

准弹道输运纳米 MOSFET 散粒噪声的抑制研究*

贾晓菲^{1)2)†} 杜磊¹⁾ 唐冬和¹⁾ 王婷岚¹⁾ 陈文豪¹⁾

1) (西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

2) (安康学院电子与信息工程系, 安康 72500)

(2011年9月13日收到; 2011年11月18日收到修改稿)

目前研究准弹道输运纳米 MOSFET 散粒噪声的抑制时, 采取了完全不考虑其抑制, 或只强调抑制的存在而并未给出抑制公式的方式进行研究. 本文基于 Navid 模型推导了准弹道输运纳米 MOSFET 散粒噪声, 并得到了其在费米作用、库仑作用和二者共同作用三种情形下的抑制因子. 在此基础上, 对各抑制因子随源漏电压、栅极电压、温度及源漏掺杂浓度的变化特性进行了研究. 两者共同作用的抑制因子随源漏电压和栅极电压变化特性与文献中给出的实验结论相符合, 从而对实验上得到两者共同作用下的抑制因子随源漏电压和栅极电压的变化特性给出了理论解释.

关键词: 散粒噪声, 抑制因子, 纳米 MOSFET

PACS: 72.70.+m, 72.10.-d, 73.40.Qv

1 引言

纳米 MOSFET 器件中, 其过剩噪声以散粒噪声为主^[1,2], 散粒噪声存在费米抑制作用和库仑抑制作用. 费米作用通过限制注入电子态的占有概率而减少注入电子发射率的涨落, 进而对散粒噪声产生抑制; 库仑作用能够引起器件区电势分布的涨落, 通常此涨落会抑制注入电子发射率涨落进而对散粒噪声产生抑制^[1,3,4]. 这些载流子之间的相互作用将会使散粒噪声减小, 使之小于 Poisson 值 $2eI$, I 为平均电流. 为了方便研究散粒噪声, 学者们用散粒噪声与 Poisson 值之比 $F \equiv S/S_P = S/2eI$ 来描述抑制因子, 也称为 Fano 因子, 其中 S 为散粒噪声, S_P 为泊松值, 当 $F > 1$ 时称之为超泊松值, $F < 1$ 时称之为亚泊松值.

随着 MOSFET 沟道长度的缩短, 沟道中载流子的输运机理将从包含大量散射过程的漂移-扩散输运逐渐过渡到经历少量散射的准弹道输运, 甚至无散射的弹道输运. 实验和理论模拟结果表

明, 当 MOSFET 沟道长度小于 30 nm 时, 准弹道输运将会非常显著^[5-7]. 研究者已对弹道输运的纳米 MOSFET 散粒噪声做了大量的研究, 并建立了散粒噪声抑制因子的计算公式^[3]. 但在建立准弹道输运纳米 MOSFET 散粒噪声模型时, 为了简化问题, 研究者完全不考虑其抑制作用, 直接得到噪声公式^[8]; 或是只强调散粒噪声抑制的存在而并未给出描述抑制强度的具体表达式^[9,10]; 实验上也只能测的两者共同抑制作用随源漏电压和栅极电压的变化情况^[1]. 而要定量解释和预测纳米 MOSFET 不断增加的过剩噪声就必须对其散粒噪声的抑制进行定量描述, 所以需要建立一种能准确描述纳米 MOSFET 散粒噪声的抑制模型.

Navid 等人指出纳米 MOSFET 散粒噪声和介观导体散粒噪声^[11-13]的物理起源是一致的, 并运用介观散粒噪声理论对纳米 MOSFET 散粒噪声进行了研究, 得到了短沟道 MOSFET 的电流噪声公式^[10]. 本文将基于 Navid 模型, 推导准弹道输运纳米 MOSFET 散粒噪声在费米作用、库仑作用和二者共同作用三种情形下的抑制因子公式, 对

* 国家自然科学基金(批准号: 61076101)资助的课题.

† E-mail: jiaxiaofei-ab@163.com

三种情形下抑制因子分别随源漏电压 V_{DS} 、栅极电压 V_{GS} 、温度 T 以及掺杂浓度 N_{SD} 的变化趋势进行了分析, 并分别讨论其在三种情形下的抑制特性, 最后将其抑制特性与文献给出的实验结果、介观散粒噪声抑制特性和已有准弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声的抑制特性进行了比较分析.

