

MOS 器件多晶硅栅量子效应的解析模型^{*}

代月花 陈军宁 柯导名 孙家訖 徐 超

(安徽大学电子科学与技术学院, 合肥 230039)

摘要: 根据载流子分布曲线近似,通过求解泊松方程,对多晶硅中的量子效应进行建模,得出了一个基于物理的解析模型,该模型仅仅通过两个拟合参数可以将多个分散的状态模型简化为一个统一的模型.利用该模型对阈值电压进行了计算,其结果与数值模拟结果相吻合,证明了该模型的正确性和准确性.

关键词: 多晶硅;量子效应;拟合参数;屏蔽长度;电势分布函数;场强分布函数

PACC: 7340Q; 7320A; 7300

中图分类号: TN386.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)11-2164-05

1 引言

随着器件尺寸的不断缩小,为减小短沟效应,一般采取增加沟道掺杂浓度和减薄氧化层厚度等措施.对于这种结构的器件,其反型层和积累层中的量子效应对阈值电压、栅电容以及漏电流的影响,长期以来都被广泛关注.近期,在多晶硅量子效应的研究中,数值模拟^[1,2]的结果表明,当栅电容进一步减小时,阈值电压发生了新的漂移.本文对多晶硅中的量子效应进行建模,得出了一个基于物理的解析模型.该模型针对积累、平带、反型三种情况,无需对这三种情况分别进行建模,只需改变两个参数均可适用.我们利用该模型对阈值电压进行了计算,其结果与通过求解泊松和薛定谔方程的自恰问题得到的数值模拟结果^[3,4]基本一致.

2 模型介绍

我们研究的器件结构为 n 沟 MOSFET,其 n⁺ 型的多晶硅是均匀掺杂的,且近似认为多晶硅中的杂质是完全电离的.通常情况下,改变外加电压,高掺杂的多晶硅从积累到耗尽转变,多晶硅中的能带

弯曲不大,不会形成深的量子阱,因此一直以来多晶硅中载流子的分布多用经典的方法进行描述.其实不然,研究表明^[1],由于在多晶硅/二氧化硅界面处存在一个陡峭势垒,能带发生突变,电子的波函数在界面处被陡峭势垒反射,且反射回的波函数之间相互干涉,从而形成特定的载流子分布.电荷被推离界面,形成大概几个纳米的称为“dark space”的耗尽层,与经典的电荷分布不同,当经典的耗尽宽度小于或与“dark space”的宽度相近的时候,量子效应不容忽视.

文献[2]给出了多晶硅中不同状态下电子分布的数值解,如图 1 所示.图中还给出了不同栅压下考虑多晶硅量子效应时多晶硅中载流子的分布和经典下载流子的分布.可以看出,当所加的电压为负和所加栅压为阈值电压时,量子效应下的载流子分布与经典的情况有很大的差别;而加的正电压很大时,量子情况与经典情况已没有很明显的差别.这是由于外加负压时,原有势垒变得更高,电子波函数在更深的量子阱中被反射且相互干涉,能带的突变对电子波函数的影响显著;而外加正电压的时候,对电子波函数影响很小.

根据数值模拟结果,电子浓度在上升阶段服从高斯分布^[5],设多晶硅/二氧化硅界面处为 $x = 0$,向

^{*}国家自然科学基金(批准号:60276042),安徽省自然科学基金(批准号:01044104)及安徽省教育厅(批准号:2003kj0012d)资助项目

代月花 女,1975 年出生,博士研究生,目前研究方向为深亚微米 MOS 器件的建模和模拟.

陈军宁 男,1953 年出生,教授,博士生导师,研究领域包括超大规模集成电路设计和半导体器件的研究.

柯导名 男,1954 年出生,教授,博士生导师,研究领域包括超大规模集成电路设计和半导体器件的研究.

2005-01-14 收到,2005-03-16 定稿

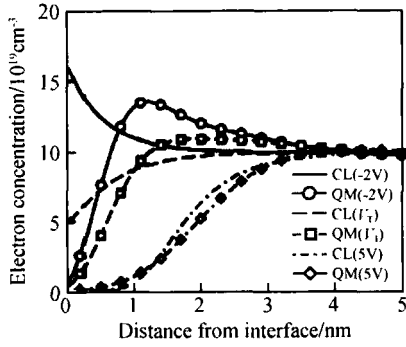


图 1 量子效应在下载流子的分布和经典情况下多晶硅中载流子的分布对比 CL:经典描述下载流子分布;QM:考虑量子效应在下载流子的分布.体硅掺杂 10^{18}cm^{-3} ,多晶硅掺杂 10^{20}cm^{-3} .

