

引用格式:高歌,殷树娟,于肇贤. 考虑量子效应的 FinFET 栅电容物理模型研究[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(8): 30-33.
[GAO G, YIN S J, YU Z X. Study on the QM-based modeling of gate capacitance in FinFET [J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(8): 30-33.]

考虑量子效应的 FinFET 栅电容物理模型研究

高 歌, 殷树娟, 于肇贤

(北京信息科技大学 理学院, 北京 100192)

摘 要: 基于 FinFET 栅电容结构微观物理特性原理, 通过能带结构关系推导了考虑量子效应的栅电容物理模型公式, 使用 TCAD 搭建了 FinFET 器件结构, 通过 MATLAB 仿真出栅电容随栅电压变化的特性曲线, 与理想状态对比得到在反型状态量子效应会使栅电容增大的结论, 量子电容成为影响栅电容大小的主导因素, 同时分析了不同状态下决定栅电容的因素, 仿真了不同拟合参数对特性曲线的影响, 为改善晶体管栅电容线性度的研究提供理论依据, 提出的栅电容模型对基于 FinFET 结构的电路设计研究具有了现实意义。

关键词: FinFET; 量子效应; 栅电容; 物理模型

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2019)08-0030-04

Study on the QM-based modeling of gate capacitance in FinFET

GAO Ge, YIN Shu-juan, YU Zhao-xian

(School of Applied Science, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The physical model formula of gate capacitance considering quantum effect is derived by the band structure relationship based on the principle of microscopic physical properties of FinFET gate capacitance structure which is constructed by TCAD. And the characteristic curve of gate capacitance with gate voltage is simulated by MATLAB. Compared with the ideal state, the quantum effect in the inverse state will increase the gate capacitance, and the quantum capacitance becomes the dominant factor affecting the gate capacitance. At the same time, the factors determining the gate capacitance under different states are analyzed, and the characteristic curves of different fitting parameters are simulated in order to provide theoretical basis for improving the linearity of transistor's gate capacitance. The proposed gate capacitance model has practical significance for circuit design based on FinFET structure.

Key words: FinFET; quantum effect; gate capacitance; physical model

1 引言

随着 CMOS 器件特征尺寸的不断减小, 源极和漏极之间的紧密接近降低了栅极对沟道电荷的控制能力, 出现短沟道效应(SCE). 因此对新型器件结构的研究成为模拟集成电路器件设计的一项重要课题, 其中胡正明教授提出的鳍式场效应晶体管(FinFET)结构^[1]使栅对沟道有极强的控制能力从而能

够抑制短沟道效应. 但量子效应对场效应晶体管也产生一定影响, 如引起电荷通过势垒的隧穿现象及等效氧化层厚度的增加等. 传统 MOSFET 的电容模型不再适用于基于 FinFET 结构的电路设计, 目前国际上有不少学者对 FinFET 的栅电容模型进行了研究, 文献[2]和[3]提出了包含量子电容的栅电容模型, 但在推导过程中涉及的迭代次数非常多, 会给计算机仿真带来很大麻烦, 导致结果不稳定甚至

收稿日期: 2018-11-05; 修回日期: 2018-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61604014); 北京市教委科技面上项目(71E1810981)

出现较大偏差.

基于以上原因,本文针对 FinFET 提出了一种基于物理的考虑量子效应的精确而简化的栅电容模型.

2 考虑量子效应的 FinFET 栅电容建模

文献[4]给出了考虑量子效应后沟道长度范围为 14 nm 到 4 nm 时量子电容对栅电容的影响较大,据此本文使用 Sentaurus TCAD 绘制了 FinFET 器件结构图,如图 1 所示.

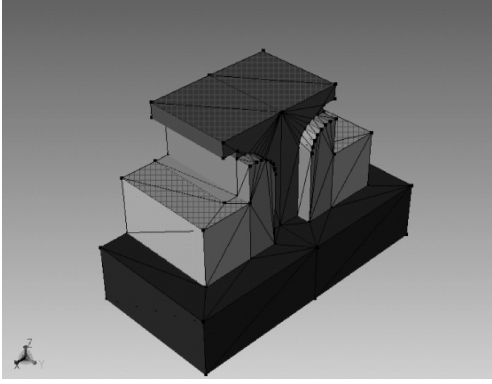


图 1 FinFET 器件结构图

考虑量子效应,FinFET 沟道中的电子受到约束后产生了能级分裂,我们将电荷在沟道中的分布形成的电容定义为量子电容 (Quantum capacitance). 图 2 为场效应管栅电容等效电路图,在反型状态时,单位面积的 FinFET 栅电容 (C_g) 主要由栅氧化层电容 (C_{ins}) 和量子电容 (C_{inv}) 串联而成,我们从物理能带结构关系推导栅电容的模型公式.

