



论文

基于纳米 MOSFET 噪声的背散射系数研究

贾晓菲^{①*}, 何亮^②^① 安康学院电子与信息工程系, 安康 725000;^② 西安电子科技大学先进材料与纳米科技学院, 西安 710071

*联系人, E-mail: jiaxiaofei-ab@163.com

收稿日期: 2013-08-19; 接受日期: 2013-10-12

陕西省教育厅 2013 年科学研究计划(自然科学专项)(编号: 2013K1115, 12JK0971)、国家自然科学基金(批准号: 61106062)、中央高校基本科研业务费专项资金(编号: K50511050007)和安康学院高层次人才科研专项经费科研项目(编号: AYQDZR201206)资助

摘要 传统噪声理论提取背散射系数时, 引入的参量较多并依赖量子力学计算, 或是采取大量的假设而使得到的结论存在偏差. 本文将基于 Navid 模型推导 MOSFET 噪声的背散射系数, 进一步得到了短沟道器件在线性区和饱和区的背散射系数, 并给出测量背散射系数的方法. 在此基础上, 对背散射系数随沟道长度、偏置电压和温度的变化特性进行分析, 除此之外, 用实验和 Monte Carlo 模拟验证了背散射系数与偏置电压特性, 该方法得到的背散射系数与各参量的变化特性与文献给出的结果相吻合.

关键词 纳米 MOSFET, 背散射系数, 散粒噪声

PACS: 73.40.Qv, 72.20.Dp, 72.70.+m

doi: 10.1360/132013-357

随着 MOSFET 沟道长度的缩短, 沟道中载流子运输机制将从包含大量散射过程的漂移扩散运输逐渐过渡到经历少量散射的准弹道运输, 与此同时, 器件中的主要噪声成分也从热噪声转变为散粒噪声^[1–4]. 实验和模拟结果表明, 在器件沟道长度小于 30 nm 的情形下, 准弹道运输将会非常显著^[5–7]. 目前, 先进的 CMOS 器件已经面临准弹道运输问题, 但是对其研究尚不深入, 为此研究纳米尺度下器件的准弹道运输特性对于建立器件模型和优化器件的设计具有重要作用.

背散射系数作为研究准弹道运输的关键参量, 描述器件电流与弹道极限之间的差距. 实验中观察到硅纳米线晶体管(SNWT)中背散射系数在不同运输

区呈现不同特性, 尤其在弹道和扩散漂移运输的过渡区, 背散射系数与沟道长度的关系出现一段平台区, 如图 1 所示^[8,9]. 因此, 准确提取背散射系数对运输机制研究起关键作用.

目前已有诸多关于背散射系数的提取方法, 如: 源漏电流法、跨导法、温度法等^[10,11]. 这些方法均是从 Lundstrom 推导的漏极电流与背散射系数关系公式出发, 一是按照公式直接拟合提取, 二是通过电流关系式对温度求导数来提取. 最近文献引入寄生电阻与温度的关系对后一方法予以修正. 这两种提取背散射系数方法都存在问题, 前一种需要参量较多, 有些还依赖于量子力学计算来确定^[12,13]; 后一种方法本身引入了大量假设, 使提取的背散射系数严重偏

引用格式: 贾晓菲, 何亮. 基于纳米 MOSFET 噪声的背散射系数研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 185–193

Jia X F, He L. Research on backscattering coefficient based on nano-MOSFET noise (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 185–193, doi: 10.1360/132013-357

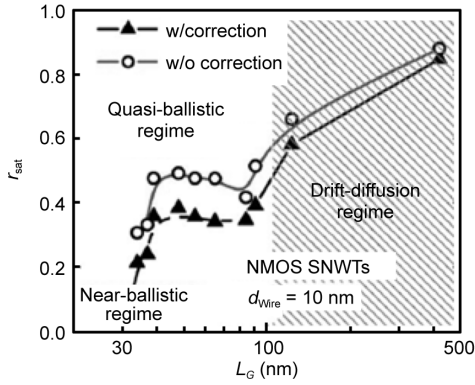


图1 n-SNWTs 饱和区背散射系数与沟道长度的关系, —▲— 与—○—分别对应考虑/不考虑温度对源电阻的影响^[9]

Figure 1 Extracted r_{sat} in n-channel SNWTs, comparing the extraction methods with and without the temperature dependence of R_s (account into the impact of R_D).

低^[14]. 因此, 建立噪声与输运参量背散射系数之间的联系, 可用于指导基于噪声的背散射系数提取.

Navid 等人指出纳米 MOSFET 散粒噪声和介观导体散粒噪声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, 并得到了纳米 MOSFET 的电流噪声公式, 但没有具体得到电流噪声与参量的关系. 本文将基于 Navid 模型推导实际纳米 MOSFET 的噪声, 在此基础上, 得到了噪声与背散射系数的关系式, 进一步给出器件在线性区与饱和区的背散射系数. 然后, 对背散射系数随沟道长度、偏置电压和温度的变化特性进行分析. 最后, 提出测量背散射系数的试验方法, 用实验和 Monte Carlo 模拟来验证线性区和饱和区噪声与偏置电压的关系, 并分析背散射系数与偏置电压的变化特性.

