

# 2021年全国辐射探测微电子学术交流会 深亚微米工艺低温特性解析模型研究

报告人: 刘海峰单位: 中国原子能科学研究院日期: 2021年11月27日







**China National Nuclear Corporation** 

PART 01. 研究背景及意义 **Background & Objective** PART 02. 低温特性解析模型推导 **Research** contents PART 03. 总结 Summary







低温微电子学

- ●空间应用。功率器件以及空间抗辐照研究、红外探测器的读出电路等。
- ●核探测。高纯锗探测器读出电路。

●新材料研究。高温超导体研究和石墨烯器件研究。

低温微电子学优点及意义

●低温微电子技术为突破现有等比例缩小原则下的器件线宽极限提供方向。

●低温载流子迁移率会变高,晶体管开关特性变好、电路运行速度提升。

●设计出信噪比更高、带宽、增益更大的运放电路等。



国内外研究现状

国外20世纪80年代开始对极端低温微电子技术的研究,目前,从国报道的大型低温超算等大型设备及性能来看,极端低温微电子技术也较为成熟,而且细化。

目前国内报道的在低温条件下CMOS晶体管建模的成果一般以测试结果或定性分析居 多,没有深入、定量的理论分析。通过低温下测量特定工艺CMOS晶体管的特性曲线,修改经 典模型里的相关参数,得到低温下的物理仿真实用模型。

优点:基于经典模型,实用性较强。

缺点: 在于针对不同工艺,需要进行大量参数测量,并修改相关参数。在深亚微米工艺下, 由于经典模型的误差越来越大,这种方法所得出结果的实用性也会大打折扣。





### 低温CMOS芯片设计带来的挑战

#### 理论上的挑战。

●MOSFET晶体管的电势分布是典型的有衔接条件的边值问题,一般有衔接条件的二维定 解问题,难以得到解析表达式。其原因是根据衔接条件得到的代数方程是一组含有无穷级 数的超越方程,无法直接解出方程中的未知系数。诸多解法例如半解析法用最小平方等数 值解法也仅能解出有限个系数,写不出具体解析公式。

现实的挑战。缺少有效仿真模型库。现有大部分CMOS芯片电路一般工作的温度在-40°C~125°C之间。工艺厂家一般都不提供低温下的工艺参数,这样就给针对低温应用的电 路设计带来了难度。主流设计软件采用经典的BSIM3V3模型在整个温度范围内,均采用一 阶近似。这一近似在-40°C~125°C温度范围内误差较小,但是在-40°C以下因为其拉格朗日 余项的影响,误差开始慢慢变大。



# Part 2

### 低温特性解析模型推导

Derivation of Analytical Model of Low Temperature Characteristic













### 以NMOS晶体管为例进行推导,阈值电压为:

$$V_{\rm th} = \Phi_{ms} - \frac{Q_{\rm ss}}{C_{\rm ox}} + 2\Phi_f + \frac{\sqrt{4\varepsilon_{\rm si}\varepsilon_0 q N_a \Phi_f}}{C_{\rm ox}}$$

多晶硅栅极与衬底功函数差: 
$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\Phi_{s_i} + \frac{E_s}{2q} + \Phi_f\right)$$

衬底的费米势:  $\Phi_f = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$ 

本征载流子浓度: 
$$n_i = \mathbf{C} \cdot T^{3/2} \exp\left(\frac{-E_s}{2\mathbf{k}T}\right)$$

阈值电压随温度变化率:

$$\frac{\mathrm{d}V_{th}}{\mathrm{d}T} = \frac{1}{T} \left( 2 + \frac{\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{si}}\varepsilon_{0}\mathrm{q}\mathrm{N}_{a}}}{C_{\mathrm{ox}}\sqrt{\Phi_{f}}} \right) \left( \Phi_{f} - \frac{3\mathrm{k}T}{2\mathrm{q}} - \frac{E_{g}}{2\mathrm{q}} \right)$$

9

#### 

# 2.低温特性模型推导













2. 低温特性模型推导

分段线性化



图3 阈值电压随温度T的变化率曲线

在  $[T_{n-1}, T_n]$  温度范围内

$$V_{th}(T_n) = V_{th}(T_{n-1}) + \frac{dV_{th}}{dT}\Big|_{T=T_{n-1}}(T_n - T_{n-1})\Big|$$

......



