

10 nm 金属氧化物半导体场效应晶体管中的热噪声特性分析*

贾晓菲^{1)†} 魏群¹⁾ 张文鹏¹⁾ 何亮²⁾ 武振华¹⁾

1) (西安电子科技大学物理学院, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学先进材料与纳米科技学院, 西安 710071)

(2023年4月24日收到; 2023年9月12日收到修改稿)

随着金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 器件等比例缩小至纳米级的较小尺寸, 一方面导致的短沟道效应已严重影响热噪声; 另一方面使栅、源、漏区及衬底区的热噪声占有比越来越高, 而传统热噪声模型主要考虑较大尺寸器件的沟道热噪声, 且其模型未考虑到沟道饱和区. 本文针对小尺寸纳米级 MOSFET 器件, 并根据器件结构特征和热噪声的基本特性, 建立了 10 nm 器件的热噪声模型, 该模型体现沟道区、衬底区及栅、源、漏区, 同时考虑到沟道饱和区的热噪声. 在模型的基础上, 分析沟道热噪声、总热噪声随偏置参量及器件参数之间的关系, 验证了沟道饱和区热噪声的存在, 并与已有实验结果一致, 所得结论有助于提高纳米级小尺寸 MOSFET 器件的工作效率、寿命及响应速度等.

关键词: 热噪声, 纳米 MOSFET, 短沟道效应, 器件效率**PACS:** 73.50.Td, 73.40.Qv, 73.50.-h, 42.60.Lh**DOI:** 10.7498/aps.72.20230661

1 引言

近些年, 集成电路基本遵循摩尔定律发展, 集成电路芯片上所集成的电路数目翻倍、尺寸缩小, 而金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 等比例缩小遇到了各种各样的物理极限和技术方面的问题. 例如, 短沟道效应导致的二维电势分布以及所产生的强电场使器件严重偏离长沟道性能, 沟道内导电电荷越来越少, 器件阈值电压减小, 失去控制; 器件缩小导致源、漏结附近的载流子获得高能量, 穿过半导体与氧化物接触的势垒层而改变阈值电压, 与漏极附近耗尽区的晶格产生电子空穴对, 形成泄漏电流、衬底电流. 目前, MOSFET 器件尺寸已缩小到纳米级的小尺寸, 在寄生效应增大的同时, 器件内部的噪声也随之增大^[1-4]. 因此, 急

需解决器件的低噪声化问题.

热噪声存在于电阻性元器件中, 起源于载流子的随机热运动. 场效应晶体管是通过调制导电沟道的电阻工作的, 电阻性沟道、衬底电阻及栅极电阻等必然会产生热噪声, 而热噪声的均方值与外加偏压有关^[5]. MOSFET 尺寸的减小同时伴随着器件电场强度增大、工作电压降低, 用来满足低功耗. 对于纳米小尺寸 MOSFET, 其噪声机理及特性可为低功耗、低噪声电路设计及优化提供帮助, 因此需要能够表征小尺寸 MOSFET 的噪声模型.

随着互补金属氧化物半导体 (CMOS) 技术的不断进步, 在开关及驱动等性能提高的同时, 导致器件中各类效应显著增强, 其表现较为突出的就是短沟道效应, 该效应主要包含速度饱和效应、热载流子效应和沟道长度调制效应, 而前两种效应是影响沟道区热噪声的重要因素. 另一方面, 在栅极区,

* 国家自然科学基金 (批准号: 11965005, 11964026)、陕西省自然科学基金 (批准号: 2023-JC-YB-021, 2020JM-621) 和中央高校基
本科研业务费专项资金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ji Xiaofei-ab@163.com

回路中感应出栅噪声电流及栅极电阻所产生的热噪声; 衬底区, 由热载流子效应引起的热噪声和衬底电阻产生的热噪声; 还有栅、源、漏等引线所产生的热噪声, 而这些噪声在小尺寸下纳米 MOSFET 中的占有比率越来越高, 不能忽略^[6-9]. 文献 [10-12] 提出在 MOSFET 尺寸约小于 30 nm, 噪声机理会发生改变, 沟道区出现散粒噪声, 与热噪声一起成为沟道过量噪声, 影响沟道热噪声的短沟道效应主要是由漏源电压引起. 以往对纳米 MOSFET 热噪声的建模主要体现在沟道区, 认为热噪声主要出现在线性区而忽略饱和区^[7,8,12,13]. 近些年, 国内外对纳米 MOSFET 栅极区及衬底区的热噪声也有涉及^[6,14,15], 但是对其热噪声与器件结构和偏置参量的相关模型研究甚少, 更没有器件中各区的热噪声统一模型. 文献 [16] 通过实验给出 10, 20 和 110 nm 的 MOSFET 沟道噪声随偏置参量的关系, 认为 110 nm 器件的沟道主要为热噪声, 当 10 nm 和 20 nm 器件在线性区工作时, 沟道以热噪声为主, 因为载流子主要集中的该区域, 而在饱和区虽然沟道噪声转为散粒噪声为主, 但也有热噪声存在, 不能忽略.