Fig.1 Electron concentration in the polysilicon for a quantum model and a classical model CL: classical model;QM: quantum model. The polysilicon doping is 10^{20}cm^{-3} , and the substrate doping is 10^{18}cm^{-3} .

上为正,即:

$$n_1(x) = (N_p + n) (1 - e^{-x^2/2}), \quad 0 \leq x \leq p \quad (1)$$

而在下降阶段,通过曲线拟合,可得其分布满足下列函数:

$$n_2(x) = N_p + ne^{-x^2/2s}, \quad x \geq p \quad (2)$$

其中 N_p 为多晶硅的掺杂浓度; n 为分布峰值处电子浓度高出 N_p 的浓度值; p 为电子浓度峰值处所对应的横坐标^[2,6]; s 为电子屏蔽长度^[7]; α 和 β 是拟合参数,在三种不同状态下它们会有不同的取值.

$$p = \frac{\hbar}{2\sqrt{2m^*(E_F - E_C)}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{s} = \frac{q^2 N_p}{k_0 T_0 \epsilon_{Si}} \quad (4)$$

已知电荷的分布后,就可以利用泊松方程和一定的边界条件求出该区域的场强和电势分布函数.(5)和(7)式是我们列出的泊松方程和边界条件,而(6)和(8)式分别是它们的解,即我们得到了场强和电势分布函数.

$$\begin{cases} \frac{d^2 V_2(x)}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_{Si}} [N_p - n_2(x)], & x \geq p \\ E_2(x) / x=+ = 0 \\ V_2(x) / x=+ = V_G \end{cases} \quad (5)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} -E_2(x) = -\frac{q}{\epsilon_{Si}} n_s e^{-\frac{x-p}{s}} \\ V_2(x) = \frac{q}{\epsilon_{Si}} n_s^2 e^{-\frac{x-p}{s}} + V_G \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{d^2 V_1(x)}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_{Si}} [N_p - n_1(x)], & 0 \leq x \leq p \\ E_1(x) / x=p = E_2(x) / x=p \\ V_1(x) / x=p = V_2(x) / x=p \end{cases} \quad (7)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} -E_1(x) = \frac{q}{\epsilon_{Si}} \left[nx - (N_p + n) \int_0^x e^{-y^2/2} dy + (N_p + n) \int_0^p e^{-y^2/2} dy - n(s + p) \right] \\ V_1(x) = \frac{q}{\epsilon_{Si}} \left[\frac{1}{2} nx^2 - (N_p + n) \int_0^x \int_0^y e^{-y^2/2} dy dy + (N_p + n) \int_0^p \int_0^y e^{-y^2/2} dy dy - nx(s + p) \right] + C \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$C = V_1(0) = \frac{q}{\epsilon_{Si}} \left[n^2 \frac{2}{s} + \frac{1}{2} n^2 p + n_s p + (N_p + n) \int_0^p \int_0^y e^{-y^2/2} dy dy - (N_p + n) \int_0^p e^{-y^2/2} dy \right] + V_G \quad (9)$$

再利用电中性条件,即二氧化硅上界面处的总电荷等于下界面处的总电荷 Q_s ^[3],

$$q \int_0^p [N_p - n_1(x)] dx + q \int_p^+ [N_p - n_2(x)] dx = Q_s \quad (10)$$

根据上式可求得

$$n = \frac{Q_s - N_p \int_0^p e^{-y^2/2} dy}{s - p + \int_0^p e^{-y^2/2} dy} \quad (11)$$

3 模型计算

3.1 s 及 p 的验证

由于模型计算都涉及到 p 和 s ,所以首先对它们的计算公式进行验证.根据(3)和(4)式,我们得到了 p 和 s ,无论是随多晶硅掺杂浓度的变化规律还是它们的数量级都非常符合模拟的结果^[1,2],如图 2 所示.