2 准弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声抑制模型的建立

2.1 准弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声的推导

随着 MOSFET 尺寸的减小, 器件中的运输机理从漂移扩散运输逐渐过渡到准弹道运输甚至弹道运输. 长沟道 MOSFET 运输为漂移扩散运输, 其过剩噪声以热噪声为主; 短沟道 MOSFET 运输为弹道运输和准弹道运输, 其过剩噪声以散粒噪声为主. Navid 等人提出短沟道 MOSFET 总电流噪声为平衡热噪声与部分抑制的散粒噪声之和, 平衡热噪声产生于传统的漂移扩散运输, 而散粒噪声产生于弹道极限运输^[10]. 从电路角度分析, 可以将纳米 MOSFET 电流噪声等效为两种运输形式的并联, 如图 1 所示. 这一运输形式适合准弹道运输, 故准弹道纳米 MOSFET 总电流可以表示为漂移扩散运输 MOSFET 电流和弹道运输 MOSFET 电流之和, 进而准弹道纳米 MOSFET 总电流噪声为热噪声与散粒噪声之和, 即

$$S_I = S_{I,shot} + S_{I,thermal}. \quad (1)$$

漂移扩散运输 MOSFET 的热噪声为^[14]

$$\begin{aligned} S_{I,thermal} &= 4kT \frac{\mu_n}{L_{eff}^2} Q_{inv,D} \\ &= 4kT \frac{\mu_n}{L_{eff}} (1 - B_{int}) W Q(0), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $Q_{inv,D} = (1 - B_{int}) W L_{eff} Q(0)$ 为漂移扩散运输 MOSFET 沟道反型层总电荷, W 表示器件宽度, 取值为 $2 \mu\text{m}$; B_{int} 为本征弹道率, 表示弹道运输电子占总电子数的比例; L_{eff} 为有效沟道长度; 强反型条件下, $Q(0) = C_{ox}(V_{GS} - V_{Th})$, C_{ox} 为单位面积的氧化层电容, V_{Th} 为阈值电压. μ_n 为漂移扩散运输 MOSFET 有效迁移率^[14-19].

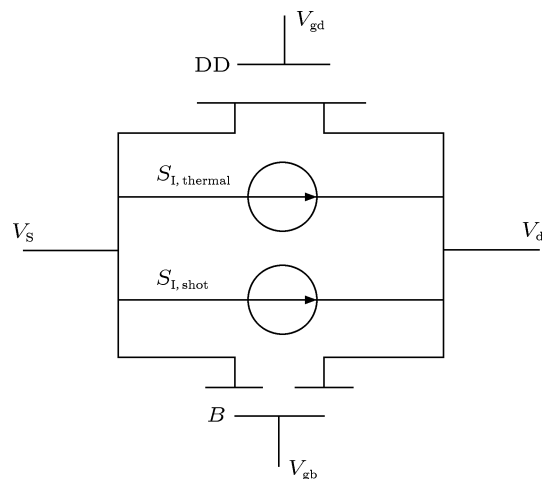


图 1 纳米 MOSFET 电流噪声等效电路图 (DD 代表漂移扩散, B 代表弹道)

准弹道 MOSFET 散粒噪声为

$$S_{I,shot} = \gamma S_{ballistic} = \gamma 2qI_B = 2\gamma qI_B, \quad (3)$$

其中 $S_{ballistic}$ 表示不考虑费米作用和库仑作用对散粒噪声的影响情况下的弹道噪声. 对于源漏重掺杂的弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声, 载流子简并作用导致明显的噪声抑制, 故引入弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声的抑制因子 γ .

在漂移扩散运输的 MOSFET 中, 其电流为^[19]

$$I_D = W Q_D(0) v_D(0), \quad (4)$$

其中 $Q_D(0) = (1 - B_{int})Q(0)$ 是漂移扩散纳米 MOSFET 势垒顶部的电荷密度. $v_D(0) = \mu_n \varepsilon_D(0)$ 表示漂移扩散纳米 MOSFET 中 kT 层平均漂移速度, $\varepsilon_D(0)$ 为 kT 层平均电场强度, 若 kT 层电场均匀, 则 $\varepsilon_D(0) = (kT/q)/L_{kT-D}$; kT 层长度由 $L_{kT-D} = L[kT/(qV_{DS})]^{2/3}$ 计算得到^[15-19].