鉴于此, 本文首先建立 10 nm MOSFET 热噪声模型, 该模型体现沟道区、衬底区及栅、源、漏区等, 且沟道模型包含线性区和饱和区; 其次, 分析沟道热噪声在不考虑饱和区和考虑饱和区时的热噪声差别, 验证实验的正确性; 最后, 讨论器件总的热噪声模型与偏置参量、器件参数的关系. 该模型可体现器件制造工艺和器件结构对噪声物理特性的影响, 能更好地理解热噪声机理, 其结论可用于器件的可靠性分析与表征.

2 热噪声模型

在电阻性元器件中, 热噪声的电流谱密度表达式为^[5]

$$S_I = 4kTg. \quad (1)$$

在 MOSFET 器件中, 常采用 SPICE 模型的热噪声电流谱密度, 其表达式为^[17]

$$S_I = \frac{8}{3}kT_0(g_m + g_{ds} + g_{mb}), \quad (2)$$

其中 g_m 为栅极电导, g_{ds} 为沟道电导, g_{mb} 为衬底电导. (2) 式将 MOSFET 中的热噪声分为 3 部分, 即栅极区热噪声、沟道区热噪声和衬底区热噪声, 但

随着器件的缩小, 栅、源、漏引线等产生的热噪声也不能忽略. 因此, (2) 式根据电路特性, 加入各类引线电导 g_g 可修正为

$$S_I = \frac{8}{3}kT_0(g_m + g_{ds} + g_{mb} + g_g). \quad (3)$$

2.1 沟道热噪声

图 1 为 MOSFET 结构示意图, 受短沟道效应影响, 沟道被划为线性区 (OA) 和饱和区 (AB). 文献 [17] 提出 MOSFET 的沟道线性区的热噪声为

$$S_{I,chl} = 4kT \frac{\mu_n}{L_{eff}^2} Q_{inv}, \quad (4)$$

其中, L_{eff} 为有效沟道长度, μ_n 为有效迁移率, T 为温度, Q_{inv} 为反型层电荷.

线性区和饱和区的沟道热噪声表达式为^[18]

$$S_{I,ch2} = 4kT \frac{\mu_n}{L_{eff}^2} Q_{inv} + \delta \frac{4kTI_{DS}V_{dssat}}{LE_{elec}^2}, \quad (5)$$

其中, L 为沟道长度, I_{DS} 为源漏电流, V_{dssat} 为源漏饱和电压, E_{elec} 为有效电场, δ 为拟合参量. (4) 式主要体现为线性区热噪声, (5) 式体现沟道线性区和饱和区, 二者均考虑到影响热噪声的速度饱和效应和热载流子效应, 但电荷在线性区 ($0 \leq x \leq L_{eff}$) 和饱和区 ($L_{eff} \leq x \leq L$) 分布不均匀, 差别很大, 其主要分布在线性区. 为了计算精确, 解决分布差距的问题, 引入本征弹道率 B_{int} , 其表示输运电子占总电子数的比例. 因此, 电荷数修正为

$$Q_{inv} = (1 - B_{int})WL_{eff}Q(0), \quad (6)$$

其中, $Q(0) = C_{ox}(V_{GS} - V_T)$, W 为器件宽度, C_{ox} 为单位面积的氧化层电容, V_T 为阈值电压, V_{GS} 为栅极电压. 在漂移扩散输运的 MOSFET 中, 其源漏电流为^[19]

$$I_D = WQ(0)v_D(0), \quad (7)$$

其中, $v_D(0)$ 为平均漂移速度.

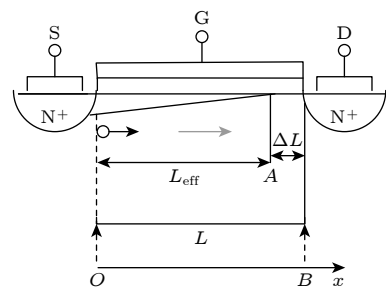


图 1 MOSFET 结构示意图

Fig. 1. MOSFET structure diagram.