# 2. 低温特性模型推导

主项近似积分法

$$\begin{aligned} \frac{d^2 V_{th}}{dT^2} &= A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \\ A_1 &= -\frac{1}{T^{3/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si} \varepsilon_0 N_a k \left( \ln \frac{N_a}{C} - \frac{3}{2} \ln T + \frac{E_g}{2kT} \right)}}{2C_{ox}} \\ A_2 &= \frac{1}{T^{5/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si} \varepsilon_0 N_a} \cdot E_g}{2C_{ox} \sqrt{k \left( \ln \frac{N_a}{C} - \frac{3}{2} \ln T + \frac{E_g}{2kT} \right)}} \\ A_3 &= -\frac{1}{T^{3/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si} \varepsilon_0 k N_a} \left( \frac{3}{2} + \frac{E_g}{2kT} \right)^2}{2C_{ox} \left[ \left( \ln \frac{N_a}{C} - \frac{3}{2} \ln T + \frac{E_g}{2kT} \right) \right]^{3/2}} \\ A_4 &= -\frac{1}{T} \frac{3k}{q} \end{aligned}$$

•经过数值计算可知,在 $N_a$ 取10<sup>9</sup>~10<sup>18</sup>/cm<sup>2</sup>时, $A_4$ 是前3项的100~200倍,于是可认为 $A_4$ 是主项。

●为了更为精确描述其他项的影响引入系数*m*(*m*在不同工艺下取值有所区别,可根据实际情况中主项与其他项的关系来定)。

 $\frac{\mathrm{d}^2 V_{th}}{\mathrm{d}T^2} \approx -\frac{1}{T} \frac{3\mathrm{k}}{\mathrm{q}} \left(1 + m\right)$ 

●对该主项求两次积分,加上边界条件,即可求出 近似解。

$$V_{th} \approx \int_{T_0}^T \left( \int_{T_0}^T -\frac{1}{T} \frac{3k}{q} (1+m) dT \right) dT$$
  
●同样,以SMIC0.18µm工艺为例,m取0.01,得到  
$$V_{th} = 5.9061 \times 10^{-4}T + \frac{3.03k}{q} T (1-\ln(T)) + 0.6395$$



# 2. 低温特性模型推导

主项近似积分法

$$\begin{aligned} \frac{d^2 V_{th}}{dT^2} &= A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \\ A_1 &= -\frac{1}{T^{3/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si} \varepsilon_0 N_a k \left( \ln \frac{N_a}{C} - \frac{3}{2} \ln T + \frac{E_g}{2kT} \right)}}{2C_{ox}} \\ A_2 &= \frac{1}{T^{5/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si} \varepsilon_0 N_a} \cdot E_g}{2C_{ox} \sqrt{k \left( \ln \frac{N_a}{C} - \frac{3}{2} \ln T + \frac{E_g}{2kT} \right)}} \\ A_3 &= -\frac{1}{T^{3/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si} \varepsilon_0 k N_a} \left( \frac{3}{2} + \frac{E_g}{2kT} \right)^2}{2C_{ox} \left[ \left( \ln \frac{N_a}{C} - \frac{3}{2} \ln T + \frac{E_g}{2kT} \right) \right]^{3/2}} \\ A_4 &= -\frac{1}{T} \frac{3k}{q} \end{aligned}$$

•经过数值计算可知,在 $N_a$ 取10<sup>9</sup>~10<sup>18</sup>/cm<sup>2</sup>时, $A_4$ 是前3项的100~200倍,于是可认为 $A_4$ 是主项。

●为了更为精确描述其他项的影响引入系数*m*(*m*在不同工艺下取值有所区别,可根据实际情况中主项与其他项的关系来定)。

 $\frac{\mathrm{d}^2 V_{th}}{\mathrm{d}T^2} \approx -\frac{1}{T} \frac{3\mathrm{k}}{\mathrm{q}} \left(1 + m\right)$ 

●对该主项求两次积分,加上边界条件,即可求出 近似解。

$$V_{th} \approx \int_{T_0}^T \left( \int_{T_0}^T -\frac{1}{T} \frac{3k}{q} (1+m) dT \right) dT$$
  
•同样,以SMIC0.18µm工艺为例,m取0.01,得到  
 $V_{th} = 5.9061 \times 10^{-4}T + \frac{3.03k}{q} T (1-\ln(T)) + 0.6395$ 