1 理论基础及提取方法

输运与噪声之间有紧密的联系. 文献[2]给出沟道长度为 20 nm 的 MOSFET 在一定偏置条件下, 弹道率为 0.3, 器件以热噪声为主; 沟道长度为 10 nm 的器件在一定的条件下, 弹道率达 0.5, 噪声呈散粒噪声特性. 弹道率 B 可以用背散射系数 r 表示: $B=(1-r)/(1+r)$. 明确背散射系数与噪声之间的关系, 对研究输运及噪声都有重要意义.

现对纳米 MOSFET 噪声与输运的研究大多是独立的, 但介观导体中对输运与噪声已有诸多成果. 亚

100 nm MOSFET 的沟道本质上是一种介观导体, 与介观导体结构不同的是沟道输运特性由栅极电压控制. 栅极电压的作用是给沟道一个额外的横向电场, 来改变载流子的表面散射, 但栅极电压并不能改变器件的介观输运特性. 介观导体非平衡噪声功率谱密度可以表示为^[15]

$$S_I = 4KTG_D \sum_{j=1}^J T_j + 2QI_{\text{tot}} \left(1 - \sum_{j=1}^J T_j \right). \quad (1)$$

式中第一项为平衡热噪声, 第二项为部分抑制的散粒噪声. Navid 等人^[16]指出纳米尺度 MOSFET 散粒噪声和介观导体散粒噪声的物理起源是一致的, 并运用介观散粒噪声理论对短沟道 MOSFET 电流噪声进行了研究, 得到短沟道 MOSFET 电流噪声为

$$S_I = S_I^{\text{Equ}} + N(V_{\text{gs}}, V_{\text{ds}}) \cdot 2qI_{\text{tot}}. \quad (2)$$

即噪声为平衡热噪声及部分抑制的散粒噪声之和. $N(V_{\text{gs}}, V_{\text{ds}})$ 是描述散射机制的系数, 散射越强, $N(V_{\text{gs}}, V_{\text{ds}})$ 越小, 散粒噪声抑制更强, 输运越接近于扩散漂移, 热噪声成分越明显. 反之, 输运越接近弹道, 散粒噪声成分越明显. 文献[17]建立了准弹道输运纳米 MOSFET 散粒噪声模型, 并将载流子分为弹道电子和漂移扩散电子, 漂移扩散电子产生平衡热噪声, 而弹道电子产生散粒噪声. 弹道电子与漂移扩散电子的比例由本征弹道率 B_{int} 决定, 表示弹道输运电子占总电子数的比例, 得到本征弹道率为

$$B_{\text{int}} = \frac{v_{\text{inj}} \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \frac{1 - \exp(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT})}{1 + \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \exp(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT})} - \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L}}{\frac{1 - \exp(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT})}{1 + \exp(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT})} - \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L}}. \quad (3)$$

其中

$$\mu_n = \frac{\mu_0}{\left(1 + \theta(V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}) \right) \left(1 + \frac{\mu_0}{v_{\text{sat}}} \varepsilon_D(0) \right)}$$

是有效迁移率, μ_0 为实际纳米 MOSFET 低场迁移率, θ 为拟合参量; v_{inj} 为载流子注入速度; 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^[18-20].

结合文献[17], 得到非简并条件下的模型总噪声为

$$\begin{aligned} S &= S_{I,\text{shot}} + S_{I,\text{thermal}} Q(0) \\ &= 2qB_{\text{int}} WQ(0) v_{\text{inj}} \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)} \\ &\quad + 4kT \frac{\mu_n}{L_{\text{eff}}^2} (1 - B_{\text{int}}) WQ(0). \end{aligned} \quad (4)$$

其中, W 表示器件宽度; L_{eff} 为有效沟道长度; 强反型条件下, $Q(0) = C_{\text{ox}}(V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})$, C_{ox} 为单位面积的氧化层电容, V_{th} 为阈值电压^[18-23].

将式(3)代入上式, 得

$$\begin{aligned} S &= 2q \frac{v_{\text{inj}} \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)}{1 + \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)} - \mu_n \varepsilon_D(0^+)}{v_{\text{inj}} \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)} - \mu_n \varepsilon_D(0^+)} \\ &\quad \times WQ(0) v_{\text{inj}} \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)} + 4kT \frac{\mu_n}{L_{\text{eff}}} \\ &\quad \times \left[1 - \frac{v_{\text{inj}} \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)}{1 + \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)} - \mu_n \varepsilon_D(0^+)}{v_{\text{inj}} \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)} - \mu_n \varepsilon_D(0^+)} \right] \\ &\quad \times WQ(0). \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\varepsilon_D(0)$ 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 $L_{kT-D} = L[kT/(qV_{\text{ds}})]^\alpha$, 其中 α 为拟合参量, $V_{\text{ds}} \rightarrow 0$ 时, $L_{kT} = L$, 准弹道输运情况下, $2/3 < \alpha < 3/4$, α 值通过 I - V 曲线拟合提取^[20].