为简化公式, 记 $f = \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{kT}\right)$, 弹道运输下的 MOSFET 源漏电流为^[20]

$$I_B = WQ(0)v_{inj} \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{kT}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{kT}\right)} \\ = WQ(0)v_{inj} \frac{1-f}{1+f}. \quad (8)$$

为简化公式, 记 $n = \left(\frac{1-r}{1+r}\right)$, 实际纳米 MOSFET 的源漏电流为^[20]

$$I_{DS} = WQ(0)v_{inj} \left(\frac{1-r}{1+r}\right) \\ \times \frac{1 - \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{kT}\right)}{1 + \left(\frac{1-r}{1+r}\right) \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{kT}\right)} \\ = WQ(0)v_{inj} n \frac{1-f}{1+nf}, \quad (9)$$

其中, v_{inj} 为接触端的发射速度, $\varepsilon_D(0)$ 为平均电场强度, r 为背散射系数. 实际纳米 MOSFET 的源漏电流为包含漂移扩散和弹道运输, 结合电路特性可知 $I_{DS} = I_B + I_D$, 联立 (6) 式—(9) 式可得到本征弹道率 B_{int} :

$$B_{int} = \frac{v_{inj} n \frac{1-f}{1+nf} - \mu_n \varepsilon_D(0)}{v_{inj} \frac{1-f}{1+f} - \mu_n \varepsilon_D(0)}. \quad (10)$$

将 (6) 式和 (10) 式分别代入 (4) 式和 (5) 式, 可得沟道热噪声为

$$S_{I, ch1} \\ = 4kT \frac{\mu_n}{L_{eff}^2} \left[1 - \frac{v_{inj} n \frac{1-f}{1+nf} - \mu_n \varepsilon_D(0)}{v_{inj} \frac{1-f}{1+f} - \mu_n \varepsilon_D(0)} \right] WL_{eff} Q(0), \quad (11)$$

$$S_{I, ch2} \\ = 4kT \frac{\mu_n}{L_{eff}^2} \left[1 - \frac{v_{inj} n \frac{1-f}{1+nf} - \mu_n \varepsilon_D(0)}{v_{inj} \frac{1-f}{1+f} - \mu_n \varepsilon_D(0)} \right] WL_{eff} Q(0) \\ + \delta \frac{4kTV_{dssat}}{LE_{elec}^2} WQ(0)v_{inj} n \frac{1-f}{1+nf}. \quad (12)$$

2.2 栅极热噪声

在小尺寸 MOSFET 的高频情况下, 沟道载流

子无规则运动产生的热噪声电压, 除了产生沟道热噪声外, 还将通过栅电容将沟道电势分布的起伏耦合到栅极上, 从而在栅极电压出现相应的起伏, 在栅极回路中感应出栅噪声电流, 这种耦合感应的热噪声即感应栅噪声^[14]. 因此, 栅极热噪声包括栅极电阻所产生的热噪声和感应栅噪声.

对于栅极电阻所产生的热噪声, 其公式为

$$S_{mR} = 4kTg_m. \quad (13)$$

文献 [14] 给出的感应栅电流噪声为

$$S_{mc} = \overline{(j\omega \Delta Q_n)^2}, \quad (14)$$

其中, ΔQ_n 为沟道热噪声使沟道电荷通过栅源电容耦合, 而在栅极感应出的等量异号电荷, 其表达式为

$$\Delta Q_n = -W \int_0^L C_{ox} \phi_s(x) dx, \quad (15)$$

其中, $\phi_s(x)$ 为波动电势, 从 (15) 式可以看出, 栅极电荷大小为沟道中电荷大小. 文献 [14] 提出栅极电荷 ΔQ_n 包含沟道反型层的电荷与耗尽层的电荷之和, 结合 (6) 式可得:

$$\Delta Q_n = Q(0) = C_{ox}(V_{GS} - V_T) = \frac{Q_{inv}}{(1 - B_{int})WL_{eff}}. \quad (16)$$

将 (16) 式代入 (14) 式中, 有

$$S_{mc} = \left[j\omega \frac{Q_{inv}}{(1 - B_{int})WL_{eff}} \right]^2. \quad (17)$$

结合 (13) 式和 (17) 式, 栅极热噪声可表示为

$$S_m = S_{mc} + S_{mR} = \left[j\omega \frac{Q_{inv}}{(1 - B_{int})WL_{eff}} \right]^2 + 4kTg_m. \quad (18)$$

