^2]^{1/2}}{\cosh^2[(E_F - E)/2K_B T_e]} dE \quad (13)$$

其中, 费米波矢 $k_F = (2\pi n_{2D})^{1/2}$. 从式(9)和式(10)中也可以看出, POP 和 AP 对迁移率的影响会随着电子浓度增加进一步降低迁移率值, 并且式中并不涉及器件尺寸参数, 说明这两种散射机制对仅不同尺寸器件的影响是一样的.

IFR 散射对应的动量弛豫率 $\tau_{\text{IFR}}(E)$ 为^[22,23]

$$\frac{1}{\tau_{\text{IFR}}(E)} = \frac{m^* \Delta^2 \lambda^2}{2\hbar^3} \int \exp\left(-\frac{q^2 \lambda^2}{4}\right) \left[\frac{\Gamma(q)}{S(q, T_e)} \right]^2 (1 - \cos\theta) d\theta \quad (14)$$

其中, Δ 为界面平均位移; λ 为 Δ 的自动相关长度; $\Gamma(q) = e^2 n_{2D} / 2\varepsilon_s$.

DIS 散射对应的动量弛豫率 $\tau_{\text{DIS}}(E)$ 为^[23]

$$\frac{1}{\tau_{\text{DIS}}(E)} = \frac{m^* e^4 N_{\text{DIS}} f^2}{8\pi\varepsilon_s^2 c^2 \hbar^3} \cdot \left\{ \int \int \psi^*(z) \left[\int \exp(-q|z_i - z|) dz_i \right] \psi(z) dz \right\}^2 \cdot \frac{1 - \cos\theta}{q^2 S^2(q, T_e)} d\theta \quad (15)$$

其中, N_{DIS} 为位错面密度; f 为填充因子(假设位错线完全带电, $f=1$); c 为晶格常数.

各散射机制对应电子迁移率 μ 是 $\tau(E)$ 的函数, 具体表达式为^[23]

$$\mu = \frac{e \int \tau(E) E \frac{\partial f_0(E)}{\partial E} dE}{m^* \int E \frac{\partial f_0(E)}{\partial E} dE} \quad (16)$$

界面方向上的二维电子气波函数 $\Psi_k(x, y, z) = A^{-1/2} \psi(z) \exp(ik_x x + ik_y y)$ 经过散射变为 $\Psi_{k'}(x, y, z)$ 后 k 与 k' 之间的夹角, $k = (k_x, k_y)$ 为二维平面波矢, 且 $k' = k + q$, $q = 2(2m^* \hbar^{-2} E)^{1/2} \sin(\theta/2)$, Fang-Howard 变分波函数 $\psi(z) = (b^3 z^2/2)^{1/2} \exp(-bz/2)$.

AP 散射对应的动量弛豫率 $\tau_{\text{AP}}(E)$ 为^[23,25]

$$\frac{1}{\tau_{\text{AP}}(E)} = \frac{3bE_{\text{DP}}^2 m^* K_B T_e}{32\pi\hbar^3 C_L} \int \frac{1 - \cos\theta}{S^2(q, T_e)} d\theta + \frac{e^2 h_{14}^2 m^* K_B T_e}{4\pi\hbar^3} \int \frac{1 - \cos\theta}{qS^2(q, T_e)} \left[\frac{9}{32C_L} f_L(y) + \frac{13}{32C_T} f_T(y) \right] d\theta \quad (10)$$

从式(9)~式(13)可以得知 POP 散射、AP 散射、IFR 散射、DIS 散射均由 AlGaIn/GaN 异质结材料的 POP 能量、声学形变势能、压电常数、弹性常量及界面平均位移等固有参数决定, 与器件尺寸无关. 由于试验所用器件均在同一异质结材料上制备, 可以认为位错面密度在材料中是均匀的, 因此不同尺寸器件中的 N_{DIS} 参数是相同的, 与器件尺寸无关. 根据上式以及器件材料的固有参数(表2)可计算得到 POP, AP, DIS, IFR 这四种散射在不同栅压下对应的迁移率 ($\mu_{\text{POP}}, \mu_{\text{AP}}, \mu_{\text{DIS}}, \mu_{\text{IFR}}$)^[23-26]. 进而根据马森定则, PCF 散射对应迁移率 (μ_{PCF}) 计算如下^[22]:

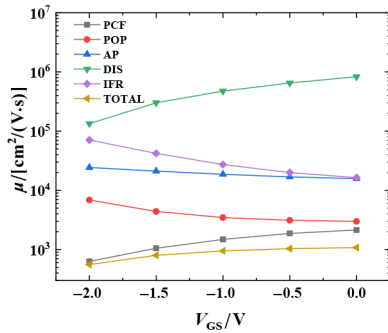
$$\frac{1}{\mu_{\text{PCF}}} = \frac{1}{\mu_{\text{TOTAL}}} - \left(\frac{1}{\mu_{\text{POP}}} + \frac{1}{\mu_{\text{AP}}} + \frac{1}{\mu_{\text{DIS}}} + \frac{1}{\mu_{\text{IFR}}} \right) \quad (17)$$

其中, μ_{TOTAL} 为宏观迁移率值(图5). 三组器件的所有散射对应的迁移率计算结果如图8所示. 为了明确比较, 图9显示了三组不同栅极宽度的 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的 μ_{PCF} . 从中可以发现, 三组器件的 μ_{PCF} 均随着 V_{GS} 的增加而增加. 由于三组器件的其他散射强度相同(图8), μ_n 由 PCF 散射主导. 在相同的 V_{GS} 下, μ_{PCF} 和 $\partial\mu_{\text{PCF}}/\partial V_{\text{GS}}$ 都随着栅极宽度的增加而增加. 对于器件3, 根据式(7), $1/\mu_{\text{PCF}} \cdot \partial\mu_{\text{PCF}}/\partial V_{\text{GS}}$ 的值最大, 因此 $1/\mu_n \cdot \partial\mu_n/\partial V_{\text{GS}}$ 的值最大, SS 的值最小. 这定量地证实了 AlGaIn/GaN HEMTs 的亚阈值摆幅受到栅极宽度和 PCF 散射的影响.

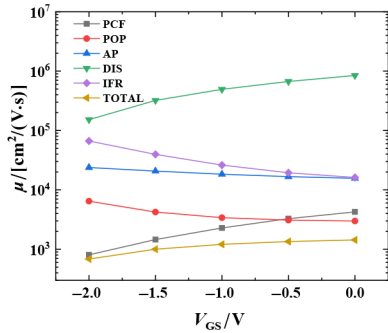
表2 AlGaIn/GaN 异质结材料的固有参数^[22,23]

符号	参数	数值
m^*	电子有效质量	$0.22m_0$
ε_s	介电常数(低频)	$10.4\varepsilon_0$
ε_h	介电常数(高频)	$5.47\varepsilon_0$
ω_{POP}	极化光学声子能量	91.2 meV
E_{dp}	声学形变势能	8.5 eV
h_{14}	压电常数	0.5 C/m^2
C_L	纵向弹性常数	$2.65 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
C_T	横向弹性常数	$4.42 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Δ	界面平均位移(典型值)	1 nm
λ	Δ 的自动相关长度(典型值)	7.5 nm
N_{DIS}	位错面密度(典型值)	$1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$
c	晶格常数	5.185 Å

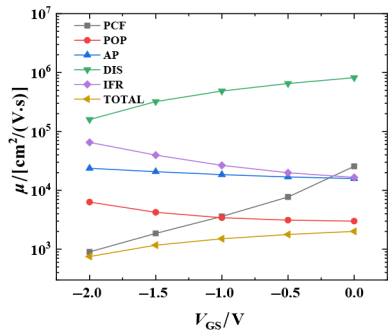
注: m_0 和 ε_0 分别为电子静止质量和真空介电常数



(a) 器件1的各电子迁移率

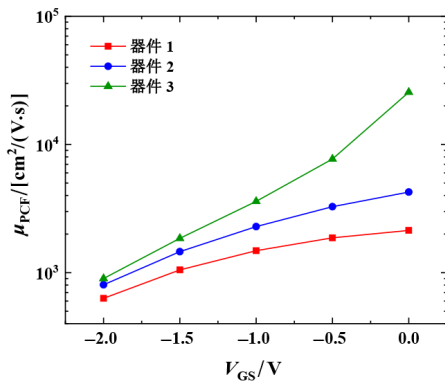


(b) 器件2的各电子迁移率



(c) 器件3的各电子迁移率

图8 与PCF散射、POP散射、AP散射、DIS散射和IFR散射对应的电子迁移率以及器件1、器件2和器件3的实验获得的电子迁移率(TOTAL)

