

金属功函数波动效应快速预测方法及验证*

李怡宁^{1,2} 杨兰兰^{1,2**} 屠彦^{1,2}

(¹东南大学电子科学与工程学院, 南京, 210096) (²南京集成电路设计自动化技术创新中心, 南京, 210031)

2023-11-21收稿, 2023-12-15收改稿

摘要:金属功函数波动作为器件制造过程中的主要工艺波动源之一,其波动变化对器件电学特性有极大的影响。本文提出一种简便、快速预测半导体场效应管金属功函数波动效应的方法,并将其与商业软件中计算功函数波动的统计阻抗场法进行对比分析。参考IBM公司发布的14 nm SOI FinFET结构建立FinFET器件仿真模型并与实验数据对比验证后,引入金属功函数波动,分别用统计阻抗场法与本文提出的快速预测方法计算得到对应随机波动下模型的阈值电压 V_{th} 、关断电流 I_{off} 、工作电流 I_{on} 等电学特性参数的随机分布及这些参数结果的期望值、标准差、极差等统计参数,通过两者结果对比验证了快速预测方法的准确性。

关键词: FinFET; 功函数波动效应; 电学特性仿真; 统计阻抗场法

中图分类号: TN386.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3819(2024)01-0065-07

Method of Rapid Prediction about Metal Gate Workfunction Variability Effect and Its Verification

LI Yining^{1,2} YANG Lanlan^{1,2**} Tu Yan^{1,2}

(¹ School of Electronic Science & Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, CHN)

(² Nanjing Industrial Innovation Center of EDA, Nanjing, 210031, CHN)

Abstract: Metal workfunction fluctuations, as one of the main sources of process fluctuations in device manufacturing, had a significant impact on the electrical characteristics of devices. This article proposed a simple and fast method for predicting the fluctuation effect of metal work function in semiconductor field-effect transistors, and compared it with the statistical impedance field method by commercial software to calculate workfunction fluctuations. This article referred to the 14 nm SOI FinFET structure released by IBM to establish the FinFET device simulation model and verified it with experimental data. The fluctuation of metal work-function was introduced, and the random distribution of electrical characteristic parameters was calculated, such as threshold voltage V_{th} , turning off current I_{off} , working current I_{on} and the statistical parameters of these random distribution. The accuracy of the proposed fast prediction method is verified through the comparison of these results.

Key words: FinFET; work-function variation; simulation of electrical characteristic; statistical impedance field method

* 基金项目:江苏省重点研发计划项目(BE2022058-3)

** 联系作者: E-mail: jujube_yang@seu.edu.cn

引言

计算机辅助设计工具(Technology computer-aided design, TCAD)通过建立物理模型并对其进行数值计算来模拟半导体器件的性能及其工作原理,主要用于半导体器件仿真和优化。在过去的几十年中,TCAD已经成为了研究和设计高性能半导体器件不可或缺的工具之一。

随着半导体工艺尺寸的不断缩小,尤其是立体结构的鳍式场效应管(Fin field-effect transistor, FinFET)的出现,器件制造过程中的工艺随机波动,如随机掺杂波动、界面陷阱波动、金属功函数波动和氧化层厚度波动等,对电路和器件的影响将变得不可忽略。针对工艺偏差对器件电学特性的影响进行仿真成为了当下半导体领域生产制造商与研究机构的研究热点之一。统计阻抗场法(Statistical impedance field method, sIFM)就是在此背景下作为比原子级仿真方法更加快速的计算方法而被提出。它的原理是只求解一次TCAD模型,随后将引入的随机波动视为扰动以解出对应扰动的线性响应^[1]。因此sIFM可以避免重复求解TCAD模型中的非线性泊松方程和漂移扩散方程从而节省大量的计算时间以及计算资源。然而sIFM在计算过程中存在不可消除的模型误差。本文提出了一种简便、快速预测工艺金属功函数波动对半导体场效应管电学特性影响的方法:快速预测法(Rapid prediction method, RPM)。

本文参考IBM公司于2014年发布的FinFET模型^[2],建立了标准的14 nm SOI FinFET模型,引入FinFET制造过程中的主要工艺波动源之一金属功函数波动,使用RPM计算得到金属功函数随机波动下器件的阈值电压 V_{th} 、关断电流 I_{off} 和开启电流 I_{on} 等电学参数的变化,并与sIFM计算结果对比。