2.3 衬底热噪声

对于衬底所产生的热噪声, 其公式为

$$S_{bR} = 4kTg_{mb}. \quad (19)$$

随着 MOSFET 器件尺寸的缩短, 热载流子效应增强, 沟道横向电场通过碰撞电离产生大量的电子空穴对, 部分空穴被纵向电场扫到衬底成为衬底电流. 衬底电流的形成是由热载流子效应引起, 故为热噪声, 其电荷为沟道部分电荷, 可表示为

$$Q_{inv} = B_{int}WL_{eff}Q(0). \quad (20)$$

衬底电荷主要分布在靠近与源端接触的衬底区, 故可代入热噪声 (4) 式, 可得:

$$S_{bb} = 4kT \frac{\mu_n}{L_{eff}^2} B_{int} W L_{eff} Q(0). \quad (21)$$

因此, 结合 (10) 式、(19) 式和 (21) 式, 衬底区的热噪声为

$$\begin{aligned} S_b &= S_{bb} + S_{bR} = 4kT \frac{\mu_n}{L_{eff}^2} B_{int} W L_{eff} Q(0) + 4kT g_{mb} \\ &= 4kT \frac{\mu_n}{L_{eff}^2} \frac{v_{inj} n \frac{1-f}{1+nf} - \mu_n \epsilon_D(0)}{v_{inj} \frac{1-f}{1+f} - \mu_n \epsilon_D(0)} W L_{eff} Q(0) \\ &\quad + 4kT g_{mb}. \end{aligned} \quad (22)$$

2.4 其他热噪声

栅、源、漏等引线及其他电阻所产生的热噪声, 可直接代入电阻性元器件的热噪声电流谱密度表达式:

$$S_g = 4kT g_g. \quad (23)$$

综上所述, 根据器件电路特性给出 MOSFET 的热噪声电路如图 2 所示, 结合 (12) 式、(18) 式、(22) 式和 (23) 式, 可得出总的热噪声模型如下:

$$S_{tol} = S_{ch} + S_m + S_b + S_g. \quad (24)$$

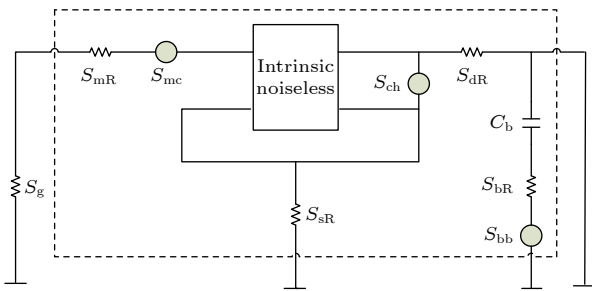


图 2 MOSFET 热噪声电路图

Fig. 2. MOSFET thermal noise circuit diagram.

3 模型结果与分析

本文选取沟道长度为 10 nm 的 MOSFET 为研究对象.

3.1 沟道热噪声模型

表 1 为 MOSFET 在不同的偏置电压、沟道长度和温度下, 线性区的沟道热噪声值 (\$S_{I, ch1}\$)、线性区与饱和区的沟道热噪声值 (\$S_{I, ch2}\$). 图 3 绘制出沟道热噪声值随栅极电压、源漏电压、沟道长度及温度的变化关系图, 图中 \$S_{I, ch1}\$ 为 (11) 式, \$S_{I, ch2}\$ 为 (12) 式. 由图 3(a) 可以看出, 随着栅极电压的增大, 热噪声也随之增大, 这是因为小尺寸 MOSFET 器件的热载流子效应和沟道长度调制效应对热噪声的影响较大. 图 3(b) 显示器件工作在线性区器件的热噪声随着源漏电压的增大而增大, 在饱和区变化不大, 这是因为大部分电荷位于线性区, 该区受热载流子效应较强, 还有器件缩小导致强电场下沟道电流产生的自热效应等, 故其热噪声增大, 沟道热噪声与偏置电压的结论与文献 [16, 19–25] 的理论和实验结果一致. 从图 3(c) 可以看出, 随着器件尺寸的缩小, 沟道中的热噪声有增大的趋势, 这与文献 [16] 实验的结果一致. 图 3(d) 显示出随着温度的增大热噪声变化不大, 这是因为在小尺寸的 MOSFET 沟道中的散粒噪声增强, 这与文献 [10] 的结论一致. 另外, 从图 3(a)—(d) 可以看出, 考虑饱和区的热噪声比不考虑该区的噪声大, 故饱和区电荷虽少但其热噪声不能忽略.

表 1 MOSFET 沟道热噪声值

Table 1. Channel thermal noise in MOSFET.