非简并条件下, 弹道运输下的电流为^[17]

$$I_B = W Q_B(0) v_{inj} \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{kT}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{kT}\right)}, \quad (5)$$

其中 $Q_B(0) = B_{int}Q(0)$ 为弹道 MOSFET 势垒顶部单位面积电荷. v_{inj} 为接触端的发射速度^[15-17].

Lundstrom 给出准弹道电流模型 I_{DS} 为^[17]

$$\begin{aligned} I_{DS} &= W Q(0) v_{inj} \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \\ &\times \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{kT}\right)}{1 + \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{kT}\right)}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 r 为背散射系数, 定义为受到背散射而回到发射区的载流子数量与发射总量的比值, 其值可用 kT 层模型解析计算为 $r = L_{kT}/(L_{kT} + \lambda_0)$, 其中 $\lambda_0 = \frac{2kT\mu_0}{qv_{\text{inv}}}$ 为反型层载流子的平均

自由程^[15-17].

由以上分析可知, 要得到准弹道运输的散粒噪声值, 必须求出本征弹道率 B_{int} . 根据 $I_{\text{DS}} = I_{\text{B}} + I_{\text{D}}$, 结合 (4)–(6) 式可得

$$B_{\text{int}} = \frac{v_{\text{inj}} \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)}{1 + \left(\frac{1-r}{1+r}\right) \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)} - \mu_{\text{n}} \varepsilon_{\text{D}}(0)}{v_{\text{inj}} \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)} - \mu_{\text{n}} \varepsilon_{\text{D}}(0)}, \quad (7)$$

其中

$$\mu_{\text{n}} = \frac{\mu_0}{(1 + \theta(V_{\text{GS}} - V_{\text{Th}})) \left(1 + \frac{\mu_0}{v_{\text{sat}}} \varepsilon_{\text{D}}(0)\right)}. \quad (8)$$

饱和速度 $v_{\text{sat}} = 1 \times 10^5$ m/s; μ_0 为准弹道 MOSFET 低场迁移率取值为 $120 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; θ 为拟合参量^[17,19], 描述沟道垂直方向强电场对迁移率的影响, 文中取 $\theta = 0.5$.

结合 (3) 式、(5) 式和 (7) 式得到准弹道运输纳米 MOSFET 的散粒噪声为

$$S_{\text{I,shot}} = \gamma \cdot 2qB_{\text{int}}WC_{\text{ox}}(V_{\text{GS}} - V_{\text{Th}}) \times v_{\text{inj}} \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)}. \quad (9)$$

2.2 准弹道运输纳米 MOSFET 抑制因子的推导

由上节推导的 (9) 式可知, 要得到准弹道运输纳米 MOSFET 的总电流公式, 还必须知道弹道运输下的抑制因子 γ . 按照文献 [3] 推导二维弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声抑制因子的思想方法, 我们对一维弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声抑制因子进行推导. 对弹道运输的纳米 MOSFET, 假设只有最低旁带被占据, 为简化公式, 记符号 $\langle\langle\rangle\rangle$ 为

$$\langle\langle h \rangle\rangle \equiv 2 \int_0^{\infty} dE \cdot N_{1\text{D}} h, \quad (10)$$

h 为运输方向动能 E 的函数. 单位面积电子浓度可表示为

$$n_{1\text{D}} = \langle\langle f_{\text{S}}(E + E_{\text{M}}) + f_{\text{D}}(E + E_{\text{M}}) \rangle\rangle, \quad (11)$$

其中 $f_{\text{S}}(E)$ 和 $f_{\text{D}}(E)$ 为费米狄拉克占据因子, 假设传输态占据因子通过它们对 E_{M} 的静电特性直接影响 $n_{1\text{D}}$. 根据 (10) 式得

$$\delta n_{1\text{D}} = \langle\langle \delta f_{\text{S}} + \delta f_{\text{D}} \rangle\rangle + \delta E_{\text{M}} \left\langle \left\langle \frac{\partial f_{\text{S}}}{\partial E} + \frac{\partial f_{\text{D}}}{\partial E} \right\rangle \right\rangle. \quad (12)$$

应用一个特殊的单位面积栅极电容 C_{G} 来综合所有静电效应, 由此得到电子密度和旁带势垒最大值的关系

$$\delta E_{\text{M}} = q^2 \delta n_{1\text{D}} / C_{\text{G}}. \quad (13)$$

将 (12) 式代入 (13) 式, 得

$$\delta E_{\text{M}} = \frac{q^2 \langle\langle \delta f_{\text{S}} + \delta f_{\text{D}} \rangle\rangle}{C_{\text{G}} + C_{\text{QS}} + C_{\text{QD}}}, \quad (14)$$

