

基于有效态密度的 MOS 结构电荷控制模型^{*}

马玉涛 刘理天 李志坚

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 从载流子在 MOS 结构反型层内的分布出发, 利用表面有效态密度(SLEDOS: Surface Layer Effective Density-of-States)的概念, 在经典理论框架内建立了包含载流子分布对表面势影响的电荷控制模型。该模型包含了强反型区表面电势的变化对载流子浓度的影响, 采用了一种新的高效的迭代方法, 具有较高的计算效率和足够的精度要求。

关键词: 金属-氧化层-半导体结构; 电荷控制模型; 有效态密度; 反型层电荷

EEACC: 2560B; 2560R

中图分类号: TN 386. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)04-0373-05

MOS Structure Charge Control Model Based on Surface Layer Effective Density-of-States^{*}

MA Yu-tao, LIU Li-tian and LI Zhi-jian

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Received 27 January 1999, revised manuscript received 25 May 1999

Abstract: Based on the analysis of the distribution of inversion layer carrier in the space charge region of MOS structure, the concept of Surface Layer Effective Density-of-States (SLEDOS) is proposed. Then a new charge control model is established in which the effects of inversion layer carrier distribution on surface potential are included. In this model, the effect of surface potential change after strong inversion on carrier sheet density is included and a new efficient iterative method is adopted. The model is with high efficiency and accuracy.

Key words: MOS structure; charge control model; effective density-of-states; inversion layer charge

EEACC: 2560B; 2560R

Article ID: 0253-4177(2000)04-0373-05

* “九五”攻关课题: 微米/纳米新器件、新电路结构研究”第 97-760-03-01 号 (Project Supported by Chinese National Ninth 5-year Plan Under Grant No. 97-760-03-01).

马玉涛 男, 1974 年出生, 博士生, 从事半导体器件物理特性、器件模型等研究。

刘理天 男, 1947 年出生, 教授, 从事半导体器件、集成传感器、微电子机械研究。

李志坚 男, 1928 年出生, 教授、中国科学院院士, 从事半导体器件、微电子机械、系统集成等研究。

1999-01-27 收到, 1999-05-25 定稿

1 引言

随着 VLSI 向着更大规模发展, 电路模拟在电路设计中发挥着越来越大的作用。建立精确而高效的 MOSFET 模型在电路模拟中至关重要。MOS 结构电荷控制模型(反型层载流子浓度与栅电压的关系)是研究 MOSFET 栅电容和伏安特性的基础。通常, 反型层电荷表示成栅电容与栅电压的线性函数($Q_{inv} = C_{ox}(V_{gs} - V_T)$), 但是数值模拟表明^[1,2]: 假定反型层电荷与栅电压呈线性关系有很大误差, 这种简化处理没有考虑载流子在反型层内部的分布对表面势的影响。而且这种影响由于所谓的量子化效应而加大了, 因为量子化效应使反型层载流子分布偏离表面, 在相同的载流子浓度下将会导致更大的电势降落^[3]。

一个重要的因素是模型能否反映物理实质。从物理实质出发建立的模型比经验模型具有更强的适应性, 同时能够揭示器件工作的物理图象并具有很强的预测功能。本文从 MOS 结构反型层内的载流子分布出发, 利用表面有效态密度(SLEDOS)^[4]的概念, 在经典理论框架内建立了包含载流子分布对表面势影响的电荷控制模型。表面有效态密度概念也反映了量子化效应的影响。该模型具有较高的计算效率和足够的精度。

2 模型描述

在半经典理论下, 反型层内载流子浓度为:

$$n(z) = N_c \exp\left[\frac{E_f + q\phi_s}{k_B T}\right] \exp\left[-\frac{q(\phi_s - \phi(z))}{k_B T}\right] \quad (1)$$