\$V_{GS}/V\$ (0–1.2 V)		\$V_{DS}/V\$ (0–2 V)		\$L/nm\$ (10–100 nm)		\$T/K\$ (100–400 K)	
\$S_{I, ch1}\$	\$S_{I, ch2}\$	\$S_{I, ch1}\$	\$S_{I, ch2}\$	\$S_{I, ch1}\$	\$S_{I, ch2}\$	\$S_{I, ch1}\$	\$S_{I, ch2}\$
\$2.00 \times 10^{-23}\$	\$2.50 \times 10^{-21}\$	\$1.49 \times 10^{-22}\$	\$3.02 \times 10^{-21}\$	\$3.94 \times 10^{-22}\$	\$1.22 \times 10^{-21}\$	\$6.48 \times 10^{-22}\$	\$2.62 \times 10^{-21}\$
\$2.84 \times 10^{-22}\$	\$2.61 \times 10^{-21}\$	\$1.52 \times 10^{-21}\$	\$3.52 \times 10^{-21}\$	\$1.64 \times 10^{-22}\$	\$8.47 \times 10^{-22}\$	\$6.69 \times 10^{-22}\$	\$2.52 \times 10^{-21}\$
\$5.48 \times 10^{-22}\$	\$2.72 \times 10^{-21}\$	\$1.90 \times 10^{-21}\$	\$3.51 \times 10^{-21}\$	\$1.23 \times 10^{-22}\$	\$6.48 \times 10^{-22}\$	\$6.90 \times 10^{-22}\$	\$2.42 \times 10^{-21}\$
\$8.12 \times 10^{-22}\$	\$2.83 \times 10^{-21}\$	\$2.12 \times 10^{-21}\$	\$3.50 \times 10^{-21}\$	\$9.93 \times 10^{-23}\$	\$5.25 \times 10^{-22}\$	\$7.12 \times 10^{-22}\$	\$2.42 \times 10^{-21}\$
\$1.08 \times 10^{-21}\$	\$2.94 \times 10^{-21}\$	\$2.26 \times 10^{-21}\$	\$3.50 \times 10^{-21}\$	\$8.35 \times 10^{-23}\$	\$4.42 \times 10^{-22}\$	\$7.64 \times 10^{-22}\$	\$2.41 \times 10^{-21}\$
\$1.34 \times 10^{-21}\$	\$3.05 \times 10^{-21}\$	\$2.36 \times 10^{-21}\$	\$3.49 \times 10^{-21}\$	\$7.22 \times 10^{-23}\$	\$3.81 \times 10^{-22}\$	\$7.86 \times 10^{-22}\$	\$2.41 \times 10^{-21}\$
\$1.60 \times 10^{-21}\$	\$3.16 \times 10^{-21}\$	\$2.45 \times 10^{-21}\$	\$3.48 \times 10^{-21}\$	\$6.36 \times 10^{-23}\$	\$3.35 \times 10^{-22}\$	\$7.78 \times 10^{-22}\$	\$2.40 \times 10^{-21}\$
\$1.87 \times 10^{-21}\$	\$3.27 \times 10^{-21}\$	\$2.51 \times 10^{-21}\$	\$3.48 \times 10^{-21}\$	\$5.69 \times 10^{-23}\$	\$2.99 \times 10^{-22}\$	\$7.76 \times 10^{-22}\$	\$2.40 \times 10^{-21}\$
\$2.13 \times 10^{-21}\$	\$3.38 \times 10^{-21}\$	\$2.56 \times 10^{-21}\$	\$3.47 \times 10^{-21}\$	\$5.14 \times 10^{-23}\$	\$2.70 \times 10^{-22}\$	\$7.74 \times 10^{-22}\$	\$2.39 \times 10^{-21}\$
\$2.40 \times 10^{-21}\$	\$3.49 \times 10^{-21}\$	\$2.61 \times 10^{-21}\$	\$3.47 \times 10^{-21}\$	\$4.69 \times 10^{-23}\$	\$2.46 \times 10^{-22}\$	\$7.72 \times 10^{-22}\$	\$2.37 \times 10^{-21}\$