其中

$$C_{\text{QS}} \equiv q^2 \left\langle \left\langle \frac{\partial f_{\text{S}}}{\partial E_{\text{FS}}} \right\rangle \right\rangle, \quad (15)$$

$$C_{\text{QD}} \equiv q^2 \left\langle \left\langle \frac{\partial f_{\text{D}}}{\partial E_{\text{FD}}} \right\rangle \right\rangle. \quad (16)$$

在旁带最大值时, 势垒顶部计算的弹道电流为

$$I_{\text{b}} = q \left\langle \left\langle v [f_{\text{S}}(E + E_{\text{M}}) - f_{\text{D}}(E + E_{\text{M}})] \right\rangle \right\rangle, \quad (17)$$

其中 $v = \sqrt{2E/m_{\text{t}}}$ 为运输方向的载流子速度. 从 (17) 式中可以看出 f_{S} , f_{D} 和 E_{M} 的波动直接影响电流. 考虑远离平衡的情况 $f_{\text{D}} \ll 1$, 计算时可以忽略 f_{D} , 则有

$$\delta I_{\text{b}} = q \left\langle \left\langle v \delta f_{\text{S}} + v \delta E_{\text{M}} \frac{\partial f_{\text{S}}}{\partial E} \right\rangle \right\rangle. \quad (18)$$

将 (14) 式代入 (18) 式有

$$\delta I_{\text{b}}/q = \left\langle \left\langle v \left(1 - \frac{\overline{v_{\text{S}}} C_{\text{QS}}}{C_{\text{G}} + C_{\text{QS}}} \frac{1}{v}\right) \delta f_{\text{S}} \right\rangle \right\rangle, \quad (19)$$

其中 \bar{v}_S 为速度 v 的加权平均

$$\bar{v}_S C_{QS} = -q^2 \left\langle \left\langle v \frac{\partial f_S}{\partial E_{FS}} \right\rangle \right\rangle. \quad (20)$$

考虑到电流为每个带电电荷 q 引起的电流脉

冲之和, 即 $\bar{\delta} f_S^2 = f_S(1 - f_S)$, 并且不同模式占据因子不相关, 因此, 同时包含费米作用和库仑作用对散粒噪声影响的弹道 MOSFET 散粒噪声的抑制因子为

$$\gamma = \frac{S}{2qI_b} = \frac{\left\langle \left\langle v \left(1 - \frac{\bar{v}_S C_{QS}}{C_G + C_{QS}} \frac{1}{v}\right)^2 f_S(1 - f_S) \right\rangle \right\rangle}{\langle \langle v f_S \rangle \rangle}. \quad (21)$$

把上式代入 (9) 式得到准弹道纳米 MOSFET 散粒噪声值为

$$S_{I, \text{shot}} = 2qB_{\text{int}}WC_{\text{ox}}(V_{\text{GS}} - V_{\text{Th}})v_{\text{inj}} \times \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)\right) \left\langle \left\langle v \left(1 - \frac{v_S C_{QS}}{C_G + C_{QS}} \frac{1}{v}\right)^2 f_S(1 - f_S) \right\rangle \right\rangle}{\left(1 + \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)\right) \langle \langle v f_S \rangle \rangle}. \quad (22)$$

由散粒噪声抑制因子的公式可得, 准弹道纳米 MOSFET 散粒噪声总抑制因子 (费米和库仑共同作用的抑制因子) 为

$$F = \frac{S_{I, \text{shot}}}{2qI_{\text{DS}}} = B_{\text{int}}WC_{\text{ox}}(V_{\text{GS}} - V_{\text{Th}})v_{\text{inj}} \times \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)\right) \left\langle \left\langle v \left(1 - \frac{v_S C_{QS}}{C_G + C_{QS}} \frac{1}{v}\right)^2 f_S(1 - f_S) \right\rangle \right\rangle}{I_{\text{DS}} \left(1 + \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)\right) \langle \langle v f_S \rangle \rangle}, \quad (23)$$