1 仿真流程简介与模型建立

1.1 TCAD仿真流程

本文中的仿真工作所需要用到的工具及基本

流程如图1所示^[3]。首先在Sentaurus的SDE模块中通过在命令文件中写入结构参数确定器件的物理结构,并生成数值计算所需的网格数据,SDE-VICE模块读取网格数据和物理参数后计算所需的电学参数和曲线,最后通过INSPECT模块输出可视化结果。

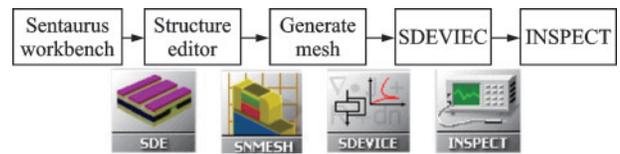


图1 本文仿真工作流程图

Fig.1 Simulation workflow diagram of this article

1.2 FinFET模型

14 nm SOI FinFET结构如图2所示。其主要参数包括栅极长度(L_g)、源/漏极长度($L_{S/D}$)、源/漏极扩展区长度($L_{S/Dext}$)、等效氧化层厚度(T_{ox})、鳍高(H_{fin})、鳍宽(W_{fin})以及源漏区域掺杂浓度($N_{S/D}$)、沟道区域掺杂浓度($N_{channel}$)等。主要参数的具体取值如表1所示。

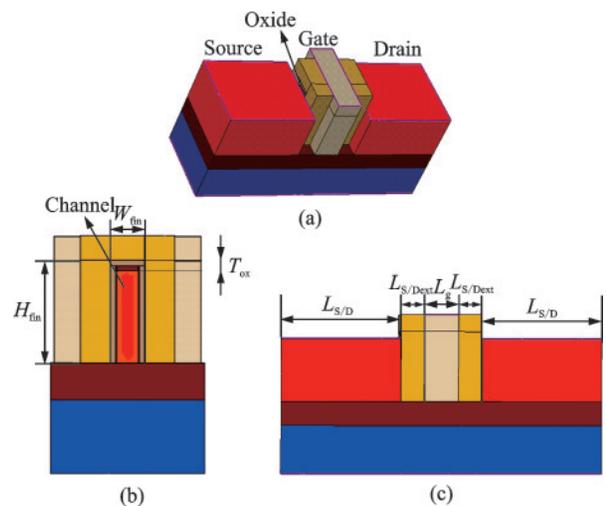


图2 FinFET器件的仿真模型:(a)模型三维结构;(b)模型侧视图;(c)模型正视图

Fig.2 Simulation model of FinFET device: (a) Three-dimensional structure of the model; (b) Side view of the model; (c) Front view of the model

表1 仿真模型主要参数取值

Tab.1 Main parameter values of simulation model

Parameter	L_g/nm	$L_{S/D}/\text{nm}$	$L_{S/Dext}/\text{nm}$	T_{ox}/nm	H_{fin}/nm	W_{fin}/nm	Oxide material	Metal gate material	$N_{channel}/\text{cm}^{-3}$	$N_{S/D}/\text{cm}^{-3}$
Value	14	50	10	0.5	26	6.5	HfO ₂	TiN	1.0×10^{15}	1.0×10^{21}

标准 FinFET 结构建立后,为了更精确模拟出小尺寸场效应管在工作过程中可能发生的物理效应,需要在 SDEVICE 中加入相应的物理模型,以提高仿真结果的准确性^[4]。本文研究的物理模型包括:载流子复合产生模型、迁移率退化模型、能带模型以及量子化模型^[5]。其中,载流子复合产生模型选用肖克莱(SRH)复合模型,选取 OldSlotboom 模型作为能带模型设置 FinFET 的有效禁带宽度,从而确定模型半导体材料中的本征载流子浓度。对于迁移率退化模型,可以将多个迁移率模型进行组合,以模拟真实工作状态下多种因素引起的迁移率退化,本文选用了高饱和场基本模型,考虑到所仿真器件结构的尺寸,还结合了薄层迁移率模型并与 IALMob 模型组合使用。当模拟场效应管在饱和区工作状态时,本文还考虑了晶格散射和栅氧材料交界面上的界面陷阱电荷所引起的迁移率退化,并在 SDEVICE 中添加了 Philips 模型,使仿真更加贴合实际情况。

完成上述工作后,对 FinFET 模型进行精细化调整。首先在相同的等效氧化物厚度(Equivalent oxide thickness, EOT)下,使用高介电常数材料 HfO₂ 作为栅氧化层以减少栅极漏电流。通过 HfO₂