上面我们提到, 随着沟道长度的缩小, MOSFET 器件的电流噪声以散粒噪声为主, 因此下面推导散粒噪声和背散射系数的关系. 在弹道电子产生的散

粒噪声为

$$\begin{aligned} S_{\text{shot}} &= 2qI_{\text{ballistic}} B_{\text{int}} = 2qI_{\text{ballistic}} \\ &\quad \times \frac{v_{\text{inj}} \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)}{1 + \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)} - \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L}}{v_{\text{inj}} \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{qV_{\text{ds}}}{kT}\right)} - \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L}}. \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $I_{\text{ballistic}}$ 为弹道极限电流.

当 $kT \gg qV_{\text{ds}}$, 器件处于线性区时, 式(6)化简为

$$\begin{aligned} S_{\text{shot_lin}} &= 2qI_{\text{ballistic}} \\ &\quad \times \frac{v_{\text{inj}} (1-r_{\text{lin}}) \frac{qV_{\text{ds}}}{2kT} - \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L}}{v_{\text{inj}} \frac{qV_{\text{ds}}}{kT} - \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L}}. \end{aligned} \quad (7)$$

根据式(7)得线性区背散射系数:

$$\begin{aligned} r_{\text{lin}} &= 1 - \frac{S_{\text{shot_lin}} \cdot \left(v_{\text{inj}} \frac{qV_{\text{ds}}}{kT} - \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L} \right)}{2qI_{\text{ballistic}}} \\ &\quad + \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L} \cdot \frac{2kT}{v_{\text{inj}} qV_{\text{ds}}}. \end{aligned} \quad (8)$$

当 $kT \ll qV_{\text{ds}}$, 器件处于饱和区时, 式(6)化简为

$$\begin{aligned} S_{\text{shot_sat}} &= 2qI_{\text{ballistic}} \frac{v_{\text{inj}} \frac{1-r_{\text{sat}}}{1+r_{\text{sat}}} - \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L}}{v_{\text{inj}} - \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L}}. \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)得饱和区的背散射系数为

$$\begin{aligned} \frac{1-r_{\text{sat}}}{1+r_{\text{sat}}} &= \left[\frac{S_{\text{shot_sat}} \cdot \left(v_{\text{inj}} - \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L} \right)}{2qI_{\text{ballistic}}} + \mu_n \left(\frac{kT}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{V_{\text{ds}}^{2/3}}{L} \right] \frac{1}{v_{\text{inj}}}. \end{aligned} \quad (10)$$

2 理论结果分析

根据上一节推导的纳米 MOSFET 计算公式, 本节以公式(5)来分析纳米 MOSFET 电流噪声同运输参量之间的联系. 为避免阈值电压 V_{th} 的计算, 定义变量 $V_{gt}=V_{gs}-V_{th}$. 计算过程中, $\mu_{sat}=1\times 10^5$ m/s, $\mu_0=120$ cm²/V s, $\theta=0.5$, $W=2$ μ m, $a=0.7$.

2.1 背散射系数与沟道长度的关系

沟道长度越短, 器件噪声越接近全散粒噪声模型, 沟道长度越长, 器件噪声就越接近热噪声. 沟道长度缩短, 散射就减少, 进而背散射系数减小, 本征弹道率增加, 如图 2 所示. 图 3 表明背散射系数的减小, 载流子输运从漂移扩散输运变为弹道输运, 器件噪声更接近于散粒噪声, Fano 因子增加. 沟道缩短导致非弹性散射次数减少和空间电荷效应减弱, 从而使库仑作用对散粒噪声的抑制减弱, 散粒噪声大于热噪声成为过剩噪声主要成分^[24-28].

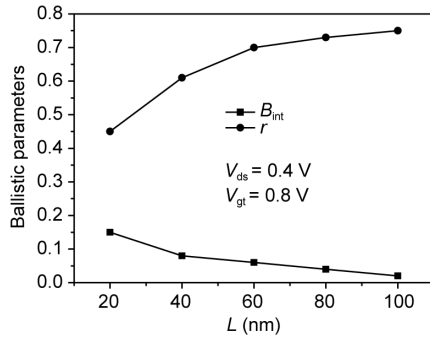


图 2 背散射系数及本征弹道率与沟道长度的关系

Figure 2 The variation of backscattering coefficient and intrinsic ballistics with channel length.

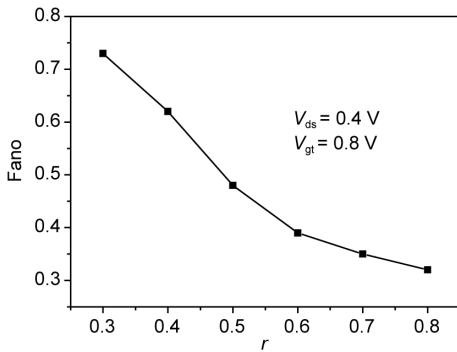


图 3 Fano 因子与 r 的关系

Figure 3 The variation of suppression-factors with backscattering coefficient.