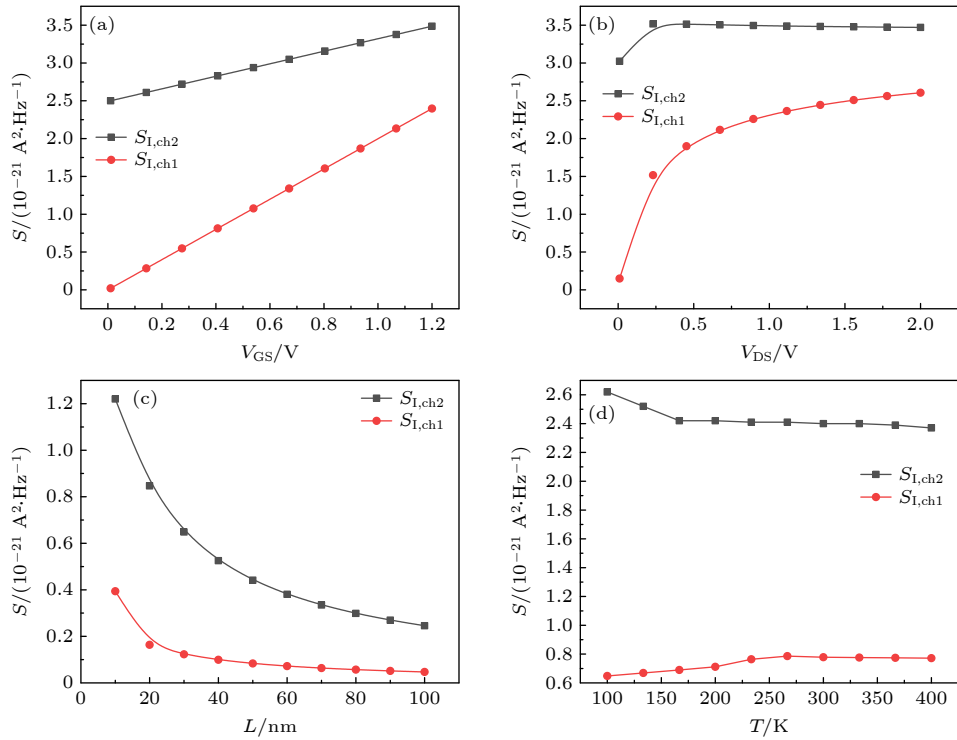


图 3 沟道热噪声与器件结构和偏置参数的关系 (a) 沟道热噪声与栅极电压关系图; (b) 沟道热噪声与源漏电压关系图; (c) 沟道热噪声与沟道长度关系图; (d) 沟道热噪声与温度关系图

Fig. 3. Relationship between channel thermal noise and device structure and bias parameters: (a) Relationship between channel thermal noise and gate voltage; (b) relationship between channel thermal noise and source-drain voltage; (c) relationship between channel thermal noise and channel length voltage; (d) relationship between channel thermal noise and temperature voltage.

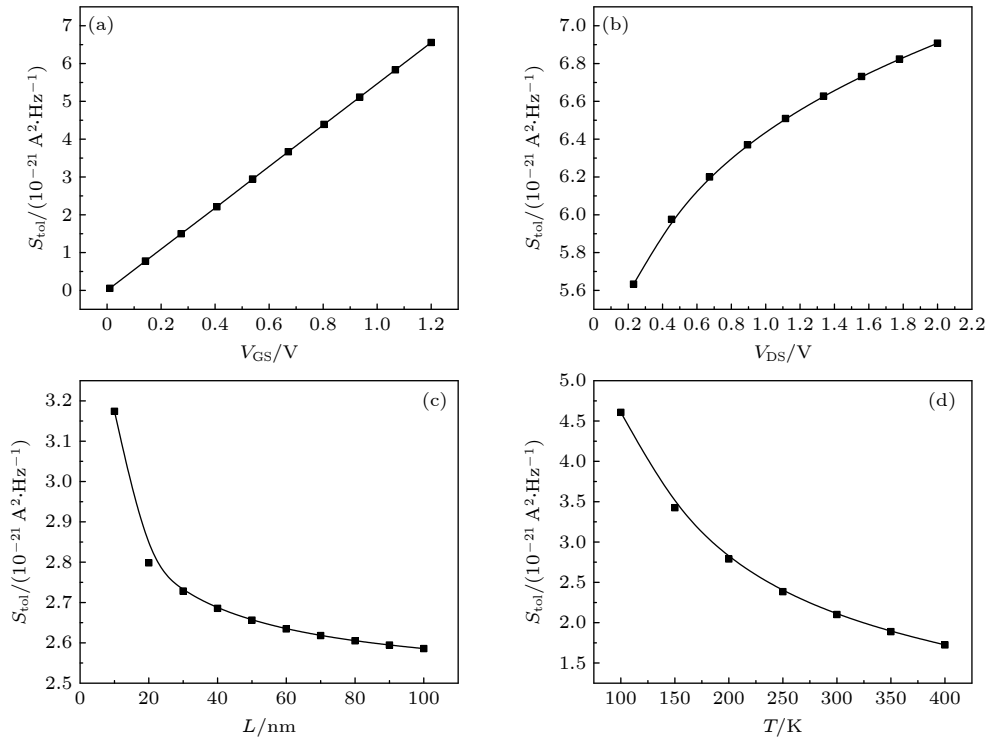


图 4 总热噪声与器件结构和偏置参数的关系 (a) 热噪声与栅极电压关系图; (b) 热噪声与源漏电压关系图; (c) 热噪声与沟道长度关系图; (d) 热噪声与温度关系图

Fig. 4. Relationship between total thermal noise and device structure and bias parameters: (a) Relationship between thermal noise and gate voltage; (b) relationship between thermal noise and source-drain voltage; (c) relationship between thermal noise and channel length voltage; (d) relationship between thermal noise and temperature voltage.