和常规栅氧化层材料 SiO₂ 的介电常数便可以换算得到 EOT 不变情况下 HfO₂ 层应有的厚度。

最后本文在源极和漏极分别添加分布电阻以调整 FinFET 模型的工作电流。漏极电压(V_d)为 0.05 V、0.8 V 时,漏极电流随栅极电压的变化曲线(I_d-V_g)在 Sentaurus 软件中仿真结果与 IBM 公司发布的实验数据^[1]的对比如图 3 所示,其中 I_d 经过了有效沟道周长归一化处理。FinFET 模型电学参数计算结果见表 2,其中 SS_{lin} 为线性区亚阈值摆幅, SS_{sat} 为饱和区亚阈值摆幅, $DIBL$ 为漏致势垒降低(Drain induced barrier lowering)。

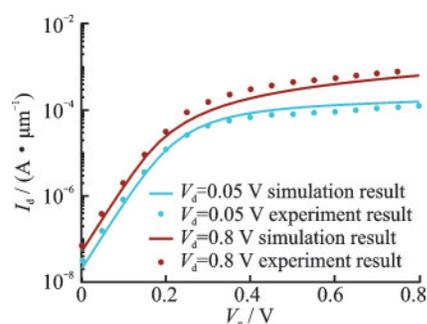


图3 FinFET 模型仿真结果与实验数据对比

Fig.3 Comparison between FinFET model simulated results and experimental data

表 2 FinFET 主要电学参数仿真结果

Tab.2 Simulated results of main electrical parameters of FinFET

Parameter	$V_{th,lin}$ /mV	$V_{th,sat}$ /mV	$I_{on,lin}$ / μ A	$I_{on,sat}$ / μ A	$I_{off,lin}$ /nA	$I_{off,sat}$ /nA	$I_{on}/I_{off,lin}$	$I_{on}/I_{off,sat}$	SS_{lin} /(mV \cdot dec ⁻¹)	SS_{sat} /(mV \cdot dec ⁻¹)	$DIBL$ /(mV \cdot V ⁻¹)
Value	127.6	98.74	9.213	37.39	1.149	2.922	8.018×10^3	1.280×10^4	64.82	65.05	38.84

2 工艺波动效应计算方法

在标准 14 nm SOI FinFET 模型的基础上,分别介绍两种计算工艺波动效应的方法:sIFM 和 RPM 的基本原理和实现步骤。

2.1 sIFM 及数据提取方法

sIFM 可以用于计算金属功函数波动对 FinFET 电学特性的影响,在工艺生产的过程中,金属功函数的随机化仅限于金属-氧化物界面处,金属栅极除界面以外区域的功函数值为金属材料固有功函数 W_{ref} 。sIFM 法实现的首先步骤是求解金属-氧化物界面处金属功函数与材料固有功函数一致时,FinFET 参考器件的完整 3D TCAD 解。随后将界面上随机功函数 W_v 与金属材料固有功

数 W_{ref} 的差 δW_v 视为线性微扰并求解所对应的界面上 c 点处电流对微扰的线性响应 $\delta I_{v,c}$ 。以漏极电流对微扰 δW_v 的线性响应 $\delta I_{v,d}$ 为例,计算公式为:

$$\delta I_{v,d} = \sum \int G_d(\mathbf{r}) \delta W_v(\mathbf{r}) d^3 \mathbf{r} \quad (1)$$

其中格林函数 $G_d(\mathbf{r})$ 也称为阻抗场,它是根据参考器件的 TCAD 解计算的,不会随着金属功函数的随机波动而波动,因此,无论考虑多少工艺随机波动样本,格林函数都只需计算一次。

计算得到 N 个工艺随机波动样本对应扰动的线性电流响应后,计算漏极电流标准偏差 σI_d 和栅极电压标准偏差 σV_g 的公式如式(2)-(4)所示,其中 $Y_{d,g}$ 为漏极和栅极间的跨导。再通过 σI_d 和 σV_g 随 V_g 的变化便可提取出 V_{th} 、 I_{off} 、 I_{on} 等电学特性参数在金属功函数随机分布样本下的期望值与标准偏差。

$$\sigma I_d = \sqrt{1/N \sum_v (\delta I_{v,d} - \langle \delta I_{v,d} \rangle)^2} \quad (2)$$

$$\langle \delta I_{v,d} \rangle = \frac{1}{N} \sum_v \delta I_{v,d} \quad (3)$$

$$\sigma V_g = \frac{\sigma I_d}{Y_{d,g}} \quad (4)$$

同时,根据电流的线性响应与参考器件的 I_d-V_g 曲线可以建立每个随机波动对应的 I_d-V_g 曲线,由此求出在金属功函数随机分布样本下对应的 V_{th} 、 I_{off} 、 I_{on} 等电学特性参数的随机分布模型。