2.2 背散射系数与偏置电压的关系

随着源漏电压增加, 器件噪声从热噪声转变为散粒噪声. 这是因为源漏电压较低时, 沟道中存在较多散射, 载流子接近漂移扩散输运, 器件以热噪声为主. 低源漏电压下热噪声大于全散粒噪声^[2], 且背散射系数随源漏电压增加而急剧减小, 这主要是与背散射计算时所用的 kT 层模型有关, 当源漏电压很小时, 将引入很大误差, 因此分析时忽略低源漏电压区. 由图 4 可知, 刚开始随着源漏电压的增加, 背散射系数减小, 本征弹道率增加, 器件输运接近于弹道输运, 噪声也就接近于散粒噪声. 图 5 中饱和区 Fano 因子随着背散射系数减小而增加, 线性区由于热噪声大于散粒噪声, Fano 因子不予讨论.

对器件输运与栅极电压的关系, 由于 kT 层长度计算过程中没有计算 V_{gs} 的影响, 实际上 V_{gs} 控制沟道电势分布, 对 kT 层计算有很大影响. 因此用经验公式研究背散射系数与 V_{gs} 的关系可能出现误差. 为了

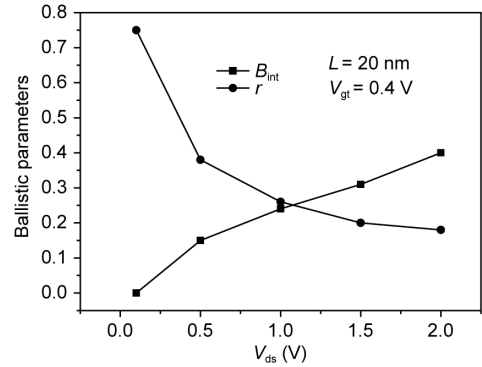


图 4 背散射系数及本征弹道率与源漏电压的关系

Figure 4 The variation of backscattering coefficient and intrinsic ballistics with source-drain voltage.

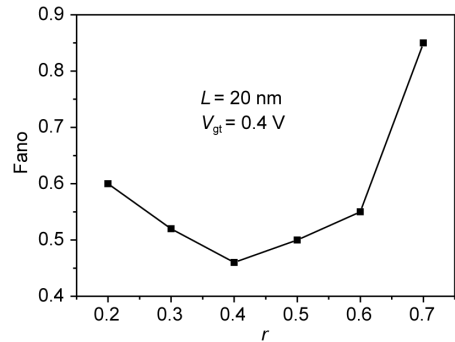


图 5 Fano 因子与背散射系数的关系

Figure 5 The variation of suppression-factors with backscattering coefficient.

准确得到噪声与栅极电压的关系, 需通过实验或模拟提取背散射系数, 并将其代入(5)式进行计算. 利用普度大学的模拟工具 QuaMC2D 模拟 $L=10$ nm, $V_{ds}=0.4$ V 在不同栅极电压下的弹道和准弹道电流. 图 6 为从 QuaMC2D 提取的背散射系数与栅极电压的关系, 将其背散射系数代入(5)式来研究噪声与运输的关系. 随着栅极电压增加, 背散射系数增加, 本征弹道率减小. 栅极电压使纵向电场增加, 从而导致载流子散射增强, 故噪声逐渐从全散粒噪声向热噪声转变, 该现象与实验测量结果相同^[2]. 除此之外, 栅极电压的增加使反型层电子增多, 载流子简并度提高, 使费米作用对散粒噪声的抑制增强. 故随着栅极电压增加, 背散射系数增加, Fano 因子减小, 散粒噪声抑制增强^[26-28], 如图 7 所示.

2.3 背散射系数与温度的关系

对低掺杂器件, 沟道中的电离杂质较少, 散射机

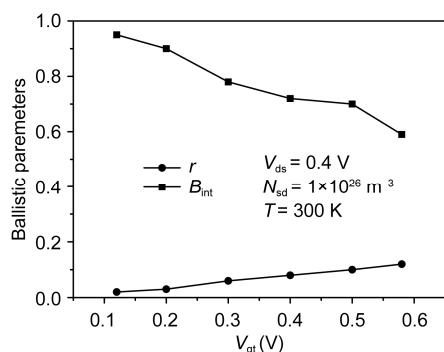


图 6 背散射系数及本征弹道率与栅极电压的关系

Figure 6 The variation of backscattering coefficient and intrinsic ballisticity with gate voltage.