在本模型中存在两个拟合参数 α 和 β ,当器件

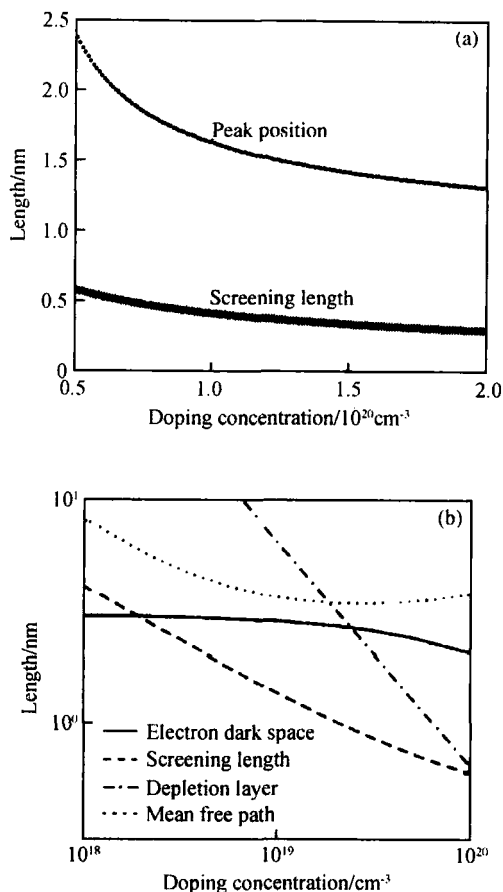


图 2 p 和 s 随多晶硅掺杂浓度的变化规律 (a) 新模型计算结果; (b) 数值模拟结果^[1,2]

Fig. 2 p and s versus polysilicon doping concentration (a) Results of new model; (b) Numerical simulation results

工作在不同状态下其取值是不同的(见表 1). 三种情况下的六条拟合曲线如图 3 所示, 其中积累状态下的 n 和 s 分别由曲线 1 和 2 拟合得到; 阈值状态下的 n 和 s 分别由曲线 3 和 4 拟合得到; 强反型状态下的 n 和 s 分别由曲线 5 和 6 拟合得到.

表 1 拟合参数 n 和 s 在不同工作状态下的取值

Table 1 Value of n and s in different conditions

三种工作状态	n	s
积累 ($V_G = -2V$)	0.4194	2.7714
阈值 ($V_G = V_T$)	0.4763	3.6929
强反型 ($V_G = 5V$)	0.5914	159.62

在确定了 n 和 s 的前提下, 同时又已知了 p 和 s 随多晶硅掺杂浓度的变化规律后, 根据 (11) 式就可以求出不同状态以及不同掺杂浓度下的 n . 图 4 给出了开启或阈值状态下, n 对应多晶硅各种掺杂

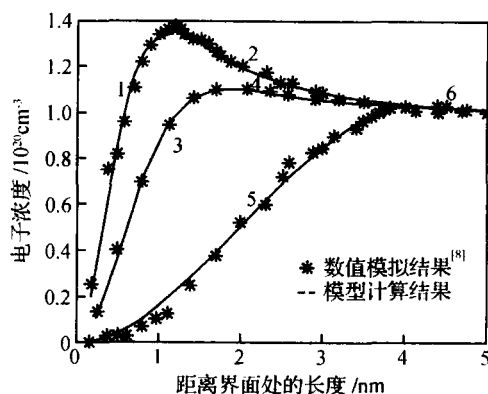


图 3 三种工作状态下的六条拟合曲线 曲线 1, 2 为积累状态; 曲线 3, 4 为阈值状态; 曲线 5, 6 为强反型状态

Fig. 3 Electron distributions in different conditions curves 1, 2: accumulation; curves 3, 4: threshold; curves 5, 6: strong inversion

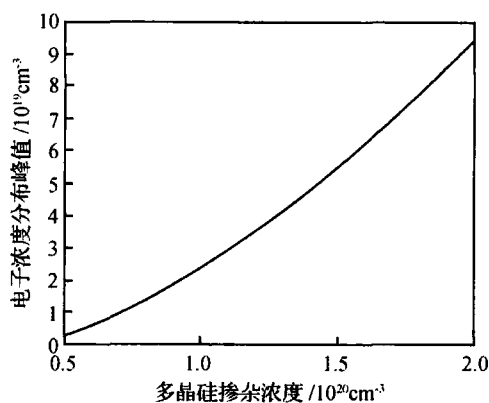


图 4 阈值状态下 n 对应多晶硅各种掺杂浓度的取值

Fig. 4 n in condition of threshold versus polysilicon doping concentration

浓度的取值, 在计算过程中 Q_s 是将衬底掺杂定为 10^{18} cm^{-3} 并不考虑反型层量子效应情况下的取值^[18].