2.2 RPM方法

快速预测工艺波动效应方法的主要思想是通过少量金属功函数样本进行求解,以建立金属功函数在合理范围内波动时电学特性参数随金属功函数变化的模型,通过该模型可以快速求解合理范围内任意金属功函数随机分布对应的电学特性参数分布情况,其具体实现步骤如下:

首先对目标器件在有限组金属功函数下的完整 3D TCAD 解进行求解以获取器件的 I_d-V_g 曲线并从中提取器件的 $V_{th,lin}$ 、 $V_{th,sat}$ 、 $I_{on,lin}$ 、 $I_{on,sat}$ 、 $I_{off,lin}$ 、 $I_{off,sat}$ 等电学特性参数,构建预测工艺波动对电学特性参数影响模型所需要的数据集。数据集包括器件栅极材料的表面金属功函数向量组 $W=(W_1, W_2, \dots, W_n)$,此向量组是根据目标器件金属栅极材料的物理性质,在场效应管金属栅极材料不同晶向对应的金属功函数范围内选取少量的金属功函数样本值组成的。除此以外,数据集还包括从求解得到的器件的漏极电流与栅极电压关系曲线组提取出的该器件的 V_{th} 、 I_{on} 、 I_{off} 等电学特性参数组成的向量组 $V_{th,lin}$ 、 $V_{th,sat}$ 、 $I_{on,lin}$ 、 $I_{on,sat}$ 、 $I_{off,lin}$ 、 $I_{off,sat}$ 。

随后根据上述数据集计算器件不同电学特性参数与金属功函数的拟合函数,并用统计学参数相关系数验证拟合函数的合理性,生成的拟合参数组成了金属功函数波动效应预测模型。

在得到金属功函数与器件电学特性的拟合函数后,根据工艺生产过程中金属功函数波动产生的机制建立金属功函数波动分布概率模型,并在此概率模型的基础上生成大量金属功函数随机样本。

最后向验证完毕的金属功函数波动效应预测模型输入待预测的器件金属功函数波动随机样本,得到该器件在金属功函数工艺波动下 V_{th} 、 I_{off} 、 I_{on} 等电学特性参数的随机分布模型,并计算各电学特性参数随机分布模型的期望值、标准差、极差等统计学参数。

3 计算过程及结果对比分析

3.1 sIFM 计算过程

在求得如图 3 所示的器件参考解后,假定金属栅极与栅氧化物界面处的金属晶粒晶向随机分布,利用 Sentaurus 软件通过定义不同晶向的晶粒所对应的金属功函数与出现的概率以完成金属功函数的随机化。由于在实际工艺生产过程中,为了改善常规晶体管在小尺寸工艺节点下关断电流大、亚阈值斜率小的缺点,人们常采用特殊工艺改变栅极材料的功函数以改善器件性能^[6],因此本文在设定金属功函数波动范围时综合考虑了 NMOS 器件对栅极有效金属功函数的实际需求^[9]以及工艺条件、偶极子^[7]和界面化学计量配比^[8]对 TiN 有效功函数变化范围的影响,最终设定 4.20~4.65 eV 为本文金属功函数的随机波动范围。

在参考模型上加入上述的随机波动后,计算得到金属功函数随机波动在器件工作过程中造成的电流响应,并由此计算出漏极电流标准偏差 σI_d ,画出对应的 σI_d-V_g 曲线。金属功函数在 4.20~4.65 eV 范围内波动时线性区和饱和区 σI_d 随 V_g 变化的曲线如图 4 所示。