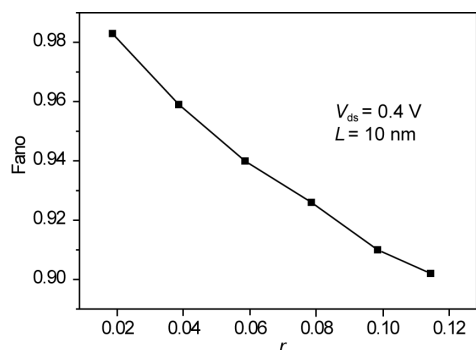


图 7 Fano 因子与背散射系数的关系

Figure 7 The variation of suppression-factors with backscattering coefficient.

构以声学波散射为主. 随着温度减小, 声学波散射减小, 本征弹道率增加, 背散射系数减小, 如图 8 所示, 故器件输运接近弹道输运, 噪声从热噪声转变为散粒噪声, 这与 Monte Carlo 模拟得到的结果一致^[16]. 图 9 也表明, 背散射系数减小, Fano 因子增加, 噪声接近于散粒噪声.

3 实验与模拟结果分析

根据公式(8)及(10), 若已知 S_{shot} , μ_n 及 $I_{ballistic}$, 则可以得到线性区及饱和区背散射系数. 参数提取步骤如下所述.

(1) 确定模拟条件: 源漏电压、栅极电压、沟道长度、掺杂浓度等.

(2) 选取合适的模拟总时间 T 及时间步长 dt , 进行 Monte Carlo 模拟; 模拟总时间 T 和时间步长 dt 的选取与要得到的噪声谱有关. 采用有限大小的时间

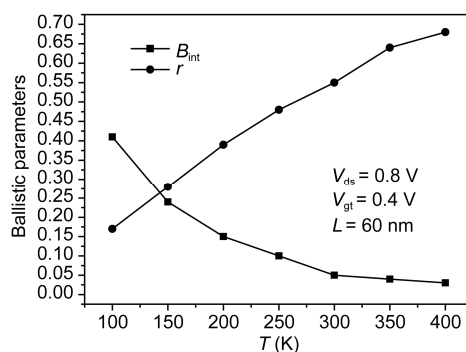


图 8 背散射系数及本征弹道率与温度的关系

Figure 8 The variation of backscattering coefficient and intrinsic ballisticity with temperature.

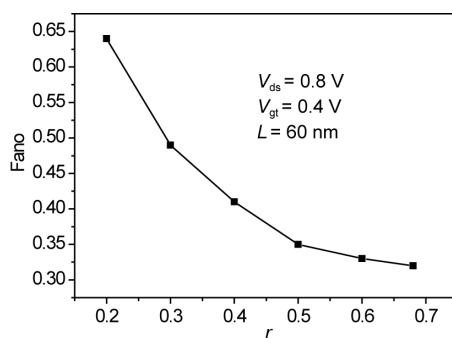


图 9 Fano 因子与背散射系数的关系

Figure 9 The variation of suppression-factors with backscattering coefficient.

步长 dt , 能够在模拟中复现的最高噪声频率为: $f_M = 1/(2dt)$. 若用于噪声统计的总模拟时间为 $T = Ndt$, 则频率低于 $1/T$ 的噪声也将观察不到 $f_M = 1/T$. 本文模拟时选取 $dt = 1 \times 10^{-15}$ s, $T = 5 \times 10^{-10}$ s, 可观察到的噪声频率范围为: $2 \sim 5 \times 10^5$ GHz, 此高频情况下, 可以忽略 $1/f$ 噪声等低频噪声.

(3) 对弹道 MOSFET 进行 Monte Carlo 模拟, 采集电流时间序列 $I_{\text{ballistic}}(t)$, 计算平均电流 $I_{\text{ballistic}}$.

(4) 对准弹道 MOSFET 进行 Monte Carlo 模拟, 采集电流时间序列 $I_{\text{ds}}(t)$, 并通过傅里叶变换得到总漏电流噪声功率谱密度 S .

(5) 应选取合适的源漏电压 V_{ds} , 模拟低源漏电压下的源漏电流, 计算低源漏电导 G_{d0} :

$$G_{\text{d0}} = \frac{dI_{\text{ds}}}{dV_{\text{ds}}} \Big|_{V_{\text{ds}}=0, V_{\text{gs}}=\text{const}} = \frac{I_{\text{ds}}}{V_{\text{ds}}} \Big|_{V_{\text{ds}} \rightarrow 0, V_{\text{gs}}=\text{const}} \quad (11)$$

由于电场强度增强到 10^3 V/cm 以上时, 电流密度与电场强度不再成正比, 偏离欧姆定律. 因此, 选取源漏电压时, 应使沟道方向电场尽量满足: $E = V_{\text{ds0}}/L < 10^3$ V/cm.

(6) 根据低源漏电导 G_{d0} 计算热噪声 $S_{\text{thermal}} = 4kTG_{\text{d0}}$, 并用总电流噪声功率谱密度减去热噪声功率谱密度得散粒噪声功率谱密度 $S_{\text{shot}} = S - S_{\text{thermal}}$.

(7) 模拟得到有效迁移率 μ_n .