3.2 电场和电势的计算和验证

为了定量地了解多晶硅中的量子效应对阈值电压的影响, 我们选取了一种特定情况进行计算, 即多晶硅掺杂浓度为 $N_p = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. 图 5 是根据 (6) 式中 $E_1(x)$ 和 (8) 式中 $E_2(x)$ 得出的. 根据 $V_1(x)$ 和 $V_2(x)$ 的表达式, 我们还给出了二氧化硅/多晶硅界面处完整的电势分布情况, 如图 6 所示. 其中的曲线 1 对应 $V_1(x) - V_{T0}$, 曲线 2 对应 $V_2(x) - V_{T0}$, V_{T0} 为不考虑量子效应的阈值电压.

分析图 6 可以看到 $V_1(0) - V_{T0} = 156 \text{ mV}$, 也就

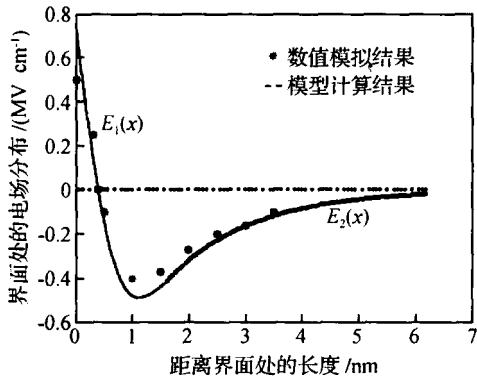


图 5 界面处电场的分布函数

Fig. 5 Electric field distribution

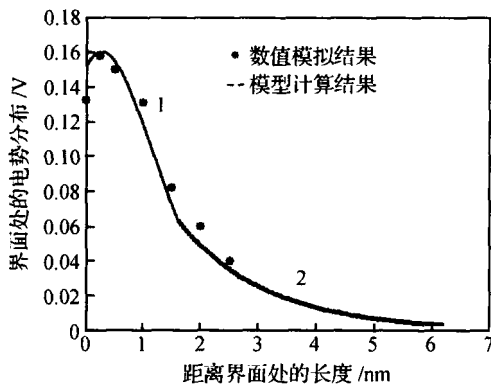


图 6 界面处电势的分布函数

Fig. 6 Electrostatic potential distribution

是说,当栅压为 V_{T0} , $V_1(0)$ 等于 $V_{T0} + 156\text{mV}$. 而要开启沟道, $V_1(0)$ 等于 V_{T0} 即可实现,所以只需在栅上施加 $V_{T0} - 156\text{mV}$ 的电压就可以确保沟道的开启. 所以,多晶硅量子效应使阈值电压变小,即发生负偏移,这与反型层量子效应对阈值电压的影响恰恰相反.

3.3 阈值电压影响计算

图 7 给出了阈值电压偏移量随多晶硅掺杂浓度的变化规律,掺杂越高,阈值电压越小.

最后,我们综合考虑了二氧化硅上下两个界面均存在量子效应对阈值电压的影响. 由于反型层量子效应受二氧化硅层厚度影响^[6],不同厚度的二氧化硅,阈值电压的正偏移值不同;同时,改变多晶硅掺杂浓度,阈值电压的负偏移值也随着变化. 图 8 给出了阈值电压偏移量随二氧化硅层的厚度变化的规律,多晶硅掺杂浓度为 10^{20}cm^{-3} ,衬底掺杂浓度为 10^{18}cm^{-3} .