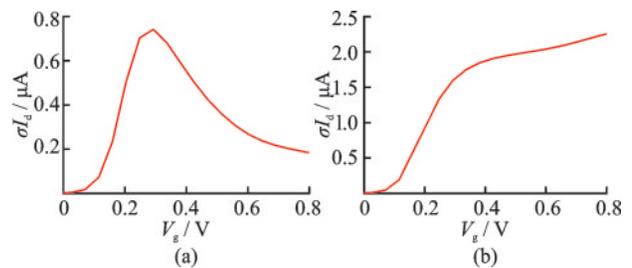


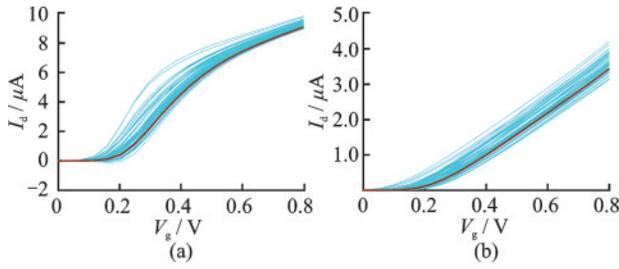
图4 σI_d-V_g 曲线:(a)线性区;(b)饱和区

Fig.4 σI_d-V_g curves: (a) Linear region; (b) Saturation region

从图 4 所示的曲线中可以直观的看出,不论是在线性区还是饱和区,线性电流响应都在亚阈值、近阈值区域显著变大,这与栅极金属功函数直接影响器件的栅控能力的原理相符,侧面验证了结果的合理性。

随后再根据线性电流响应建立每个随机波动对应的 I_d-V_g 曲线,为使图片内容清晰便于分析,只选取 10 000 个随机结果的前 50 个随机功函数对应的 I_d-V_g 曲线进行绘制,如图 5 所示,其中加粗的红线为没有任何波动下的参考转移特性曲线,剩余 50 条为 I_d-V_g 的随机波动曲线。

在建立随机波动对应的 I_d-V_g 曲线组后,便可提取出电学参数随机分布的直方图。

图5 I_d - V_g 曲线随机波动:(a)线性区;(b)饱和区Fig.5 Random fluctuation of I_d - V_g curves: (a) Linear region; (b) Saturation region

3.2 RPM 计算过程

从金属栅极材料功函数波动范围 4.20~4.65 eV 内选取一组均匀分布的功函数值 $W=(W_1, W_2, \dots, W_{19})$, 使用 TCAD 软件构建每个功函数值对应的 FinFET 器件模型, 并求解每个 FinFET 器件模型在两个固定漏极电压 0.05 V、0.8 V 下, 栅极电压变化范围为 0~0.8 V 之间的漏极电流和栅极电压关系曲线组 (I_d - V_{g1} , I_d - V_{g2} , \dots , I_d - V_{g19}), 最后从这一组功函数值对应的器件漏极电流和栅极电压关系曲线中提取该器件在两种工作模式下的电学特性参数阈值电压向量组 $V_{th}=(V_{th1}, V_{th2}, \dots, V_{th19})$ 、工作电流向量组 $I_{on}=(I_{on1}, I_{on2}, \dots, I_{on19})$ 、关断电流向量组 $I_{off}=(I_{off1}, I_{off2}, \dots, I_{off19})$ 。

在求解得到上述均匀分布功函数对应的电学特性参数值后, 按照 10:9 的比例将其分为训练集和验证集, 训练集用于计算得到本实施例器件的金属栅极功函数在合理波动范围内与各电学特性参数的拟合函数, 验证集数据用于验证预测模型拟合函数的准确性。本文中 FinFET 器件的 $V_{th,lin}$ 、 $V_{th,sat}$ 、 $I_{on,lin}$ 、 $I_{on,sat}$ 与 W 的关系较为简单, 用多项式拟合法便可以较好的拟合; $I_{off,lin}$ 、 $I_{off,sat}$ 与金属功函数向量组的拟合关系近似于指数关系, 因此用指数函数进行拟合。各电学特性参数与 W 的拟合函数如式 (5)-(10) 所示, 经检验, 验证集和训练集的相关系数 R^2 均达到了 0.95 以上。拟合函数曲线与训练集、验证集关系如图 6 所示。

$$f_{V_{th,lin}}(W) = 1.0011 - 4.1961W \quad (5)$$

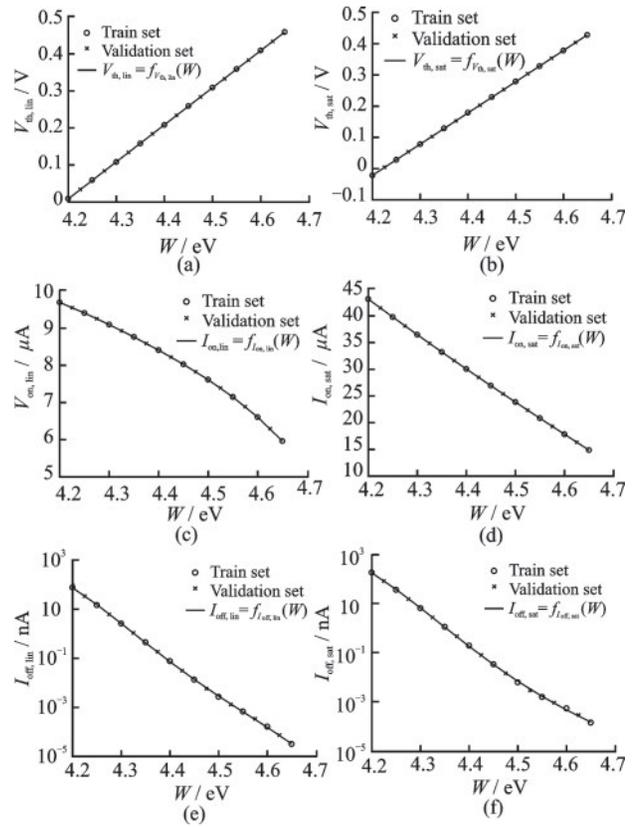
$$f_{V_{th,sat}}(W) = 1.0000 - 4.2216W \quad (6)$$