(8) 将得到的 S_{shot} , μ_n 及 $I_{\text{ballistic}}$ 代入公式(6)和(8)可以得到线性区及饱和区背散射系数.

实验选用 90 nm 工艺 n-MOSFET 器件, 阈值电压为 0.7 V. 分别在低温条件下测试器件在线性区、亚阈值区和饱和区的源漏散粒噪声功率谱. 表 1 为器件在不同工作条件下测试的电流值和相应的电流噪声功率谱值.

由上表数据可以看出, 在不同栅电压下, 漏源电流与沟道电流噪声功率谱的关系. $V_{\text{gs}} = 0.25$ V 时, 器件处在亚阈值工作区, 当源漏电压较小时, 噪声随电流增加趋势并不明显, 此时载流子接近扩散输运, 呈现热噪声特性. 随着源漏电压的继续增加, 可以看到散粒噪声. 在 $V_{\text{gs}} = 1.2$ V 时有类似的特性, 但当源漏电压增大到一定值时会有部分散粒噪声的抑制, 这是因为当栅电压增大时, 源极结正向压降增大, 耗尽区变小, 势垒高度随栅源电压的增大而降低. 在强反型时, 源区势垒逐渐消失, 散粒噪声随之消失. 但若器件具有很薄的栅氧化层, 在强反型下栅漏电流隧穿通过氧化层势垒会产生明显的栅散粒噪声, 其沟

表 1 电流与电流功率谱密度

Table 1 Current and current power spectral density

$V_{\text{gs}} = 0.25$ V			$V_{\text{gs}} = 1.2$ V		
V_{ds} (V)	I_{ds} (mA)	S_I (A ² /Hz)	V_{ds} (V)	I_{ds} (mA)	S_I (A ² /Hz)
0.12	0.01	8.12×10^{-24}	0.13	0.05	1.62×10^{-22}
0.15	0.05	9.67×10^{-24}	0.15	0.15	2.81×10^{-22}
0.18	0.15	3.82×10^{-23}	0.19	0.20	5.66×10^{-22}
0.21	0.20	4.01×10^{-23}	0.22	0.25	1.48×10^{-21}
0.25	0.25	1.20×10^{-22}	0.25	0.30	1.27×10^{-21}
0.28	0.30	2.33×10^{-22}	0.27	0.35	7.61×10^{-21}
0.31	0.35	5.56×10^{-22}	0.30	0.40	8.62×10^{-21}
0.35	0.40	1.39×10^{-21}	0.34	0.60	7.43×10^{-21}
0.39	0.45	2.47×10^{-21}	0.38	0.70	2.70×10^{-21}
0.42	0.50	4.40×10^{-21}	0.41	0.80	4.72×10^{-21}
0.45	0.55	6.29×10^{-21}	0.43	0.90	9.02×10^{-21}
0.48	0.60	7.41×10^{-21}	0.47	1.00	1.50×10^{-20}
0.50	0.65	2.31×10^{-21}	0.51	1.20	1.60×10^{-20}
0.52	0.70	4.90×10^{-21}	0.54	1.40	8.89×10^{-21}

道内的散粒噪声成分会增加.

图 10 为 Monte Carlo 模拟栅极电压 0.25 V、温度 300 K, 源漏掺杂浓度 1×10^{26} m⁻³ 器件的电流与噪声随源漏电压的变化关系图. 当源漏电压很小时, 载流子输运接近扩散输运, 电流噪声呈现热噪声特性. 当源漏电压增加, 电流逐渐趋于饱和, 器件噪声呈现散粒噪声特性. 模拟与测试结论基本吻合, 其主要区别在于高源漏电压时理论模拟未考虑到实际器件中的抑制.

随着源漏电压增加, 背散射系数减小, 器件输运更接近弹道输运, 这与背散射系数计算的经验公式得到的模拟计算结论相同, 如图 11 所示. 图 12 为测试所得背散射系数与源漏电压变化关系, 可以看出

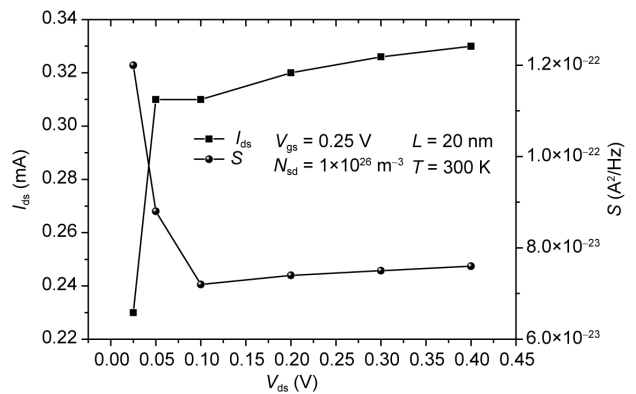


图 10 源漏电流及噪声与源漏电压的变化关系

Figure 10 The variation of electricity source-drain and noise with source-drain voltage.