3.2 总热噪声模型

图 4 为 10 nm MOSFET 器件中的总热噪声值随栅极电压、源漏电压、沟道长度及温度的变化关系, 图中 S_{tot} 为模型 (24) 式, 该式包含器件沟道区、衬底区及栅、源、漏区的热噪声. 由图中可以看出, 随着器件尺寸的缩小, 沟道长度的缩短, 偏置电压的增大, 热噪声也随着增大, 在温度 100—400 K 时的热噪声基本处于 10^{21} 数量级, 说明温度对热噪声的影响较大.

4 结 论

小尺寸纳米级的 MOSFET 器件, 其热噪声与偏置电压、沟道长度及温度等因素有关, 短沟道效应导致的小尺寸器件中的热噪声占比也越来越大, 不能忽略. 本文得到的热噪声模型包含沟道区、衬底区和栅、源、漏区, 且沟道热噪声模型考虑饱和区, 得到热噪声与偏置电压、沟道长度与温度变化关系的结果, 可定量描述小尺寸 MOSFET 器件的热噪声, 用于器件的可靠性分析与表征.

感谢上海交通大学机械与动力学院王林副教授对文中建模部分提供的帮助!

参考文献

- [1] Navid R, Dutton R W 2002 *Simul. Semicond. Processes Dev.* **2** 75
- [2] Panda S, Maji B, Mukhopadhyay A K 2012 *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* **12** 107
- [3] Liu W, Padovani A, Larcher L, Raghavan N 2014 *IEEE Electron Dev. Lett.* **35** 157
- [4] Koyama M 2015 *Ph. D. Dissertation* (Tokyo: Tokyo Institute of Technology)
- [5] Zhang Y Q, Sun Q 1993 *Noise in Semiconductor Devices and Its Low Noise Technology* (Beijing: National Defense Industry Press) p38 [庄奕琪, 孙青 1993 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术 (北京: 国防工业出版社) 第 38 页]
- [6] Dabhi C K, Dasgupta A, Pragya K, Harshit A, Chenming H, Yogesh S C 2018 *IEEE Microw. Wirel. Co.* **28** 597
- [7] Myeong I, Kim J, Ko H 2020 *IEEE T. Comput. Aid. D* **39** 4351
- [8] Kenji O, Shuhei A 2021 *IEEE T. Electron Dev.* **68** 1478
- [9] Schmid M, Bhogaraju S K, Hanss A, Elger G 2021 *IEEE T. Instrum. Meas.* **70** 6500409
- [10] Navid R, Jungemann C, Lee T, Thomas H, Robert W 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 124501
- [11] Mahajan V M, Patalay P R, Jindal R P 2012 *IEEE T. Electron Dev.* **59** 197
- [12] Zhang M, Yao R K, Liu Y R 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 057101 (in Chinese) [张梦, 姚若河, 刘玉荣 2020 物理学报 **69** 057101]
- [13] Chen X, Elgabra H, Chen C H, Baugh J, Wei L 2021 *IEEE ISCAS* **5** 22
- [14] Wang J, Wang L, Wang D D 2016 *Acta Phys. Sin.* **23** 237102 (in Chinese) [王军, 王林, 王丹丹 2016 物理学报 **23** 237102]
- [15] Pahlm V C, Galup-Montoro C, Schneider M C 2022 *Nanotech* **3** 876
- [16] Jeon J, Lee J, Kim J, Park C H, Shin H 2009 *Symposium on VLSI Technology* Kyoto, Japan, June 15–17, 2009 p48
- [17] Knoblinger G, Klein P, Tiebout M 2001 *IEEE J. Solid St. Circ.* **36** 831
- [18] Ji Y, Nan L, Mouthaan K 2009 *Asia Pacific Microwave Conference*, Singapore, December 7–10, 2009 p1659
- [19] Ong S. N, Yeo K S, Chew K W, Chan L H K, Boon C C *International Symposium on Integrated Circuits and Systems*, Paris, France, February 2–4, 2010 p306
- [20] Rahman A, Lundstrom M 2002 *IEEE T. Electron Dev.* **49** 481
- [21] Andersson S, Svensson C 2005 *Electron Lett.* **41** 869
- [22] Jeon J, Lee D, Park B, Shin H 2007 *Solid State Electron.* **51** 1034
- [23] Paim V C, Galup-Montoro C, Schneider M C 2006 *NSTI Nanotech.* **3** 876
- [24] Roy A S, Enz C C 2005 *IEEE T. Electron Dev.* **52** 611
- [25] Chen C H, Chen D, Lee R, Lei P, Wan D *IEEE Custom Integrated Circuits Conference* San Jose, CA, USA, November 11, 2013 p6658426