### 主项近似积分法------求取边界条件

●运用主项近似积分法的一个前提是在得到*T*=300K边界条件*V*<sub>th0</sub> ●如果是目前规模化的主流工艺的话,那么可通过在*T*=300K下的 仿真得出边界条件。否则,需要在一定边界条件情况下求解二维 泊松方程得到。  $\begin{cases} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \frac{\rho}{\varepsilon_s} \end{cases}$ 

$$\left[ U \right|_{y=0} = V_{\rm S}, \quad U \right|_{y=\rm L} = V_{\rm D}$$

其中, x轴正方向从栅极指向衬底, y轴正方向沿沟道由源极指向漏极。V<sub>s</sub>表示源极电势, V<sub>D</sub>表示漏极电势。



图4晶体管结构坐标示意图

5

对于深亚微米的定制工艺,直接求解此二维泊松方程能得到解析解,且效果较好,但其结果是无穷级数,需要多达50~80项分量,才能保证得到较高精度,这样不利于对物理过程的理解和应用。



## 主项近似积分法------求取边界条件

对于长沟道器件,假设沟道是均匀掺杂的,那么在沟道垂直方向上使用一维泊松方程就可以得到阈值电压表达式,接着分别考虑横向和纵向非均匀掺杂的影响,分别引入影响因子h<sub>1</sub>、*N*<sub>1x</sub>和v<sub>1</sub>(这三个因子可由实验测得),得到考虑了非均匀掺杂后的阈值电压表达式





2.低温特性模型推导

模型验证及对比

◆在SMIC0.18µm工艺下,通过与二维数值仿 真软件Medici的仿真结果、BSIM3V3模型进 行对比,发现随着温度降低,阈值电压升高 ,升高的速率趋向于平缓。

主项近似积分法模型在低温4K~225K范围内与分段线性化模型非常接近。在225K以上的温度与BSIM3V3模型有较大偏差,是因为主项在225K以上与其他项的差距变小导致的。
低温4K~225K范围内主项近似积分模型与MEDICI软件仿真结果相比,趋势较为一致,最大偏差在4%以内。



●Medici仿真部分结构参量: 源漏掺杂浓度 9e17cm<sup>-3</sup>; 氧化层厚度3.74nm, 零衬偏, 氧化 层电荷面密度1e10cm<sup>-2</sup>;



18

迁移率模型

在低温下,载流子迁移率由两部分组成,第一部分声子散射(晶格散射),第二部分库伦散射,包括自由载流子、电离杂质造成的散射。这些散射机制通过Matthiessen准则进行加和。





漏电流模型

在BSIM3V3模型的基础上,引入冻析效应的影响。冻析效应模型主要通过R<sub>freeze</sub>体现。

$$R_{freeze} = \frac{\left[R_{fo} + R_{vd} \times (R_{ds} + S_{mall})^{M_{rvd}}\right] (1 + R_{vg1} - R_{vg2}V_{bseff})}{W_{eff}^{Rfwr}}$$

$$R_{fo} = R_{FO} + R_{FOT1} \left(\frac{T}{T_{nom}} - 1\right) + R_{FOT2} \left(\frac{T}{T_{nom}} - 1\right)^{2}$$

 $\mathbf{R}_{FO}$ 指单位宽度冻析效应电阻, $R_{FOT1}$ 和 $R_{FOT2}$ 分别指 $\mathbf{R}_{fo}$ 的一阶和二阶温度系数。





总结

Summary

-----

T







●在研究深亚微米工艺低温特性过程中,从阈值电压温度效应物理机理出发,通过分段线 性化和主项近似积分法结合常温下的边界条件建立起4K~423K温度范围内的阈值电压解析 模型。与MEDICI软件仿真结果相比,趋势较为一致,最大偏差在4%以内,验证了模型的 有效性。

●常温下的边界条件获取过程中,在均匀掺杂长沟道器件阈值电压表达式基础上,分别考虑 横向、纵向非均匀掺杂,以及漏致势垒下降效应带来的影响,通过求解简化的耗尽区准泊 松方程,得到常温边界条件通式。

●载流子迁移率模型中,低温时库伦散射采用Phumod模型进行计算;

●漏电流模型是在BSIM3V3模型的基础上引入冻析效应的影响。

●后续将根据模型,设计相应的低温芯片电路对模型进行测试验证并优化。