图9 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的PCF散射所对应的电子迁移率 μ_{PCF}

4 总结

通过对比分析三组不同栅极宽度的 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的亚阈值摆幅和栅沟道电子迁移率,分析了栅极宽度对亚阈值摆幅产生影响的原因,发现 PCF 散射是导致亚阈值摆幅出现变化的根本原因. 而由于 PCF 散射与器件尺寸密切相关,本文实际也证实了通过改变器件尺寸来调节 PCF 散射将是优化 AlGaIn/GaN HEMTs 器件亚阈值摆幅和开关特性的一种有效方法,拓展了优化 AlGaIn/GaN HEMTs 器件开关性能的新的视角与维度. 亚阈值摆幅是器件开关特性的核心参数指标,而开关特性是 AlGaIn/GaN HEMTs 器件面向无线通信、电力传输以及国防军工领域应用的最关键特性之一,本文所拓展的 AlGaIn/GaN HEMTs 器件优化维度将为其更好地应用于国民经济和国防军工军事领域提供重要的启示与支撑.

参考文献

- [1] NGUYEN H Q, NGUYEN T, TANNER P, et al. Piezotronic effect in a normally off p-GaN/AlGaIn/GaN HEMT toward highly sensitive pressure sensor[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(24): 242104.
- [2] NARANG K, BAG R K, SINGH V K, et al. Improvement in surface morphology and 2DEG properties of AlGaIn/GaN HEMT[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 815: 152283.
- [3] MOON J S, WONG J, GRABAR B, et al. 360 GHz fMAX graded-channel AlGaIn/GaN HEMTs for mmW low-noise applications[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(8): 1173-1176.
- [4] 敬小东, 王海龙, 游飞, 等. 星载大功率 GaN 固态功放寿命评估方法[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(4): 420-425. JING X D, WANG H L, YOU F, et al. Method for life evaluation of spaceborne high power GaN solid state power amplifier[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(4): 420-425. (in Chinese)
- [5] 季启政, 刘峻, 杨铭, 等. AlGaIn/GaN HEMT 质子辐射效应研究进展[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(4): 436-445. JI Q Z, LIU J, YANG M, et al. Review of proton irradiation effect to AlGaIn/GaN HEMT[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(4): 436-445. (in Chinese)
- [6] LEE H P, BAYRAM C. Improving Current ON/OFF ratio and subthreshold swing of Schottky-gate AlGaIn/GaN HEMTs by postmetallization annealing[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(7): 2760-2764.
- [7] KIM K, KIM T J, ZHANG H L, et al. AlGaIn/GaN Schottky-gate HEMTs with UV/O₃-treated gate interface[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(10): 1488-1491.
- [8] DEGUCHI T, KIKUCHI T, ARAI M, et al. High on/off current ratio p-InGaIn/AlGaIn/GaN HEMTs[J]. IEEE Elec-