$$f_{I_{on,lin}}(W) = 0.0007W - 0.0044W^2 + 0.0128W^3 - 0.0139W^4 \quad (7)$$

$$f_{I_{on,sat}}(W) = 0.0004W - 0.0026W^2 + 0.0074W^3 - 0.0077W^4 \quad (8)$$

$$f_{I_{off,lin}}(W) = 10^{(-1180 + 2096W - 13955W^2 + 41245W^3 - 45659W^4)} \quad (9)$$

$$f_{I_{off,sat}}(W) = 10^{(-69 + 1248W - 8450W^2 + 25362W^3 - 28484W^4)} \quad (10)$$

图6 电学特性参数向量组与金属功函数向量组的拟合函数:(a) $V_{th,lin}$; (b) $V_{th,sat}$; (c) $I_{on,lin}$; (d) $I_{on,sat}$; (e) $I_{off,lin}$; (f) $I_{off,sat}$ Fig.6 Fitting function between electrical characteristic parameter vector group and metal work function vector group:(a) $V_{th,lin}$; (b) $V_{th,sat}$; (c) $I_{on,lin}$; (d) $I_{on,sat}$; (e) $I_{off,lin}$; (f) $I_{off,sat}$

随后, 对 FinFET 器件的栅氧材料界面进行网格划分和建模。建模的过程考虑了参考器件金属栅材料 TiN 的金属颗粒度, 设定钛的氮化物在工艺生长的过程中金属颗粒度为 5 nm 并据此规定网格划分的方式。与 Sentaurus 中生成金属功函数波动分布概率模型的原理相同, 生成金属功函数波动分布概率模型的过程参考了 TiN 在生长工艺中的晶向分布概率与对应功函数, 设定对应功函数为 4.20、4.30、4.65 eV 的晶向晶粒出现的概率分别为 50%、30%、20%。依据上述原理生成 10 000 个钛的氮化物晶粒随机分布样本后, 再用加权平均的方式计算出每个随机分布样本对应的等效金属功函数值。等效金属功函数样本分布直方图及其拟合的高斯分布曲线如图 7 所示, 金属功函数随机样本拟合的高斯分布函数式为:

$$f(W|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(W-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