其中 $f_S(1 - f_S) = f_S - f_S^2$ 项体现费米作用, 当 $f_S \ll 1$ 时, 可忽略高阶小量. 此时 (23) 式主要体现库仑抑制作用, 则抑制因子就为库仑作用下的抑制因子, 可表示为

$$F_C = B_{\text{int}}WC_{\text{ox}}(V_{\text{GS}} - V_{\text{Th}})v_{\text{inj}} \times \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)\right) \left\langle \left\langle v \left(1 - \frac{v_S C_{QS}}{C_G + C_{QS}} \frac{1}{v}\right)^2 f_S \right\rangle \right\rangle}{I_{\text{DS}} \left(1 + \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)\right) \langle \langle v f_S \rangle \rangle}, \quad (24)$$

$\left(1 - \frac{v_S C_{QS}}{C_G + C_{QS}} \frac{1}{v}\right)^2$ 项体现库仑作用. 当 $\left(1 - \frac{v_S C_{QS}}{C_G + C_{QS}} \frac{1}{v}\right)^2 = 1$ 时, (23) 式主要体现费米抑制作用, 则抑制因子就为费米作用下的抑制因子, 可表示为

$$F_F = B_{\text{int}}WC_{\text{ox}}(V_{\text{GS}} - V_{\text{Th}})v_{\text{inj}} \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)\right) \langle \langle v f_S(1 - f_S) \rangle \rangle}{I_{\text{DS}} \left(1 + \exp\left(-\frac{qV_{\text{DS}}}{kT}\right)\right) \langle \langle v f_S \rangle \rangle}. \quad (25)$$

由以上的推导公式可知, 要得到准弹道纳米 MOSFET 散粒噪声的各抑制因子, 就必须求出势垒顶部能量 E_M . 下面我们推导 E_M 的关系式, 对弹道运输纳米 MOSFET 一维静电势, 栅极电压为沟道表面势和氧化层压降之和^[20], 表示为

$$V'_{\text{GS-B}} = \psi_S - Q/C_{\text{ox}}, \quad (26)$$

其中 $V'_{\text{GS-B}} = V_{\text{GS-B}} - V_{\text{FB-B}}$, $V_{\text{GS-B}}$ 是弹道运输纳米 MOSFET 的栅极电压, $V_T = V_{\text{FB-B}} + (4\epsilon_0\epsilon_s N_A \Phi_F)^{1/2}/C_{\text{ox}} + 2\Phi_F$ 为阈值电压, $\Phi_F = (kT/q) \ln(N_A/n_i)$, N_A 为沟道掺杂浓度, n_i 为本征载流子浓度, C_{ox} 为单位面积氧化层电容, $V_{\text{FB-B}}$ 为弹道 MOSFET 的平带电压; ψ_S 为功函数; Q 为势垒顶部的电荷. 可以将 (26) 式写作

$$V'_{GS-B} = \frac{-E_M}{q} + \frac{qn_S}{C_{ox}} \quad (27)$$

上式将势垒顶部能量 E_M 与 V'_{GS-B} 和势垒顶部电荷联系起来. 对于弹道运输 MOSFET, 由于势垒顶部载流子能量由源区发射的速度为正的载流子和漏区发射的速度为负的两部分载流子组成, 因此势垒顶部载流子能量和势垒顶部电荷存在以下关系:

$$n_S = \frac{N_{1D}}{2} \left\{ \exp[(E_F - E_M)/kT] + \exp[(E_F - qV_{DS} - E_M)/kT] \right\}, \quad (28)$$

其中 $N_{1D} = \sqrt{2m^*}/\pi\hbar$ 为一维有效态密度, E_F 为费米能级. 对于给定的 V'_{GS-B} 和 V_{DS} , 通过求解方程 (27) 和 (28) 可以得到弹道运输 MOSFET 势垒顶部载流子数 n_S 及势垒能最大值 E_M , 进而就得到准弹道纳米 MOSFET 散粒噪声的各抑制因子.

3 准弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声的抑制特性分析

为了研究准弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声在费米作用、库仑作用和二者共同作用下的抑制因子随栅极电压、源漏电压、温度和掺杂浓度的变化关系, 本文取 MOSFET 沟道长度 L 为 10 nm.

3.1 偏置电压对散粒噪声抑制的影响分析

准弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声的费米抑制因子 (F_F)、库仑抑制因子 (F_C) 和总抑制因子 (F) 随源漏电压的变化关系如图 2 所示. 从图中纵坐标的抑制因子值可以看出, 准弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声各抑制因子随源漏电压的增加而略有增加, 且总抑制作用比费米抑制作用和库仑抑制作用强. 随着源漏电压的增大, 沟道中载流子所受的非弹性散射减小, 进而库仑作用减弱, 库仑抑制因子增大, 库仑抑制作用减弱^[21]. 同时, 随着源漏电压的增加势垒高度降低, 而势垒高度降低费米作用会减弱^[22-24], 进而费米抑制因子增大. 从文献 [1] 给出的纳米 MOSFET 实验图中可以得到, 随源漏电压增大, 散粒噪声的总抑制因子变化幅度不大, 这与我们理论结果的变化趋势相一致, 从而也对文献 [1] 的实验结果给出了理论解释.

