

摄动法研究纳米 MOSFETs 亚阈值特性*

代月花[†] 陈军宁 柯导明

(安徽大学电子科学与技术学院, 合肥 230039)

摘要: 采用了一种新的方法研究纳米金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFETs)的亚阈值特性,即正则摄动法.由于在纳米 MOSFETs 中,常用的耗尽近似和页面电荷模型(charge-sheet model)不再适用,导致泊松方程由线性变成非线性形式.利用正则摄动法求解非线性泊松方程可以得到纳米 MOSFETs 亚阈值电流和亚阈值摆幅指数依赖外加偏压的解析表达式.通过与二维器件模拟软件 MEDICI 模拟结果比较,证明了该方法及结果的有效性.

关键词: 正则摄动; 表面势; 亚阈值摆幅; 纳米 MOSFETs

PACC: 0260; 7340T; 7850G

中图分类号: TN386.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)02-0237-04

1 引言

随着 CMOS 工艺技术的发展, MOSFET 的栅长已减小到纳米量级,并且工作电压正向 1.5V 推进.目前, MOSFET 的亚阈值行为倍受关注,特别是在低压模拟和数字电路领域,更多的注意力被投向了纳米 MOSFET 亚阈值特性(亚阈值电流、亚阈值摆幅等)波动的控制上.在模拟电路中,亚阈值电流的震荡对该电路能否实现正常功能是至关重要的.例如,对于差分低噪声放大器,输入晶体管特性 1% 的不匹配就会导致放大器不能工作.在数字电路中,为降低关态功耗和改善逻辑电路静态噪声系数,亚阈值电流应该尽可能减小,且必须能够精确控制.

虽然已经存在很多亚阈值电流和亚阈值摆幅的模型,但用于电路模拟它们通常显得太复杂或太简单.有些模型完全基于数值模拟,没有建立弱反型电流解析表达式,也没有给出亚阈值摆幅同纳米 MOSFET 结构参数、掺杂情况及偏置电压之间的依赖关系^[1].有些模型是经验或半经验型的^[2,3],其中的经验参数没有被赋予物理意义,不利于对器件的理解和设计.还有些模型,虽然通过求解二维或三维泊松方程得到了物理模型,但是它们都是基于两种假设的,即耗尽近似和页面电荷模型(charge-sheet model)^[4,5].数值模拟的结果表明,这两种假设对纳米 MOSFET 器件已不再适用.首先,在弱反型和中等反型情况下,纳米器件的表面势需要由自由载流子的数量和分布来决定,而常规器件却被认为在强反型发生之前,其表面势与自由载流子无关,仅由不

可动的电离杂质决定,即做了耗尽近似假设.另一方面,由于强反型之前,表面处的电场比较弱,自由载流子分布得比较散,反型层就相对展开得比较宽,这样页面电荷模型就不够准确,特别是对纳米 MOSFET 器件而言.

为了正确地给纳米 MOSFET 亚阈值特性建立基于物理的数学模型,我们认为需要考虑电荷共享模型,并且在求解泊松方程时必须考虑弱反型载流子的数量及分布状况.本文第二节将详细介绍纳米 MOSFET 亚阈值表面势求解方法,特别采用了正则摄动法解非线性泊松方程,并给出了表面势的数学表达式,其形式简单且具有物理意义.第三节将简单介绍纳米 MOSFET 亚阈值电流及亚阈值摆幅计算思路和过程.第四节将给出该模型与二维器件模拟软件 MEDICI 的比较结果.最后是结论.

2 亚阈值表面势的改进

从 MOSFET 器件亚阈值电势分布可以看出,长沟器件沿沟道方向电势分布几乎是均匀的,而短沟器件,尤其是纳米 MOSFET,沿沟道方向只有很小比例其电势是均匀分布的,且随沟长和外加偏压变化电势分布轮廓也随之不同,特别需要指出的是最小电势值及其在沟道中的位置强烈依赖外加偏压.通过求解泊松方程的定解问题可以定出电势分布函数:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_{si}\epsilon_0} \left[n_0 \exp\left(\frac{V_{gs} - V_t - \psi(x)}{\eta V_{th}}\right) + N_a \right] \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60576066)

[†] 通信作者. Email: daiyuehua2000@yahoo.com.cn

2006-08-25 收到, 2006-10-10 定稿

$$\begin{cases} \psi(0) = V_{bi} \\ \psi(L) = V_d \end{cases} \quad (2)$$

其中 N_a, q, ϵ_0 和 ϵ_{si} 分别是衬底掺杂浓度、电子基本电荷量、真空介电常数和硅的相对介电常数; V_{gs}, V_t, V_{bi} 和 $V_{th} (= k_B T/q)$ 分别是栅源电压、阈值电压、源/漏与衬底间 pn 结内建电势差和热电势; n_0 和 η 是两个拟合参数.

