

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







PART DI. 研究背景及意义

Background & Objective

PART D2. 低温特性解析模型推导

Research contents

PART 03. 总结

Summary



Part 1

研究背景及意义

Background





1.研究背景及意义

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。





1.研究背景及意义

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。





1.研究背景及意义

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℃~125℃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℃~125℃温度范围内误差较小,但是在-40℃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







模型组成

低温特性模型

阈值模型

迁移率模型

漏电流模型

阈值模型

以NMOS晶体管为例进行推导, 阈值电压为:

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

多晶硅栅极与衬底功函数差:
$$\Phi_{ms} = \Phi_{m} - \left(\Phi_{S_{i}} + \frac{E_{g}}{2q} + \Phi_{f}\right)$$

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

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

阈值电压随温度变化率:

$$\frac{\mathrm{d}V_{th}}{\mathrm{d}T} = \frac{1}{T} \left(2 + \frac{\sqrt{\varepsilon_{si}\varepsilon_0 q N_a}}{C_{ox}\sqrt{\Phi_f}} \right) \left(\Phi_f - \frac{3kT}{2q} - \frac{E_g}{2q} \right)$$



$$\begin{split} \frac{\mathrm{d}^2 V_{th}}{\mathrm{d} T^2} &= -\frac{1}{T^{3/2}} \frac{\sqrt{\mathcal{E}_{\mathrm{si}} \mathcal{E}_0 \mathbf{N}_a \mathbf{k} \left(\ln \frac{\mathbf{N}_a}{\mathbf{C}} - \frac{3}{2} \ln T + \frac{E_g}{2 \mathbf{k} T} \right)}}{2C_{\mathrm{ox}}} + \frac{1}{T^{5/2}} \frac{\sqrt{\mathcal{E}_{\mathrm{si}} \mathcal{E}_0 \mathbf{N}_a} \cdot E_g}{2C_{\mathrm{ox}} \sqrt{\mathbf{k} \left(\ln \frac{\mathbf{N}_a}{\mathbf{C}} - \frac{3}{2} \ln T + \frac{E_g}{2 \mathbf{k} T} \right)}}{2C_{\mathrm{ox}} \sqrt{\mathbf{k} \left(\ln \frac{\mathbf{N}_a}{\mathbf{C}} - \frac{3}{2} \ln T + \frac{E_g}{2 \mathbf{k} T} \right)}} \\ &- \frac{1}{T^{3/2}} \frac{\sqrt{\mathcal{E}_{\mathrm{si}} \mathcal{E}_0 \mathbf{k} \mathbf{N}_a} \left(\frac{3}{2} + \frac{E_g}{2 \mathbf{k} T} \right)^2}{2C_{\mathrm{ox}} \left[\left(\ln \frac{\mathbf{N}_a}{\mathbf{C}} - \frac{3}{2} \ln T + \frac{E_g}{2 \mathbf{k} T} \right) \right]^{3/2}} - \frac{1}{T} \frac{3 \mathbf{k}}{\mathbf{q}} \end{split}$$

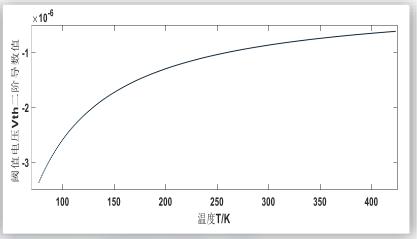


图1阈值电压二阶导数值随温度变化曲线

- •在商用温度范围([223K,423K])内,若对阈值电压在T=300K时用一阶泰勒展开忽略余项时,误差范围为 $\left[\frac{d^2V_{hh}}{dT^2}\Big|_{T=423K}\times (423-300)^2, \frac{d^2V_{hh}}{dT^2}\Big|_{T=223K}\times (423-300)^2\right]$ 在SMIC0.18 μ m工艺下,最大误差约为90 μ ppm.
- ●当将其外推至77K时,最大误差将达到570ppm.
- ●若再将其外推至4K,得到的误差更大,这也是众 多文献中提到的缺少有效的仿真模型的原因之一。