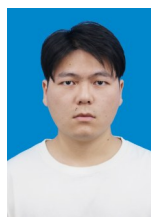
- tron Device Letters, 2012, 33(9): 1249-1251.
- [9] YANG L, MI M H, HOU B, et al. Improvement of sub-threshold characteristic of gate-recessed AlGaIn/GaN transistors by using dual-gate structure[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(10): 4057-4064.
- [10] YUAN L, CHEN H W, CHEN K J. Normally off AlGaIn/GaN metal - 2DEG tunnel-junction field-effect transistors [J]. IEEE Electron Device Letters, 2011, 32(3): 303-305.
- [11] CUI P, LIU H, LIN W, et al. Influence of different gate biases and gate lengths on parasitic source access resistance in AlGaIn/GaN heterostructure FETs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(3): 1038-1044.
- [12] LV Y J, LIN Z J, MENG L G, et al. Influence of the ratio of gate length to drain-to-source distance on the electron mobility in AlGaIn/AlN/GaN heterostructure field-effect transistors[J]. Nanoscale Research Letters, 2012, 7(1): 434.
- [13] LIU Y, LIN Z J, YANG M, et al. Effect of polarization Coulomb field scattering on low temperature electron mobility in strained AlGaIn/AlN/GaN heterostructure field-effect transistors[J]. Modern Physics Letters B, 2016, 30(35): 1650411.
- [14] YANG M, JI Q Z, SU X G, et al. Study on the electron mobility related with ohmic contact width in AlGaIn/GaN HEMTs[J]. Modern Physics Letters B, 2020, 34(Supp01): 2150008.
- [15] ZHAO J Z, LIN Z J, CORRIGAN T D, et al. Electron mobility related to scattering caused by the strain variation of AlGaIn barrier layer in strained AlGaIn/GaN heterostructures[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(17): 173507.
- [16] 左磊召. 小尺寸MOS器件阈值电压的三维建模与仿真研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2011.
ZUO L Z. 3-D Analytical Model and Simulation Technologies of Threshold Voltage in MOS Transistors Considering the Small Geometry Effects[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011. (in Chinese)
- [17] LV Y J, LIN Z J, ZHANG Y, et al. Polarization Coulomb field scattering in AlGaIn/AlN/GaN heterostructure field-effect transistors[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(12): 123512.
- [18] SONG W J, LI Y, ZHANG K, et al. Steep subthreshold swing in GaN negative capacitance field-effect transistors [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(10): 4148-4150.
- [19] 汤庭鳌, 王晓晖, 郑大卫. MOS场效应管的新的电流公式[J]. 半导体学报, 1994, 15(10): 686-693.
TANG T A, WANG X H, ZHENG D W. Advanced Current characteristics of MOS field effect transistors[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1994, 15(10): 686-693. (in Chinese)
- [20] KUCHTA D, WOJTASIAK W. A DC analytical AlGaIn/GaN HEMT model for transistor characterisation[C]// 2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON). Krakow: IEEE, 2016: 1-4.
- [21] YANG M, LV Y J, FENG Z H, et al. Study of source access resistance at direct current quiescent points for AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(22): 224501.
- [22] LUAN C B, LIN Z J, LV Y J, et al. Theoretical model of the polarization Coulomb field scattering in strained AlGaIn/AlN/GaN heterostructure field-effect transistors[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(4): 044507.
- [23] GURUSINGHE M N, DAVIDSSON S K, ANDERSSON T G. Two-dimensional electron mobility limitation mechanisms in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures[J]. Physical Review B, 2005, 72(4): 045316.
- [24] GELMONT B L, SHUR M, STROSCIO M. Polar optical-phonon scattering in three- and two-dimensional electron gases[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 77(2): 657-660.
- [25] HIRAKAWA K, SAKAKI H. Mobility of the two-dimensional electron gas at selectively doped n-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterojunctions with controlled electron concentrations[J]. Physical Review. B, Condensed Matter, 1986, 33(12): 8291-8303.
- [26] YANG M, LV Y, CUI P, et al. Determination of the polarization and strain distribution in AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2018, 123: 223-227.

作者简介



季启政 男, 1979年出生, 安徽无为。现为陆军工程大学石家庄校区电磁环境效应重点实验室博士生。主要研究方向为微电子器件与电磁防护。

E-mail: qzhji@sina.com



刘峻 男, 1998年出生, 江苏盐城人。现为南京信息工程大学电子与信息工程学院硕士研究生。主要研究方向为GaN半导体功率器件。

E-mail: 1414294528@qq.com



刘尚合(通讯作者) 男, 1937年出生, 山西闻喜人。现为陆军工程大学教授、中国工程院院士。主要研究方向为静电与电磁防护、电磁环境效应。

E-mail: liu_sh_h@163.com