其中 N_c 为导带底有效态密度; E_f 为费米能级; ϕ 和 $\phi(z)$ 为表面势和距离表面 z 处的电势。

由(1)式可得载流子面密度为:

$$N_s = \int_0^L n(z) dz = \exp\left[\frac{E_f + q\phi_s}{k_B T}\right] \int_0^L N_c \exp\left[-\frac{q(\phi_s - \phi(z))}{k_B T}\right] dz \quad (2)$$

定义表面有效态密度 N_{sdos} :

$$N_{sdos} = \int_0^L N_c \exp\left[-\frac{q(\phi_s - \phi(z))}{k_B T}\right] dz = \int_0^\phi \frac{N_c \exp\left[-\frac{q(\phi_s - \phi)}{k_B T}\right]}{E(\phi)} d\phi \quad (3)$$

则:

$$N_s = N_{sdos} \exp\left[\frac{E_f + q\phi_s}{k_B T}\right] \quad (4)$$

(3)式中空间电荷区横向电场的解析表达式为^[5]:

$$E(z) = \frac{F}{\epsilon_s} \sqrt{\frac{N_A}{\epsilon_s}} \sqrt{\phi e^{-\phi(y)/\phi_i} + \phi(y) - \phi_i + e^{-2\phi_i/\phi_i} (\phi e^{\phi(y)/\phi_i} - \phi(y) - \phi_i)} \quad (5)$$

其中 $F = \sqrt{2qe}; \phi = kT/q; \phi(z)$ 为 z 点的电势。

在计算中我们发现, 如果将 N_{sdos} 表示成反型层载流子浓度的函数, 表面有效态密度将表现出很简明的特性。在低浓度区域 N_{sdos} 基本上为常数, 与载流子浓度无关; 而在高浓度区域, N_{sdos} 惟一由载流子面密度决定, 与衬底的掺杂浓度无关。 N_{sdos} 与 N_s 的关系由图 1 给出。图中不同曲线对应不同的衬底掺杂浓度。可以看出, 表面载流子面密度大于 10^{13} cm^{-2} 后 N_{sdos} 趋向于与衬底掺杂浓度无关, 而且 N_{sdos} 与 N_s 在对数坐标下成线性关系。利用 N_{sdos} 的特性, 可以用简单的解析函数来近似 N_{sdos} 。在低浓度区域, N_{sdos} 表示为衬底掺杂浓度的线性函数 $N_{sdos}(N_{sub})$, 而在高浓度区域表示为载流子浓度的线性函数 $N_{sdos}(N_s)$, 然后利用文献[6] 中给出的方法, 将两个区域的函数进行光滑连接, 得到:

$$\begin{aligned} N_{sdos} &= f - \sqrt{f^2 - N_{sdos}(N_{sub}) N_{sdos}(N_s)} \\ f &= 0.5(N_{sdos}(N_{sub}) + (1 + \delta) N_{sdos}(N_s)) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 δ 是一个很小的系数, 用来调整两个函数之间进行连接的光滑程度.

这样, 我们便得到了一个用表面有效态密度表示的反型层载流子浓度和表面电势之间的解析关系(4). 其中表面有效态密度 N_{sdos} 可以表示为表面势的函数(3)或者反型层载流子浓度的函数(6). 该解析表达式是本文提出的电荷控制模型的基础.

考虑表面电势影响的反型层载流子浓度和栅电压的关系表示为:

$$N_s = C_{\text{ox}}(V_{\text{gate}} - \Phi)/q - N_d \quad (7)$$

其中 N_d 为耗尽层电荷, 由下式给出:

$$N_d = \sqrt{2q\epsilon_0\epsilon_r N_A(\Phi - \Phi_0)} \quad (8)$$

式中 $\Phi_0 = k_B T/q$ 为热电势; $\Phi_0 = 2\Phi$ 为强反型时的表面势; Φ 为体费米势.