其中 μ 的值为 4.320, σ 的值为 0.022。

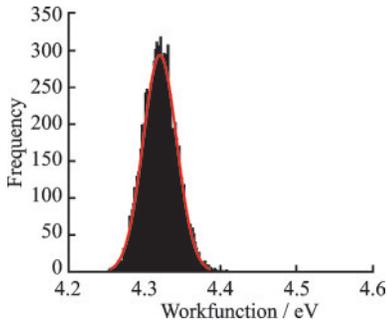


图7 金属功函数随机样本分布及拟合曲线

Fig.7 Random sample distribution and fitting curve of metal work-function

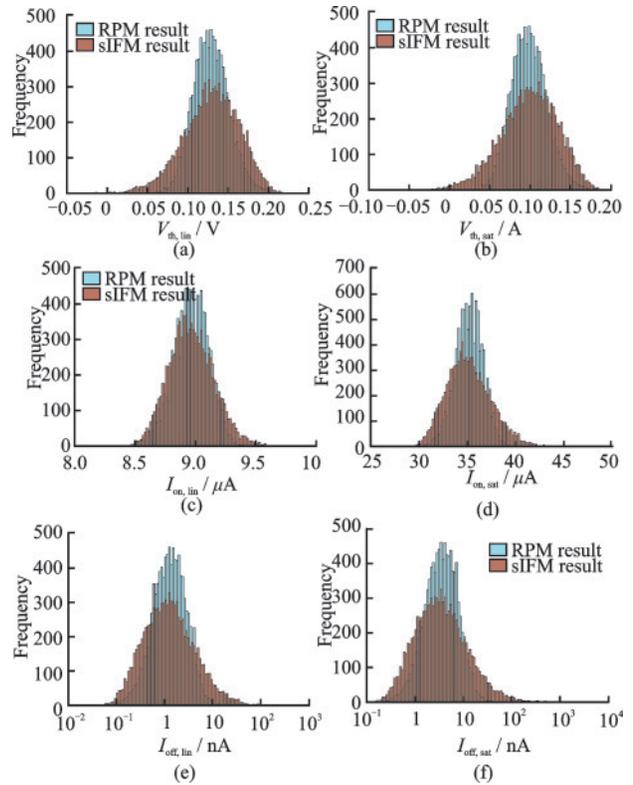
最后,向前文所述建立好的预测模型中输入上一步中生成的10 000个等效金属功函数样本,预测模型便可以通过各个电学特性参数与金属功函数的拟合参数快速地计算出等效金属功函数样本对应的电学特性参数分布,从而预测工艺生产过程中金属功函数的随机波动给器件电学特性带来的影响。

如上所述不难看出,以样本数为10 000为例,sIFM通过求解一次器件TCAD解得到格林函数,随后对格林函数与金属功函数波动进行10 000次卷积求解器件 I - V 曲线对金属功函数波动(Workfunction variation, WFV)的响应,而RPM通过数十次求解器件TCAD解,得到器件电学参数与金属功函数的拟合关系,从而得到金属功函数随机样本所对应的电学特性参数分布样本,完成对金属功函数波动效应的预测。RPM虽然比sIFM多进行了数十次TCAD求解,但是节省了卷积运算的时间,虽然在样本数为10 000时两种计算方法所需时间较为接近,但是当样本数量进一步提升时,RPM由于规避了大量的卷积运算以及后续所需的提取电学参数过程,因此其所需运算时间将低于sIFM。

3.3 结果对比及分析

sIFM与RPM分别计算出金属功函数波动效应下各电学特性参数分布直方图的叠加对比如图8所示,两者分布的期望值、方差如表3所示,两者计算出各电学特性参数分布的最大值和最小值与理论最大值和最小值的对比如表4所示。由于上述器

件的电学特性在金属功函数变化范围为4.20~4.65 eV时单调^[10],因此可以通过求解金属功函数取值4.20 eV和4.65 eV时器件的TCAD解得到表4中的理论最大值与最小值。

图8 RPM与sIFM计算直方图对比:(a) $V_{th,lin}$; (b) $V_{th,sat}$; (c) $I_{on,lin}$; (d) $I_{on,sat}$; (e) $I_{off,lin}$; (f) $I_{off,sat}$ Fig.8 Comparison of RPM and sIFM calculation histograms: (a) $V_{th,lin}$; (b) $V_{th,sat}$; (c) $I_{on,lin}$; (d) $I_{on,sat}$; (e) $I_{off,lin}$; (f) $I_{off,sat}$

如表3所示,两种计算方法得到的所有电学特性参数 $V_{th,lin}$ 、 $V_{th,sat}$ 、 $I_{on,lin}$ 、 $I_{on,sat}$ 、 $I_{off,lin}$ 、 $I_{off,sat}$,以10为底取对数后分布的期望值的相似程度都至少达到了小数点后三位。同时从图8可以看出,RPM计算出 $V_{th,lin}$ 、 $V_{th,sat}$ 分布的最大值以及 $I_{on,lin}$ 、 $I_{on,sat}$ 、 $I_{off,lin}$ 、 $I_{off,sat}$ 分布的最小值都与sIFM计算结果近似度极高,这一定程度上验证了RPM的准确性。另外,如图8和表4所示,RPM计算结果中各电学特性参数分布的方差都小于sIFM计算结果的分布方差;对于电学特性参数

表3 RPM与sIFM结果期望值与标准差对比

Tab.3 Comparison of expected values and standard deviations between RPM and sIFM results

Parameter	$V_{th,lin} / V$		$V_{th,sat} / V$		$I_{on,lin} / \mu A$		$I_{on,sat} / \mu A$		$I_{off,lin} / nA$		$I_{off,sat} / nA$	
	RPM	sIFM	RPM	sIFM	RPM	sIFM	RPM	sIFM	RPM	sIFM	RPM	sIFM
Expected value	0.128	0.129	0.098	0.099	8.960	8.960	35.20	35.20	1.71	2.87	4.67	8.28
Standard deviation	0.022	0.034	0.022	0.035	0.146	0.183	1.42	2.25	1.42	7.21	3.84	27.30