如果令 $y = \psi(x), \epsilon = \exp(-By), A = [qn_0/(\epsilon_{si}\epsilon_0)]\exp[(V_{gs} - V_t)/(\eta V_{th})], B = 1/(\eta V_{th}), C = qN_a/(\epsilon_{si}\epsilon_0)$, 那么方程(1)可以化简为下列形式:

$$y'' = A\epsilon + C \quad (3)$$

$$\begin{cases} y(0) = V_{bi} \\ y(L) = V_d \end{cases} \quad (4)$$

模拟结果表明 ϵ 是一个小量 ($0 < \epsilon \ll 1$), 根据文献[6~8], y 可以展开为摄动级数形式. 为简单起见, y 表示成其零阶和一阶级数的线性组合

$$y \approx y_0 + \epsilon y_1 \quad (5)$$

将(5)式代入方程(4)中, 并假设小量 ϵ 为零, 这样可以得到关于 y_0 和 y_1 的两个定解问题, 即

$$\begin{cases} y_0'' = C \\ y_0(0) = V_{bi} \\ y_0(L) = V_d \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} y_1'' = A \\ y_1(0) = 0 \\ y_1(L) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

通过解这两个常微分方程的定解问题很容易得到 y_0 和 y_1 的表达式

$$y_0 = 0.5Cx^2 + Dx + V_{bi} \quad (8)$$

$$y_1 = 0.5Ax^2 - 0.5ALx \quad (9)$$

其中 $D = (V_d - V_{bi} - 0.5CL^2)/L$.

由于小量 ϵ 实际上并不恒等于零, 根据其物理意义, 现将 ϵ 在 $y = 2V_b$ (两倍的费米势) 处展开为一阶 Taylor 级数:

$$\epsilon = \exp(-2BV_b) - B(y - 2V_b)\exp(-2BV_b) \quad (10)$$

最后将(8)~(10)式代回方程(5)中, 亚阈值电势沿沟道的分布就可以确定为

$$\psi(x) = \frac{0.5Cx^2 + Dx + V_{bi} + 0.5A(x^2 - Lx)e^{-2BV_b}(1 + 2V_bB)}{1 + 0.5A(x^2 - Lx)Be^{-2BV_b}} \quad (11)$$

从(11)式可进一步得到最小电势 $\psi(x)_{\min}$ 在沟道中所处的位置 x_0 , 这样 $\psi(x)_{\min}$ 与 V_{gs} 的函数关系也可随之确定. 为简单起见, 通过拟合, 最小电势 ψ_{\min} 与 V_{gs} 之间有着自然对数关系

$$\psi_{\min} = 0.3872\ln(3.88V_{gs} + 0.626) \quad (12)$$

3 亚阈值电流与亚阈值摆幅的计算

MOSFET 器件亚阈值特性通常都由亚阈值电

流 I_D 与亚阈值摆幅 S 来体现. 亚阈值电流是一个非常重要的参数, 由于它由电源供给电压和数字电路中实现关态的逻辑电平所决定, 因此它会影响到逻辑电路中的功耗. 另外, 动态存储电路的保持时间也受亚阈值电流大小影响. 亚阈值摆幅是又一个重要参数, 特别是在高增益的模拟放大器、图像处理电路及低压方面的应用. 由于电流 I_D 随电压 V_{gs} 波动发生震荡, 这会导致非线性增益和信号失真, 所以对亚阈值区电压波动特性及亚阈值电流 I_D 与外加电压间的定量关系应该给以特别关注. 本节重点介绍亚阈值电流 I_D 与亚阈值摆幅 S 的变化规律.

当栅压低于阈值电压时, 半导体表面处于弱反型状态, 此时在漏源间加上一定的偏压就会形成一定的亚阈值电流. 根据文献[9, 10], 亚阈值电流 I_D 的表达式为

$$I_D = \mu(Z/L) \frac{\alpha C_{ox}}{2\beta} \times \frac{n_i}{N_a} (1 - e^{-\beta V_d}) e^{\beta \psi_{\min}} (\beta \psi_{\min} - 1)^{-0.5} \quad (13)$$

其中 μ 是载流子有效迁移率; Z 和 L 分别是沟道宽度和长度; C_{ox} 是栅氧化层电容; n_i 和 N_a 分别为本征载流子浓度和衬底掺杂浓度; 参数 α 和 β 的表达式分别为 $\alpha = \sqrt{2}(C_{FB}/C_{ox})$, C_{FB} 为平带电容, $\beta = q/(k_B T)$. 从方程(13)可以看出, 亚阈值电流 I_D 随表面最小电势 ψ_{\min} 指数变化, 并且当漏压 V_d 大于 $3k_B T/q$ 时, 亚阈值电流 I_D 几乎不随漏压 V_d 变化.