表 1 模型迭代方法

Table 1 The Iteration Method in the Model

设定初值: $N_s = C_{\text{ox}}(V_{\text{gate}} - V_T)/q$	
利用(6)式得到 N_{sdos}	
$\Phi_0 = k_B T(-E_F + \ln(N_s/N_{\text{sdos}}))/q$	
$N_s = C_{\text{ox}}(V_{\text{gate}} - \Phi_0)/q - N_d$	
迭代直到满足精度要求为止.	

放大误差的过程. 正是由于表面等效态密度的提出, 并且能够表示成反型层载流子浓度的函数, 这种迭代才得以实现. 实际的计算表明, 这种迭代方案能够明显提高迭代效率并保持了很好的稳定性. 迭代过程由表 1 给出.

在弱反型区, 可以利用耗尽近似由栅电压直接得到表面势, 进而利用(3)式和(4)式得到 N_{sdos} 和反型层载流子浓度.

3 模型结果及讨论

图 1 中给出了表面有效态密度和反型层载流子面密度的关系. 表面有效态密度的概念实际上反映了载流子在空间电荷区分布的特性. 表面有效态密度唯一由反型层载流子浓度决定体现了经典理论框架下强反型区载流子的空间分布特性, 从而反型层电容的特性主要由载流子面密度决定. 这也正是表面有效态密度概念之所以在 MOS 结构建模中有重要意义的原因.

本文提出的模型可以快捷地计算出不同偏压下反型层载流子浓度和表面电势的值. 模型计算结果和数值计算结果(数值计算方法见附录)进行了比较, 结果由图 2 和图 3 给出. 计算结果表明: 在很宽的衬底

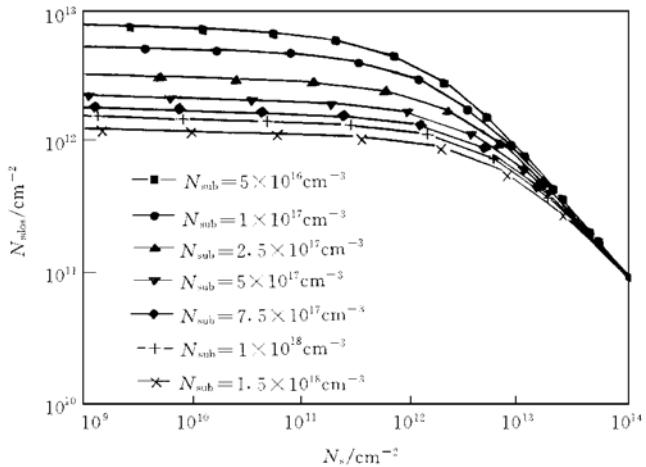


图 1 表面有效态密度与反型层载流子浓度的关系

FIG. 1 Surface Layer Effective Density-of-States as a Function of Inversion Layer Carrier Sheet Density

精确求解反型层载流子浓度和表面势需要对(4)式和(7)式迭代求解. 迭代求解的过程中, 收敛速度和稳定性是非常重要的两个因素. 经过对比试验, 我们发现如下的方案可以得到很高的迭代效率同时保持较好的稳定性. 迭代过程描述如下: 首先给定 N_s 的初值, 利用(6)式得到 N_{sdos} , 然后利用(4)式得到 Φ , 再用(7)式得到 N_s , 然后进行下一轮迭代. 该方案的特点在于利用(4)式从 N_s 得到 Φ . 因为 N_s 是 Φ 的指数函数, 所以由 N_s 得到 Φ 的过程是一个减小误差的过程, 而其反过程是一个

掺杂和偏压范围内, 模型结果和数值计算结果吻合得非常好.

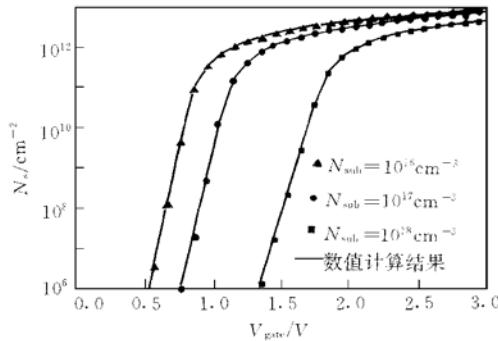


图 2 反型层载流子浓度和栅电压的关系

图中符号为模型结果, 实线为数值计算结果.