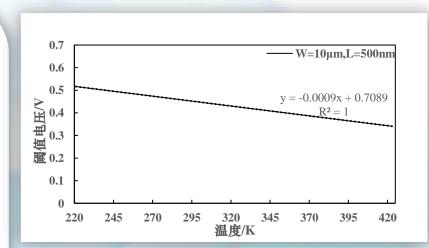


图2 SMIC0.18μm工艺NMOS阈值电压随 温度变化仿真曲线



解决途径

分段线性化

· 分段区间越窄,误差越小,但计算量变大。在计算量和误差之间进行折衷考虑

主项近似积分法

· 通过数值计算,得出主项,加入 影响因子,然后进行积分。

分段线性化

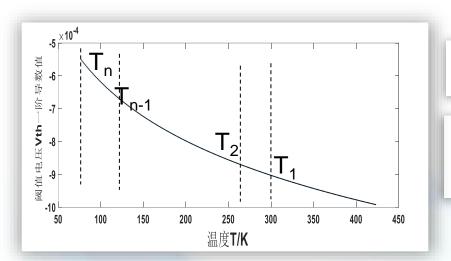


图3 阈值电压随温度T的变化率曲线

在
$$[T_{n-1}, T_n]$$
 温度范围内

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

主项近似积分法

$$\begin{split} \frac{d^{2}V_{h}}{dT^{2}} &= A_{1} + A_{2} + A_{3} + A_{4} \\ A_{1} &= -\frac{1}{T^{3/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si}\varepsilon_{0}N_{a}k \left(\ln\frac{N_{a}}{C} - \frac{3}{2}\ln T + \frac{E_{g}}{2kT}\right)}}{2C_{ox}} \\ A_{2} &= \frac{1}{T^{5/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si}\varepsilon_{0}N_{a}} \cdot E_{g}}{2C_{ox} \sqrt{k \left(\ln\frac{N_{a}}{C} - \frac{3}{2}\ln T + \frac{E_{g}}{2kT}\right)}} \\ A_{3} &= -\frac{1}{T^{3/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si}\varepsilon_{0}kN_{a}} \left(\frac{3}{2} + \frac{E_{g}}{2kT}\right)^{2}}{2C_{ox} \left[\left(\ln\frac{N_{a}}{C} - \frac{3}{2}\ln T + \frac{E_{g}}{2kT}\right)\right]^{3/2}} \\ A_{4} &= -\frac{1}{T} \frac{3k}{q} \end{split}$$

- •经过数值计算可知,在 N_a 取 10^9 ~ 10^{18} /cm 2 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

$$V_{th} = 5.9061 \times 10^{-4} T + \frac{3.03 \text{k}}{\text{q}} T (1 - 1 \text{n}(T)) + 0.6395$$

主项近似积分法

$$\begin{split} \frac{d^{2}V_{th}}{dT^{2}} &= A_{1} + A_{2} + A_{3} + A_{4} \\ A_{1} &= -\frac{1}{T^{3/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si}\varepsilon_{0}N_{a}k \left(\ln\frac{N_{a}}{C} - \frac{3}{2}\ln T + \frac{E_{g}}{2kT}\right)}}{2C_{ox}} \\ A_{2} &= \frac{1}{T^{5/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si}\varepsilon_{0}N_{a} \cdot E_{g}}}{2C_{ox}\sqrt{k \left(\ln\frac{N_{a}}{C} - \frac{3}{2}\ln T + \frac{E_{g}}{2kT}\right)}} \\ A_{3} &= -\frac{1}{T^{3/2}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{si}\varepsilon_{0}kN_{a}} \left(\frac{3}{2} + \frac{E_{g}}{2kT}\right)^{2}}{2C_{ox} \left[\left(\ln\frac{N_{a}}{C} - \frac{3}{2}\ln T + \frac{E_{g}}{2kT}\right)\right]^{3/2}} \\ A_{4} &= -\frac{1}{T} \frac{3k}{a} \end{split}$$

- •经过数值计算可知,在 N_a 取 10^9 ~ 10^{18} /cm 2 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。

$$V_{th} \approx \int_{T_0}^T \left(\int_{T_0}^T - \frac{1}{T} \frac{3k}{q} \left(1 + m \right) dT \right) dT$$