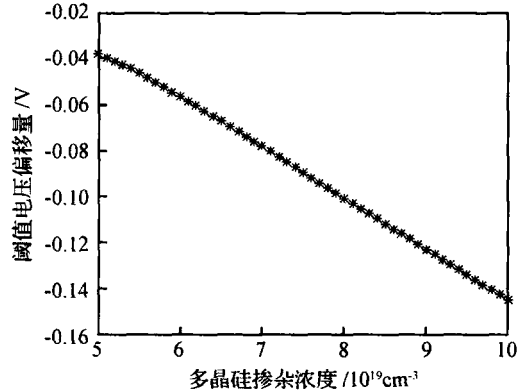


图 7 阈值电压偏移量随多晶硅掺杂浓度的变化规律

Fig. 7 Shift of threshold voltage versus polysilicon doping concentration

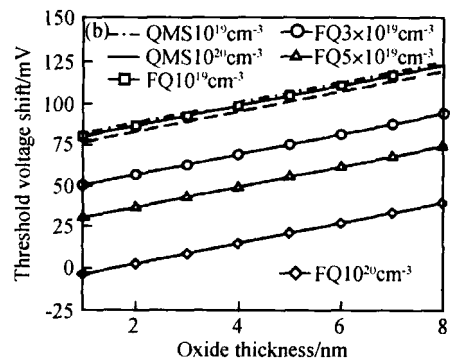
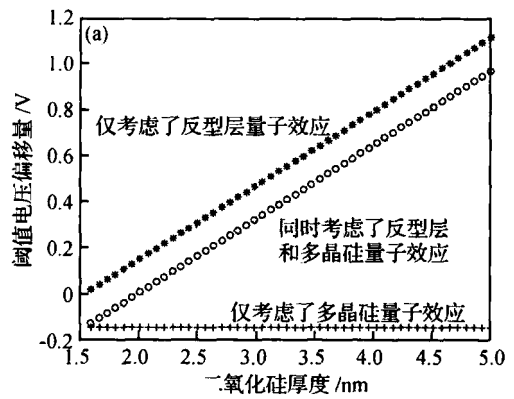


图 8 阈值电压偏移量随二氧化硅层厚度变化的规律 (a) 新模型计算结果;(b) 数值模拟结果^[8]

Fig. 8 Shift of threshold voltage versus oxide thickness (a) New model results;(b) Numerical simulation results

4 结论

由上述可知本模型非常简洁但又不失优越性,仅仅通过两个拟合参数就可以将多个分散的状态模

型概括为一个完整统一的模型;进一步的模型计算以及与数值模拟结果的吻合证明了本模型的正确性和准确性.该模型有利于电路模拟和电路设计.

参考文献

- [1] Spinelli A S, Pacelli A, Lacaita A L. Simulation of polysilicon quantization and its effect on n- and p-MOSFET performance. *Solid-State Electron*, 2002, 46:423
- [2] Spinelli A S, Pacelli A, Lacaita A L. Polysilicon quantization effects on the electrical properties of MOS transistors. *IEEE Trans Electron Devices*, 2000, 47:2366
- [3] Pacelli A. Self-consistent solution of the Schrödinger equation in quantum wells by implicit iteration. *IEEE Trans Electron Devices*, 1997, 44:1169
- [4] Spinelli A, Benvenuti A, Pacelli A. Investigation of quantum effects in highly-doped MOSFET's by means of a self-consistent 2-D model. *IEDM Tech Dig*, 1996:399
- [5] Hänsch W, Vogelsang T, Kircher R, et al. Carrier transport near the Si/SiO₂ interface of a MOSFET. *Solid-State Electron*, 1989, 32(10):839
- [6] Pacelli A, Spinelli A S, Perron L M. Carrier quantization at flat bands in MOS devices. *IEEE Trans Electron Devices*, 1999, 46(2):383
- [7] Esseni D, Abramo A. Modeling of electron mobility degradation by remote coulomb scattering in ultrathin oxide MOSFETs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(7):1665
- [8] Dai Yuehua, Chen Junning, Ke Daoming, et al. An analytical model of MOSFETs threshold voltage accounting for quantum effects. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(2):897 (in Chinese) [代月花, 陈军宁, 柯导明, 等. 考虑量子化效应的 MOSFETs 阈值电压解析模型. *物理学报*, 2005, 54(2):897]

An Analytical Model for Polysilicon Quantization in MOS Devices^{*}

Dai Yuehua, Chen Junning, Ke Daoming, Sun Jiae, and Xu Chao

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

Abstract: This paper proposes a model for polysilicon quantum effects in MOSFETs. Based on the least-squares curve fit, electron distribution functions are obtained. Then, solving Poisson equations, a physically based analytical model is described. There are only two fitting parameters in the new model that can be used to describe different states such as accumulation, threshold, and strong inversion. However, different models used to depict those as different states, respectively. Additionally threshold voltages with the new model are calculated and compared with the numerical simulation results. The good agreement between them proves that the new model is correct and exact.

Key words: polysilicon; quantum effect; fitting parameter; screening length; potential distribution function; electrical field distribution function

PACC: 7340Q; 7320A; 7300

Article ID: 0253-4177(2005)11-2164-05

^{*}Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60276042), the Natural Science Foundation of Anhui Province (No. 01042104), and the Emphases Scientific Research Project of Education Institute of Anhui Province (No. 2003kj0012d)

Dai Yuehua female, was born in 1975, PhD candidate. She is engaged in research on analytical model and characterization of quantum effect devices.

Chen Junning male, was born in 1953, professor, advisor of PhD candidates. His research interest is in VLSI design and semiconductor devices.

Ke Daoming male, was born in 1954, professor, advisor of PhD candidates. His research interest is in VLSI design and semiconductor devices.

Received 14 January 2005, revised manuscript received 16 March 2005