由于亚阈值电流与表面势之间有指数依赖关系, 而表面势又受外加电压强烈影响, 所以亚阈值特性对外加电压特别敏感, 亚阈值电流 I_D 与亚阈值摆幅 S 都是 V_{gs} 的函数.

$$S = \frac{dV_{gs}}{d\log I_D} = \ln(10) \frac{dV_{gs}}{d\ln I_D} \quad (14)$$

对于纳米 MOSFET 而言, 其阈值电压一般比较小, 大约在 0.8V, 所以所关心的亚阈值区域栅压范围为 0.2~0.7V. 在该范围内, 根据(14)式亚阈值摆幅 S 存在一个最小值.

4 结果与讨论

为了验证前面的分析, 我们选择了具体器件进行模拟, 并与分析结果进行比较. 纳米 NMOSFET 基本结构如图 1 所示, 沟长 80nm, 沟宽 1 μ m, 栅材料为 p 型多晶硅, 栅二氧化硅层厚度 $T_{ox} = 2$ nm, 漏压 $V_d = 1.5$ V.

图 2 和图 3 分别是不同栅压下亚阈值表面电势沿沟道方向的分布, 和最小表面电势大小随栅压的变化及其与强反型状态下沟道最小表面势 $2V_b$ 之间的关系. 从图 3 可看出, 随栅压增大, 亚阈值最小

表面电势在变大,当栅压增大到阈值电压 V_t 时,亚阈值最小表面电势就会等于 $2V_b$.

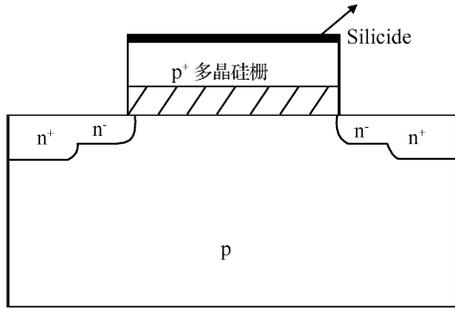


图 1 NMOSFET 结构示意图
Fig.1 NMOSFET basic structure

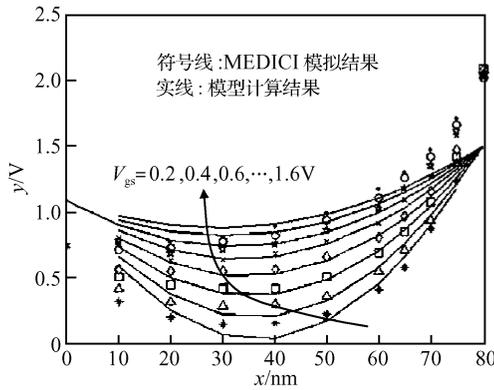


图 2 不同栅压下表面电势沿沟道的分布

Fig.2 Surface potential as a function of position in the channel

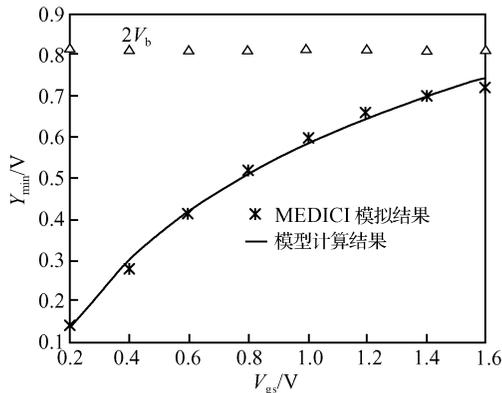


图 3 亚阈值状态下最小表面电势随栅压的变化

Fig.3 Minimum surface potential as a function of V_{gs}

图 4 是对文中表达式(10)的验证,虽然表达式(10)是直接引用文献,但其中的最小电势这个物理

量,我们对它进行建模,赋予其新的形式和意义.从图 4 的计算结果与模拟结果的吻合情况看,我们对表达式(10)中的“最小电势”这个物理量的建模是有效的.