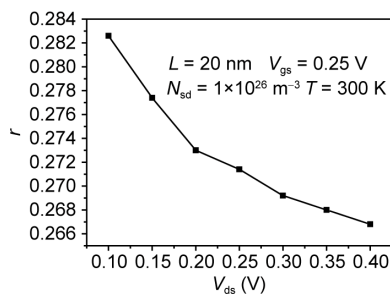


图 11 背散射系数与源漏电压的关系

Figure 11 The variation of backscattering coefficient with source-drain voltage.

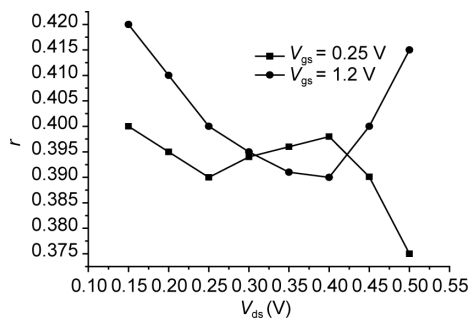


图 12 背散射系数与源漏电压的关系

Figure 12 The variation of backscattering coefficient with source-drain voltage.

背散射系数随源漏增加而减小, 输运接近弹道输运, 散粒噪声呈现增加的趋势. 当漏源电压较小时, 沟道

内电场强度很小, 漂移扩散电流成分显著, 背散射系数较大, 噪声为热噪声. 但当漏源电压增大时, 背散射系数减小, 噪声接近于散粒噪声. 但对较大的栅极电压(0.25 V), 沟道内载流子散射增加, 散粒噪声受到抑制, 其背散射系数变大.

4 结论

本文基于 Navid 模型推导实际纳米 MOSFET 的噪声, 并得到了噪声与背散射系数的关系式, 进一步给出器件在线性区与饱和区的背散射系数. 然后, 对背散射系数随沟道长度、偏置电压和温度的变化特性进行分析, 并提出测量背散射系数的试验方法, 用实验和 Monte Carlo 模拟来验证线性区和饱和区噪声与偏置电压的关系, 分析背散射系数与偏置电压的变化特性. 结果表明, 沟道长度越长、源漏电压越小、温度越高、栅极电压越大, 散射就越多, 进而背散射系数增大, Fano 因子减小, 散粒噪声抑制增强. 由实验测试数据分析和模拟数据对比可以看到, 通过散粒噪声确实可以进行背散射系数的提取. 此外, 模拟数据与实测数据在总体趋势上一致. 本论文给出的模型和试验方法能够反映出器件实际情况, 可用输运机制表征噪声特性、噪声提取输运参数等新的信息提取方式, 并对介观器件输运特性研究方面也发挥积极作用.

参考文献

- 王阳元, 张兴, 刘晓彦, 等. 32 nm 及其以下技术节点 CMOS 技术中的新工艺及新结构器件. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2008, 38(006): 921-932
- Jeon J, Lee J, Kim J, et al. The first observation of shot noise characteristics in 10 nm scale MOSFETs. In: The Proceedings of 2009 Symposium on VLSI Technology. Honolulu: IEEE, 2009. 48-49
- Navid R, Jungemann C, Lee T, et al. High-frequency noise in nanoscale metal oxide semiconductor field effect transistors. J Appl Phys, 2007, 101: 124501
- Sano N, Natori K, Mukai M, et al. Physical mechanism of current fluctuation under ultra-small device structures. In: the Proceedings of Extended Abstracts of 1998 Sixth International Workshop on Computational Electronics. Osaka: IEEE, 1998. 112-115
- Palestri P, Esseni D, Eminent S, et al. Understanding quasi-ballistic transport in nano-MOSFETs: Part I-scattering in the channel and in the drain. IEEE Trans Electron Devices, 2005, 52(12): 2727-2735
- Eminent S, Esseni D, Palestri P, et al. Understanding quasi-ballistic transport in nano-mosfets: Part ii-technology scaling along the ITRS. IEEE Trans Electron Devices, 2005, 52(12): 2736-27343
- Timp G, Bude J, Bourdelle K, et al. The ballistic nano-transistor. In: the Proceedings of Electron Devices Meeting. Washington: IEEE, 1999. 55-58
- Wang R S, Huang R, Zhang L L, et al. Experimental investigations on channel backscattering characteristics of gate-all-around silicon nanowire transistors from top-down approach. Appl Phys Lett, 2008, 93(8): 083513
- Wang R, Liu H, Huang R, et al. Experimental investigations on carrier transport in Si nanowire transistors: Ballistic efficiency and apparent