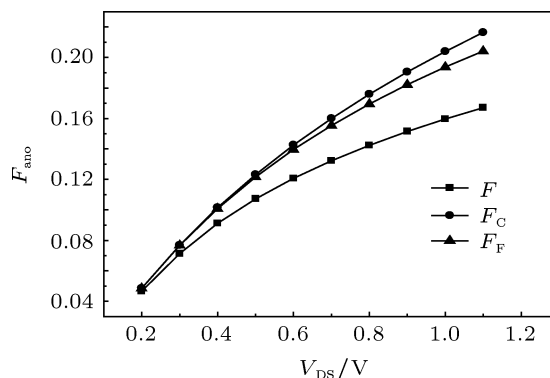


图 2 散粒噪声抑制因子随源漏电压的变化关系曲线 (计算中栅极电压 V_{GS} 为 0.4 V, 温度 T 为 300 K, 源漏掺杂浓度 N_{SD} 为 $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$)

文献 [1] 的实验结果表明纳米 MOSFET 散粒噪声抑制随栅极电压的增加而增强, 而我们的模型也得到了相同的结论, 如图 3 所示. 图中各抑制因子随栅极电压的增大而减小, 即就是散粒噪声抑制随栅极电压的增加而增强, 且总抑制作用比费米抑制作用和库仑抑制作用强. 随着栅极电压的增加, 沟道势垒高度随着栅极电压的增加而降低, 沟道中的载流子数增多, 增加栅极可以使载流子所受非弹性散射的次数增加从而增强库仑作用导致散粒噪声的抑制^[21], 同时也使载流子简并度提高从而增强泡利不相容原理的抑制^[25,26]. 可见, 我们给出各抑制因子随栅极电压的变化趋势不仅与介观导体散粒噪声的抑制结论相符合, 也与纳米 MOSFET 在实验上得到散粒噪声总抑制因子随栅极电压的变化趋势相一致.

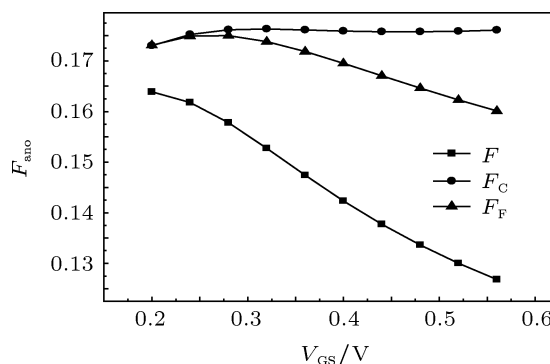


图 3 散粒噪声抑制因子随栅极电压的变化关系曲线 (计算中源漏电压 V_{DS} 为 0.8 V, 温度 T 为 300 K, 源漏掺杂浓度 N_{SD} 为 $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$)

3.2 温度及源漏掺杂浓度对散粒噪声抑制的影响分析

纳米 MOSFET 过剩噪声主要成分的转变条件

指出温度的升高会阻碍散粒噪声成为过剩噪声主要成分, 因为散粒噪声抑制将随温度的升高而增强, 本文结果证实了散粒噪声抑制的这一特性. 准弹道纳米 MOSFET 散粒噪声各抑制因子随温度变化曲线如图 4 所示. 从图中可以看出, 总抑制因子随着温度的升高而减小, 这与文献 [9] 给出纳米 MOSFET 的抑制随温度的变化规律是一致的, 费米抑制因子和库仑抑制因子也随温度的增大而减小. 随着温度的升高, 平均声子数增多, 声子散射 (非弹性散射) 次数增加, 散粒噪声抑制增强 [21]. 因此, 准弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声抑制会随温度的升高而增强, 温度越低其电流噪声的散粒噪声特性越明显, 也就是温度越低散粒噪声在电流噪声中所占比例越大.