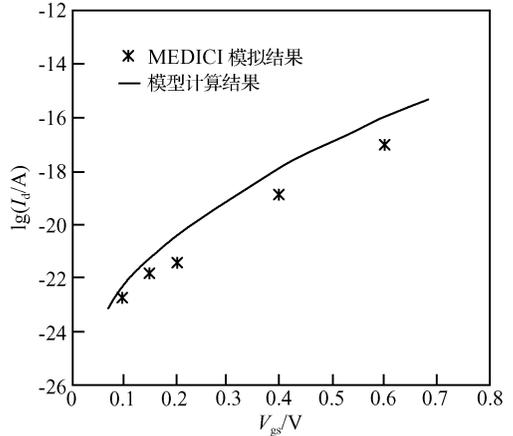


图 4 亚阈值电流与栅压特性

Fig.4 $I_d - V_{gs}$ characteristics

图 5 给出了亚阈值摆幅随栅压变化关系,从图中可知,栅压很小的变化都会导致亚阈值摆幅 S 值很大的不同.也就是说,在器件工作过程中,可能会出现很多不同值的亚阈值摆幅.而对集成电路建模和仿真,通常需要一个确定的亚阈值摆幅 S 值.正如 MEDICI 软件提取亚阈值摆幅 S 值的方法,图 5 中最小 S 值即是电路所需要的亚阈值摆幅,且最小 S 值所对应的栅压为最理想的弱反型电压.

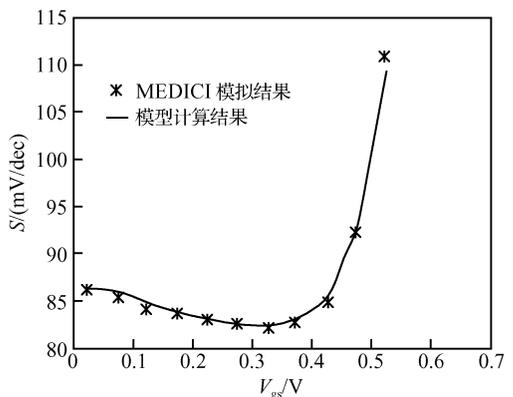


图 5 亚阈值摆幅随栅压变化关系

Fig.5 Subthreshold swing as a function of V_{gs}

5 结论

本文介绍了一种研究纳米 MOSFET 亚阈值特性的新方法,即采用正则摄动法求解非线性泊松方程,从而得出亚阈值电流和亚阈值摆幅随外加电压

及器件结构各参数之间的解析表达式. 其优点是物理概念清晰, 数学形式简单. 通过与 MEDICI 模拟结果比较, 验证了该解析模型的适用性, 该模型可以正确预测纳米 MOSFET 的亚阈值特性.

参考文献

- [1] Choi W Y, Song J Y, Lee J D. A novel biasing scheme for I-MOS (impact-ionization MOS) devices. *IEEE Trans Anotechnol*, 2005, 4(3):322
- [2] Vandamme E P, Jansen P, Deferm L. Modeling the subthreshold swing in MOSFET's. *IEEE Electron Device Lett*, 1997, 18(8):369
- [3] Andrei P, Mayergoz I. Random doping-induced fluctuations of subthreshold characteristics in MOSFET devices. *Solid-State Electron*, 2003, 47:2055
- [4] Agrawal B, De V K, Meindl J D. Three-dimensional analytical subthreshold models for bulk MOSFETs. *IEEE Trans Electron Devices*, 1995, 42(12):2170
- [5] Chen Q, Agrawal B, Meindl J D. A comprehensive analytical subthreshold swing (S) model for double-gate MOSFETs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2002, 49(6):1086
- [6] He Jihuan. Linearized perturbation technique and its applications to strongly nonlinear oscillators. *Computers and Mathematics with Applications*, 2003, 45(1):1
- [7] Wang M H, Kuo Y E. A perturbation method for solving linear semi-infinite programming problems. *Computers and Mathematics with Applications*, 1999, 37:181
- [8] Zheng Xiaojing. On the convergence of the Chien's perturbation method for von Karman plate equations. *Int J Eng Sci*, 1995, 33(8):1085
- [9] Brews J R. *Physics of the MOS transistor*. In: *Applied solid state science*. New York: Academic Press, 1981
- [10] Sze S M. *Physics of semiconductor device*. New York: Wiley, 1981

Regular Perturbation Method for Studying the Subthreshold Characteristics of Nano-Scaled MOSFETs*

Dai Yuehua[†], Chen Junning, and Ke Daoming

(*School of Electronic Science and Technology, Anhui University, Hefei 230039, China*)

Abstract: We present a new method for studying the subthreshold characteristics of nano-scaled MOSFETs, which we call the "regular perturbation method". The Poisson equation is solved using this method for the first time. In particular, the depletion approximation and charge-sheet model in the Poisson equation are avoided due to their invalidity in nano-scaled MOSFETs. This yields a conventional exponential form of the subthreshold current, and the subthreshold swing can be obtained analytically from this current equation. The results of the model are compared and verified with the numerical simulation.

Key words: regular perturbation; surface potential; subthreshold swing; nano-scaled MOSFETs

PACC: 0260; 7340T; 7850G

Article ID: 0253-4177(2007)02-0237-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60576066)

[†] Corresponding author. Email: daiyuehua2000@yahoo.com.cn

Received 25 August 2006, revised manuscript received 10 October 2006