- mobility. *IEEE Trans Electron Devices*, 2008, 55(11): 2960–2967
- 10 Rumsey D W. Electrical Characterization of Bulk MOSFETs in Terms of Backscattering Coefficients. Dissertation for Master Degree. Indiana: Purdue University, 2001
- 11 Zilli M, Palestri P, Esseni D, et al. On the experimental determination of channel back-scattering in nanoMOSFETs. In: the Proceedings of Electron Devices Meeting. Washington: IEEE, 2007. 105–108
- 12 Barral V, Poiroux T, Saint-Martin J, et al. Experimental investigation on the quasi-ballistic transport: Part I-Determination of a new backscattering coefficient extraction methodology. *IEEE Trans Electron Devices*, 2009, 56(3): 408–419
- 13 Barral V, Poiroux T, Munteanu D, et al. Experimental investigation on the quasi-ballistic transport: Part II-Backscattering coefficient extraction and link with the mobility. *IEEE Trans Electron Devices*, 2009, 56(3): 420–430
- 14 Giusi G, Crupi F, Magnone P. Criticisms on and comparison of experimental channel backscattering extraction methods. *Microelectron Eng*, 2011, 88(1): 76–81
- 15 Liu R, Yamamoto Y. Nyquist noise in the transition from mesoscopic to macroscopic transport. *Phys Rev B*, 1994, 50(23): 17411–17414
- 16 Navid R, Dutton R W. The physical phenomena responsible for excess noise in short-channel MOS devices. In: *Simulation of Semiconductor Processes and Devices*, 2002. 75–78
- 17 Jia X F, Du L, Tang D H, et al. Research on shot noise suppression in quasi-ballistic transport Nano-MOSFETs (in Chinese). *Acta Phy Sin*, 2012, 61(12): 127202 [贾晓菲, 杜磊, 唐冬和, 等. 准弹道输运纳米 MOSFET 散粒噪声的抑制研究. *物理学报*. 2012, 61(12): 127202]
- 18 Khanna V. Physics of carrier-transport mechanisms and ultra-small scale phenomena for theoretical modelling of nanometer MOS transistors from diffusive to ballistic regimes of operation. *Phys Rep*, 2004, 398(2): 67–131
- 19 Lundstrom M. Elementary scattering theory of the Si MOSFET. *IEEE Electron Device Lett*, 1997, 18(7): 361–363
- 20 Rahman A, Lundstrom M. A compact scattering model for the nanoscale double-gate MOSFET. *IEEE Trans Electron Devices*, 2002, 49(3): 481–489
- 21 Ji Y, Nan L, Mouthaan K. Analysis of the drain thermal noise for deep submicron MOSFETs. In: *The Proceedings of Microwave Conference*. Singapore: IEEE, 2009. 1659–1662
- 22 Ong S N, Yeo K S, Chew K W J, et al. Analytical high frequency channel thermal noise modeling in deep sub-micron MOSFETs. In: *Integrated Circuits*. Singapore: IEEE, 2009. 306–309
- 23 Martin J S, Bournel A, Dollfus P. On the ballistic transport in nanometer-scaled DG MOSFETs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2004, 51(7): 1148–1155
- 24 Smit G, Scholten A J, Pijper R, et al. Experimental demonstration and modeling of excess RF Noise in Sub-100-nm CMOS technologies. *IEEE Electron Device Lett*, 2010, 31(8): 884–886
- 25 González T, Mateos J, Pardo D, et al. Microscopic analysis of shot-noise suppression in nondegenerate ballistic transport. *Semicond Sci Tech*, 1998, 13: 714
- 26 Gomila G, Cantalapiedra I, González T, et al. Semiclassical theory of shot noise in ballistic n^+ -in- n^+ semiconductor structures: Relevance of Pauli and long-range Coulomb correlations. *Phys Rev B*, 2002, 66(7): 075302
- 27 Bulashenko O, Rubí J. Shot-noise suppression by Fermi and Coulomb correlations in ballistic conductors. *Phys Rev B*, 2001, 64(4): 45307
- 28 Jia X F, He L. Research on shot noise suppression in realistic nano-MOSFETs based on Monte Carlo simulation (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2013, 43(7): 866–873 [贾晓菲, 何亮. 基于 Monte Carlo 模拟的实际纳米 MOSFET 散粒噪声抑制研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43(7): 866–873]

Research on backscattering coefficient based on nano-MOSFET noise

JIA XiaoFei^{1*} & HE Liang²

¹ *Department of Electronic and Information Engineering, Ankang University, Ankang 725000, China;*

² *Advanced Materials and Nano Technology School, Xidian University, Xi'an 710071, China*

In the study of the backscattering coefficient by traditional noise theory, many parameters and quantum mechanical calculations are used, or deviations appear in conclusions due to a lot of assumptions. In the present work, based on the Navid model, the expressions of backscattering coefficient in nano-MOSFET are deduced, and the backscattering coefficient in the linear region and the saturation region are obtained, and gives the back-scattering coefficient measurement method. On this basis, the variations of backscattering coefficient with Channel length, temperature and voltage are analyzed. Furthermore, the variations of backscattering coefficient with voltage in the linear region and the saturation region are verified by experiments and Monte Carlo simulations. Our results are in accordance with other works.

nano-MOSFET, backscattering coefficient , shot noise suppression

PACS: 73.40.Qv, 72.20.Dp, 72.70.+m

doi: 10.1360/132013-357