Analysis of thermal noise characteristics in 10 nm metal oxide semiconductor field effect transistor^{*}

Jia Xiao-Fei^{1)†} Wei Qun¹⁾ Zhang Wen-Peng¹⁾ He Liang²⁾ Wu Zhen-Hua¹⁾

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

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

(Received 24 April 2023; revised manuscript received 12 September 2023)

Abstract

Small size metal-oxide-semiconductor field effect transistor (MOSFET), owing to their high theoretical efficiency and low production cost, have received much attention and are at the frontier of transistors. At present, their development is bottlenecked by physical limits due to equal scaling down of devices, which requires further improvement in terms of materials choice and device fabrication. As the MOSFET devices scale down to nanometer scale, on the one hand, the resulting short channel effect affects severely the thermal noise property; on the other hand, it makes the ratio of thermal noise in the gate, source, drain and substrate regions become higher and higher. However, the traditional thermal noise model mainly considers thermal noise of large-size devices, and its model does not consider the channel saturation region. In view of this, it is necessary to establish a small size MOSFET thermal noise model and analyze its characteristics.

At present, there are some researches on MOSFET thermal noise, but they mainly focus on the thermal noise in channel region of large size nanoscale MOSFET. In the present work, according to the device structure and inherent thermal noise characteristics, we establish a thermal noise model for MOSFETs of 10 nm feature size. The model includes contributions of substrate region, gate-source-drain region, and channel region. In the channel region is also included the thermal noise related to the device saturation regime. Using such a model, the dependence of channel thermal noise and total thermal noise on the device bias condition and device parameters are investigated, evidencing the existence of thermal noise in the device saturation regime, which are consistent with the experimental results in the literature. The thermal noise increases with the gate voltage and source-drain voltage rising as the device structure shrinks. In a temperature range of 100–400 K, the thermal noise is basically on the order of 10^{21} , indicating that the temperature has a great influence on the thermal noise. The thermal noise model established in this work can be applied to analyzing the noise performances of small size MOSFET devices, and the conclusions drawn from the present study are beneficial to improving the efficiency, lifetime, and response speed of MOSFETs on a nanometer scale.

Keywords: thermal noise, nano-metal-oxide-semiconductor field effect transistor, short channel effect, device efficiency

PACS: 73.50.Td, 73.40.Qv, 73.50.-h, 42.60.Lh

DOI: [10.7498/aps.72.20230661](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230661)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11965005, 11964026), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2023-JC-YB-021, 2020JM-621), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China.

[†] Corresponding author. E-mail: jiaxiaofei-ab@163.com

10 nm金属氧化物半导体场效应晶体管中的热噪声特性分析

贾晓菲 魏群 张文鹏 何亮 武振华

Analysis of thermal noise characteristics in 10 nm metal oxide semiconductor field effect transistor

Jia Xiao-Fei Wei Qun Zhang Wen-Peng He Liang Wu Zhen-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 227303 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230661

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230661>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米尺度金属-氧化物半导体场效应晶体管沟道热噪声模型

A channel thermal noise model of nanoscaled metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(5): 057101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191512>

短沟道金属-氧化物半导体场效应晶体管的散粒噪声模型

Shot noise model of the short channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(17): 177102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200497>

垂直短沟道二硫化钼场效应晶体管

Vertical short-channel MoS₂ field-effect transistors

物理学报. 2022, 71(21): 218502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220738>

绝缘体上硅金属氧化物半导体场效应晶体管中辐射导致的寄生效应研究

Radiation induced parasitic effect in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2018, 67(21): 216102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181372>

U型槽刻蚀工艺对GaN垂直沟槽型金属-氧化物-半导体场效应晶体管电学特性的影响

Effect of U-shape trench etching process on electrical properties of GaN vertical trench metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(9): 098501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191850>

光纤1/f热噪声的实验研究

Experimental study on 1/f intrinsic thermal noise in optical fibers

物理学报. 2019, 68(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181838>