FIG. 2 Inversion Layer Carrier Sheet Density as a Function of Gate Voltage

Symbols in the figure are model results, and the solid line is numerical results.

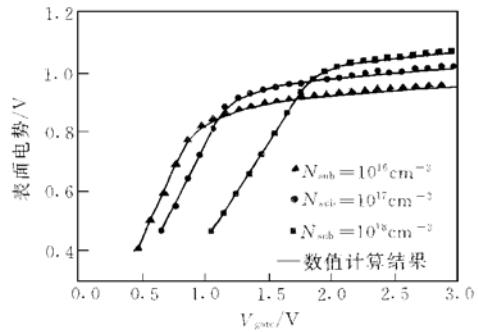


图 3 反型层表面电势与栅电压的关系

图中符号为模型结果, 实线为数值计算结果.

FIG. 3 Inversion Layer Surface Potential as a Function of Gate Voltage

Symbols in the figure are model results, and the solid line is numerical results.

在模型实际应用时, 每次迭代对于表面电势的修正可以引入一个松弛系数 ω , 即:

$$\phi_s^{new} = \phi_s^{ld} + \omega(\phi_s^{new} - \phi_s^{ld}) \quad (9)$$

其中 ω 为松弛因子, 可以根据表面反型的程度选定. 适当选取 ω 的值可以进一步改善中等反型程度时的收敛性和强反型时的收敛速度.

4 结论

本文在分析 MOS 结构反型层载流子分布特点的基础上, 提出了表面有效态密度的概念, 以此来表征载流子空间分布的特点, 建立了反型层载流子浓度和表面势之间的简洁的关系, 提出了一种新的计算反型层载流子浓度的迭代方法. 这种迭代方法具有较高的迭代效率和很好的收敛性.

参 考 文 献

- [1] C. G. Sodini, T. W. Ekstedt, J. L. Moll, Solid-State Electronics, 1982, **25**(9): 833—841.
- [2] J. R. Hauser, IEEE Trans. Electron Devices, 1996, **43**(11): 1981.
- [3] Tomasz Janik, Bogdan Majkusiak., IEEE Trans. Electron Devices, 1998, **45**(6): 1263.
- [4] 马玉涛, 李志坚, 刘理天, 半导体学报, 1999, **20**(3): 219 [MA Yutao, LI Zhijian and LIU Litian, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(3): 219(in Chinese)].
- [5] Y. P. Tsividis, Operation and modeling of the MOS transistor, McGraw-Hill, Inc. 1987, 347—350.
- [6] A. Chatterjee, C. F. Machala, P. Yang. IEEE Trans. Computer-Aided Design, 1999, **14**: 1193—1207.

附录 A: MOS 结构反型层面密度与栅电压关系数值计算方法

为了验证本文中提出的简化的迭代方法的精确性, 文中采用如下的方法得到了反型层载流子面密度和栅电压的精确关系。

从反型层表面电势出发, 采用文献[4]中给出的模型, 积分得到反型层载流子面密度:

$$N_s = \int_0^\phi \frac{N_c \exp(-q\phi/k_B T)}{E(\phi)} d\phi \quad (\text{A } 1)$$

其中 $E(\phi)$ 为反型层内电势为 ϕ 处的电场:

$$E(\phi) = \frac{F}{\epsilon_s} \sqrt{N_A} \sqrt{\phi e^{-\phi/\phi_i} + \phi - \phi_i + e^{-2\phi_i/\phi} (\phi e^{\phi/\phi_i} - \phi - \phi_i)} \quad (\text{A } 2)$$

然后再利用(7)式得到栅电压, 这样便可以得到反型层载流子浓度和栅电压的精确的数值关系了。