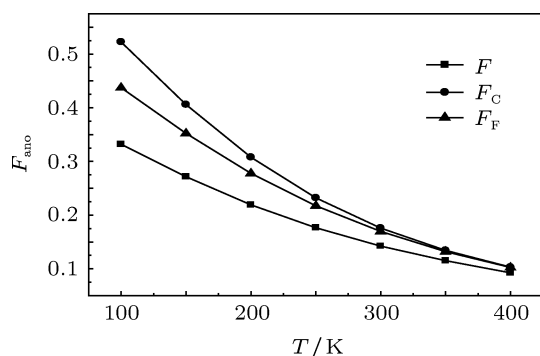


图 4 散粒噪声抑制因子随温度的变化关系曲线 (计算中源漏电压 V_{DS} 为 0.8 V, 栅极电压 V_{GS} 为 0.4 V, 源漏掺杂浓度 N_{SD} 取 $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$)

图 5 为散粒噪声抑制因子随源漏掺杂浓度变化的曲线图, 从图中可以看出, 准弹道纳米 MOSFET 中, 各因子随着源漏掺杂浓度的增加而减小, 源区掺杂浓度越高, 散粒噪声受抑制越强, 且总抑制作用比费米抑制作用和库仑抑制作用强. 提高掺杂浓度可以增加载流子简并度进而增加泡

利不相容原理对散粒噪声的抑制 [25,26], 同时使德拜长度 L_{DC} ($L_{DC} = \sqrt{\epsilon kT / (q^2 N_{SD})}$) 缩短, 增强空间电荷效应, 使库仑作用抑制也增强 [26,27].

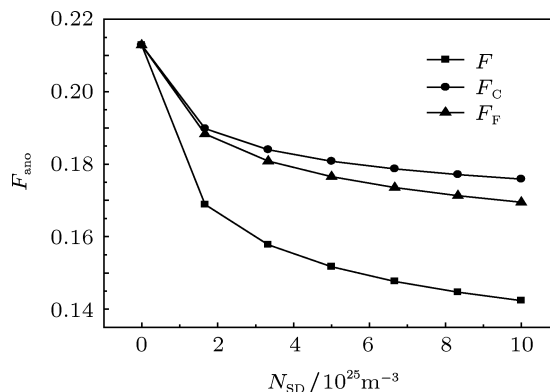


图 5 散粒噪声抑制因子随源漏掺杂浓度的变化关系曲线 (计算中源漏电压 V_{DS} 为 0.8 V, 栅极电压 V_{GS} 为 0.4 V, 温度 T 为 300 K)

4 结论

本文基于 Navid 模型, 推导了准弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声在费米作用、库仑作用和二者共同作用下的抑制因子公式, 在此基础上研究了各抑制因子随源漏电压、栅极电压、温度和源漏掺杂浓度的变化趋势. 从理论上解释了准弹道运输纳米 MOSFET 散粒噪声总抑制因子随源漏电压的变化特性, 同时也给出了库仑抑制因子和费米抑制因子随源漏电压变化特性. 结果表明, 各抑制因子随源漏电压的增大而增大, 但变化不是很明显. 另外, 我们得到随着栅极电压的增大、温度的升高、源漏掺杂浓度的增加, 各抑制因子均减小. 本论文所建立的模型能定量描述器件的散粒噪声抑制, 为器件过剩噪声抑制和散粒噪声用于运输信息表征奠定基础, 对器件低噪声化具有重要的指导意义.

[1] Jeon J, Lee J, Kim J, Park C H, Lee H, Oh H, Kang H K, Park B G, Shin H 2009 *Symposium on VLSI Technology* Honolulu, June 16—18, 2009, 48
 [2] Tang D H, Du L, Wang T L, Chen H, Chen W H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 107201 (in Chinese) [唐冬和, 杜磊, 王婷岚, 陈华, 陈文豪 2011 物理学报 **60** 107201]
 [3] Iannaccone G 2004 *J. Comput. Electron.* **3** 199
 [4] Mugnaini G, Iannaccone G 2006 *J. Comput. Electron.* **5** 91
 [5] Timp G, Bude J, Bourdelle K K, Garno J, Ghetti A, Gossmann