●同样,以SMIC0.18µm工艺为例, m取0.01,得到

$$V_{th} = 5.9061 \times 10^{-4} T + \frac{3.03 \text{k}}{\text{q}} T (1 - 1 \text{n}(T)) + 0.6395$$

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_{th0}

 $\begin{cases} \frac{\partial^{2} U}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} U}{\partial y^{2}} = \frac{\rho}{\varepsilon_{S_{i}}} \\ U|_{y=0} = V_{S}, U|_{y=L} = V_{D} \end{cases}$

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。 $V_{\rm S}$ 表示源极电势, $V_{\rm D}$ 表示漏极电势。

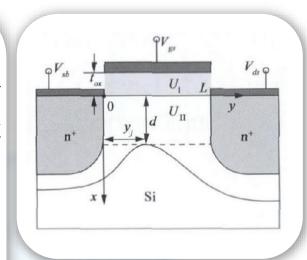


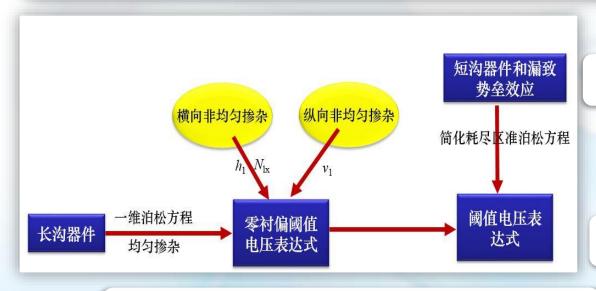
图4晶体管结构坐标示意图

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<mark>无穷级数</mark>,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_1 、 N_{1x} 和 v_1 (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



$$\delta(L) = A \cdot \exp(B \cdot L) + C \cdot \exp(D \cdot L)$$

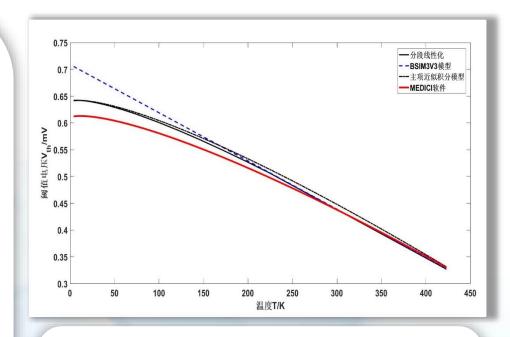
$$V_{th} = V_{thhv} \cdot \delta(L)$$

$$V_{\it thhv} \; = \; V_{\it thideal} \; + \; h_1 \! \left(\! \sqrt{ \left| 2 \varPhi_f \; - \; V_{\it bs} \right|} \; - \; \sqrt{ \left| 2 \varPhi_f \right|} \right) - \; v_1 V_{\it bs} \; + \; h_1 \! \left(\sqrt{ 1 \; + \; \frac{N_{\rm lx}}{L}} \; - \; 1 \right) \! \sqrt{ \left| 2 \varPhi_f \right|} \;$$



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⁻³;氧化层厚度3.74nm,零衬偏,氧化 层电荷面密度1e10cm⁻²;





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。

$$\frac{1}{\mu_{i,b}} = \frac{1}{\mu_{i,L}} + \frac{1}{\mu_{i,DAeh}}$$

 $\propto T^{1.5}$

$$\mu_{i,L} = \mu_{i,\max} \left(\frac{T}{300K} \right)^{-\theta_i}$$

Phumob模型

 $\propto T^{-1.5}$

$$\mu_{i,DAeh} = \mu_{i,N} \left(\frac{N_{i,sc}}{N_{i,sc,eff}} \right) \left(\frac{N_{i,ref}}{N_{i,sc}} \right)^{\alpha_i} + \mu_{i,c} \left(\frac{n+p}{N_{i,sc,eff}} \right)$$

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_{freeze}体现。

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

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

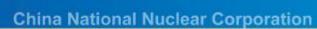
 R_{FO} 指单位宽度冻析效应电阻, R_{FOTI} 和 R_{FOT2} 分别指 R_{fo} 的一阶和二阶温度系数。

Part 3

总结

Summary







3.总结

- ●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。