表4 RPM与sIFM计算结果最大值、最小值与理论值的对比

Tab.4 Comparison between the maximum and minimum values calculated by RPM and sIFM and the theoretical values

Value	Method	$V_{th,lin}/V$	$V_{th,sat}/V$	$I_{on,lin}/\mu A$	$I_{on,sat}/\mu A$	$I_{off,lin}/nA$	$I_{off,sat}/nA$
Maximum value	RPM	0.215	0.185	9.43	40.0	17.1	45.4
	sIFM	0.219	0.190	9.80	45.4	348.0	1 720.0
	Theoretical	0.460	0.432	9.96	46.5	75.8	178.0
Minimum value	RPM	0.055	0.025	8.36	29.6	5.77×10^{-2}	1.54×10^{-1}
	sIFM	-0.048	-0.070	8.46	29.4	5.29×10^{-2}	1.42×10^{-1}
	Theoretical	0.010	-0.018	6.10	15.2	3.16×10^{-5}	1.26×10^{-4}

$V_{th,lin}$ 、 $V_{th,sat}$ 、 $I_{off,lin}$ 、 $I_{off,sat}$, sIFM 计算结果的极值落在理论值以外的范围,而RPM计算结果中所有电学特性的参数都落在理论极值范围以内。上述结果偏差规律符合sIFM与原子级仿真计算结果间由导体网络非线性效应引起的系统性偏移^[1],从而验证了sIFM的模型误差会导致最终的计算结果出现不符合常理的误差,而RPM则规避了这种情况。

4 结 论

本文提出一种简便、快速预测半导体场效应管金属功函数波动效应的方法,并在14 nm SOI FinFET模型上与统计阻抗场法计算结果进行对比验证。计算结果表明:当样本数量足够大时,RPM在计算量远小于sIFM的情况下,其计算结果具有与sIFM法相当的精度,且由于RPM规避了sIFM中的模型误差,因此在精度提升方面具有更大的潜力。RPM法不仅可以应用于预测金属功函数波动效应,亦可以适用于随机掺杂波动、界面陷阱波动和氧化层厚度变化等半导体场效应管制造过程中的常见工艺波动。综上所述,本文提出的快速预测法,由于其较高的精度和较快的计算速度,在预测半导体场效应管工艺波动效应方面具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Wettstein A, Sayed K E, Lyumkis E. Modeling statistical variability with the impedance field method- A systematic comparison between the impedance field and the "atomistic" method[C]. International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, SISPAD 2012. Denver, CO, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2012: 205-208.
- [2] Lin C H, Greene B, Narasimha S, et al. High performance 14 nm SOI FinFET CMOS technology with 0.0174 m² embedded DRAM and 15 levels of Cu metal-

ization[C]. IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). San Francisco: IEEE, 2014: 3.8.1-3.8.3.

- [3] Wu Y C, Jhan Y R. 3D TCAD Simulation for CMOS Nanoelectronic Devices[M]. Singapore: Springer Singapore, 2018: 9-10.
- [4] 孙俊雅. 14纳米节点FinFET器件自热效应及其建模研究[D]. 上海:华东师范大学, 2019.
- [5] Lakshmi B, Srinivasan R. 3D-TCAD simulation study of process variations on f_i in 30 nm gate length FinFET [C]. 2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology. Nagercoil, India: IEEE Computer Society, 2011: 589-593.
- [6] Vitale S A, Kedzierski J, Healey P, et al. Work-function-tuned TiN metal gate FDSOI transistors for sub-threshold operation[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2011, 58(2): 419-426.
- [7] Kita K, Toriumi A. Origin of electric dipoles formed at high-k/SiO₂ interface[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(13): 132902.
- [8] Pandey R K, Sathiyarayanan R, Kwon U, et al. Role of point defects and HfO₂/TiN interface stoichiometry on effective work function modulation in ultra-scaled complementary metal-oxide-semiconductor devices[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(3): 387-231.
- [9] Maiti B, Tobin P J. Metal gates for advanced sub-80 nm SOI CMOS technology[C]. 2001 IEEE International SOI Conference. Durango, CO, USA: IEEE, 2001: 91-92.
- [10] Kumar A. Parameters variation effect on drain current for GAAFET: analysis[C]. 2022 IEEE 6th Conference on Information and Communication Technology (CICT). Gwalior, India: IEEE, 2022: 1-5.



李怡宁(LI Yining) 女,2000年生,东南大学在读硕士研究生。主要研究方向为半导体器件仿真。