H, Green M, Forsyth G, Kim Y, Kleiman R, Klemens F, Kornblit A, Lochstampfer C, Mansfield W, Moccio S, Sorsch T, Tennant D M, Timp W, Tung R 1999 *Electron Devices Meeting 1999 IEDM Technical Digest. International Washington DC, USA*, December 5—8, 1999 p55
 [6] Palestri P, Esseni D, Eminente S, Fiegan C, Sangiorgi E, Selmi L 2005 *IEEE T. Electron. Dev.* **52** 2727
 [7] Eminente S, Esseni D, Palestri P, Fiegan C, Selmi L, Sangiorgi E 2005 *IEEE T. Electron. Dev.* **52** 2736

- [8] Isobe Y, Hara K, Navarro D, Takeda Y, Ezaki T, Miura-mattausch M 2007 *IEICE Transactions On Electronics*. **90** 885
- [9] Navid R, Jungemann C, Lee T, Dutton R 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 124501
- [10] Navid R, Dutton R W 2002 *International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices* Kobe, Japan, September 4—6 2002 p75
- [11] Tang D H, Du L, Wang T L, Chen H, Jia X F 2011 *Acta Phy. Sin.* **60** 097202 (in Chinese) [唐冬和, 杜磊, 王婷岚, 陈华, 贾晓菲 2011 物理学报 **60** 097202]
- [12] An X T, Li Y X, Liu J J 2007 *Acta Phy. Sin.* **56** 4105 (in Chinese) [安兴涛, 李玉现, 刘建军 2007 物理学报 **56** 4105]
- [13] Chen H, Du L, Zhuang Y Q 2008 *Acta Phy. Sin.* **57** 2438 (in Chinese) [陈华, 杜磊, 庄奕琪 2008 物理学报 **56** 2438]
- [14] Ji Y, Nan L, Mouthaan K 2009 *Asia Pacific Microwave Conference* Singapore, Singapore December 07—10 2009 p1659
- [15] Lundstrom M 1997 *IEEE Electron Dev. Lett.* **18** 361
- [16] Martin J S, Bournel A, Dollfus P 2004 *IEEE T. Electron. Dev.* **51** 1148
- [17] Rahman A, Lundstrom M S 2002 *IEEE T. Electron. Dev.* **49** 481
- [18] Khanna V K 2004 *Phys. Rep.* **398** 67
- [19] Ong S N, Yeo K S, Chew K W J, Chan L H K, Loo X S, Do M A, Boon C C 2010 *12th International Symposium on Integrated Circuits Singapore*, Singapore December 14—16 2009 p556
- [20] Lundstrom M, Guo J 2006 *Nanoscale Transistors: Device Physics, Modeling and Simulation* (Beijing: Science Press) p105
- [21] Naveh Y, Averin D, Likharev K 1998 *Phys. Rev. B* **58** 15371
- [22] Lundstrom M, Ren Z, Datta S 2002 *IEEE T. Electron Dev.* **49** 133
- [23] Rahman A, Guo J, Datta S, Lundstrom M S 2003 *IEEE T. Electron Dev.* **50** 1853
- [24] Rhew J H, Ren Z, Lundstrom M S 2002 *Solid State Electron.* **46** 1899
- [25] Bulashenko O, Rubí J 2001 *Phys. Rev. B* **64** 45307
- [26] Gomila G, Cantalapiedra I, González T, Reggiani L 2002 *Phys. Rev. B* **66** 75302
- [27] González T, Mateos J, Pardo D, Bulashenko O, Reggiani L 1999 *Phys. Rev. B* **60** 2670

Research on shot noise suppression in quasi-ballistic transport nano-MOSFET*

Jia Xiao-Fei^{1)2)†} Du Lei¹⁾ Tang Dong-He¹⁾ Wang Ting-Lan¹⁾ Chen Wen-Hao¹⁾

1) (*School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Department of Electronic and Information Engineering, Ankang University, Ankang 725000, China*)

(Received 13 September; revised manuscript received 18 November 2011)

Abstract

Previous studies of shot noise suppression in nano-MOSFET either ignored its suppression or emphasized only its existence but gave no deeper research. In this paper, based on the Navid model, the expressions of shot noise suppression factor (Fano) in quasi-ballistic transport nano-MOSFETs are derived with separately considering Fermi effect, Coulomb interaction and the combination of the two effects. The variations of suppression-factors with source-drain voltage, gate voltage, temperature and source-drain doping are investigated. The results we obtained with considering the combination of the two effects are consistent with those from experiments, and the theoretical explanation is given.

Keywords: shot noise, Fano, nano-MOSFET

PACS: 72.70.+m, 72.10.-d, 73.40.Qv

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61076101).

† E-mail: jiaxiaofei-ab@163.com