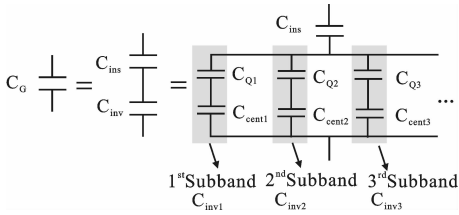


图 2 场效应管栅电容等效电路图

遵循[5]中描述的方法,每个子带的量子电容可以写为

$$C_{Q,i} = q \frac{\partial(-Q_i)}{\partial(E_f - E_i)} \quad (1)$$

式中, Q_i 是第 i 个子带对总半导体电荷 (Q_s) 的贡献; E_i 是第 i 个子带的能级; E_f 是费米能级. 考虑二维状态密度; Q_s 可以被表示为

$$Q_s = \sum_i Q_i = \sum_i \int_{E_i}^{\infty} \frac{\frac{m_{\parallel}^* q}{\pi h^2}}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)} dE \quad (2)$$

式中, $m_{\parallel}^*$ 是面内电子有效质量. 将(2)代入(1)中并与(1)区分可得到

$$C_{Q,i} = \frac{\frac{m_{\parallel}^* q}{\pi h^2}}{1 + \exp\left(\frac{E_i - E_f}{kT}\right)} \quad (3)$$

对于费米能级 E_f , 由(3)可知, 给出一个子带 E_i , 当 $E_f \ll E_i$ 时, 分母无限大, $C_{Q,i}$ 可忽略; 当 $E_f \gg E_i$ 时, $C_{Q,i}$ 为常量. 故 E_f 与 V_g 之间关系的准确形式只需要在 E_i 周围非常窄的范围内, 且近似为线性关系. 故(3)可以转化为

$$C_{Q,i} = \frac{A_i \frac{m_{\parallel}^* q}{\pi h^2}}{1 + \exp\left(\frac{E_i - (B_i q V_g)}{C_i kT}\right)} \quad (4)$$

式中, A_i, B_i, C_i 为拟合参数.

对于子带能级 E_i , 由于逻辑器件中使用典型电源电压值时只有前两个子带的电子占有率是充足的, 故只需考虑 E_0 和 E_1 . 在超薄体装置中, 考虑在几何和电气双重约束下的有效子带能量可以表示为

$$E_n = E_{n,g} + E_{n,e} \quad (5)$$

由文献[2]给出

$$E_{0,g} = \frac{2h^2 \eta^2}{m_{\parallel}^* t_{ch}^2} \quad (6)$$

$$\eta^2 \left(1 + \frac{m_{ox}}{m_{\parallel}^*} \tan^2(\eta)\right) = \frac{m_{\parallel}^* q V_b t_{ch}^2}{2h^2} \quad (7)$$

式中, η 由方程(7)数值求解, V_b 为氧化物和沟道界面处的势垒高度.

由电气约束引起的子带能量由下式给出

$$E_{n,e} = f(t_{ch}) E_{n,tri} \quad (8)$$

式中, $f(t_{ch})$ 作为与沟道厚度相关的经验倍增因子被引入, 用来平衡随着沟道厚度的变化从三角阱到矩形阱的子带能量变化. $E_{n,tri}$ 是三角阱结构的子带能量, 由下式给出

$$E_{n,tri} = \left(\frac{h^2}{2m_{\parallel}^*}\right)^{1/3} \left[\frac{3}{2} \pi q F_s \left(n + \frac{3}{4}\right)\right]^{2/3} \quad (9)$$

式中, F_s 是沟道中的平均电场, 且其与平均电荷密度 n_s 的关系为

$$F_s = \frac{q \zeta n_s}{\epsilon_{ch}} \quad (10)$$

式中, ζ 为常数, ϵ_{ch} 为沟道材料的介电常数. 且 n_s 的表达式为

$$n_s = 2 \frac{C_{ox}}{q} (V_g - V_{off} - E_f) \tag{11}$$

式中, V_{off} 是用来调整阈值电压的参数.

由(5)—(11) 联立得

$$E_0 = E_{0,g} + \lambda_0 n_s^{2/3} \tag{12}$$

式中, $\lambda_0 = \beta_0 (q\zeta/\epsilon_{ch})^{2/3}$

$$\beta_n = f(t_{ch}) \left(\frac{\hbar^2}{2m_{\parallel}^*} \right)^{1/3} \left[\frac{3}{2} \pi q \left(n + \frac{3}{4} \right) \right]^{2/3},$$
类似

地可得到 E_1 .

总的栅电容为

$$C_g = \left[\frac{1}{2C_{ms}} + \frac{1}{\sum_i C_{Q,i}} \right]^{-1} \tag{13}$$

由以上推导可以得到 C_g 关于 V_g 的明确表达式.

3 仿真结果与分析

针对上文建立的考虑量子效应的栅电容模型,使用 MATLAB 对其进行仿真,得到栅电容随栅电压变化的特性曲线,如图 4 所示,紫色曲线为 $t_{ch} = 7 \text{ nm}$, $t_{ox} = 1 \text{ nm}$, $m_{\parallel}^* = 0.048m_0$ 时仿真出的 $C_g \sim V_g$ 特性曲线,为使计算公式有意义,栅压需从大于 V_{off} (约为 0.16 V) 取值,故仿真得出的图形前一段为零,但在积累状态和耗尽状态时,栅电容并不为零,图中蓝色曲线为理想状态下栅电容随栅电压的变化曲线,由十号标记的曲线为考虑量子效应后有效的栅电容,与理想状态对比可以看出,量子效应使栅电容增大. 在反型状态,总的栅电容随栅压的增大在增大,尤其在强反型时, C_g 急剧增大,这是由于量子电容(C_{mv}) 的急剧增大引起的,因为强反型后,耗尽层的宽度几乎不再变化,随着纵向电场的增大,只有靠增加反型层的电子数来平衡栅上注入的正电荷,所以反型层电荷 Q_{mv} 急剧增大. 而强反型时沟道电荷分布达到峰值,对应的量子电容最大,总的栅电容会达到一个最大值. 这与文献[6] 中图形的趋势一致,验证了本文模型推导过程中费米能级与栅电压采用精确近似处理后的正确性. 同时,图 4 中横向给出了不同状态时的总栅电容曲线:积累状态时,栅电容主要由栅氧化层电容决定;阈值状态时,栅电容主要由栅氧化层电容和耗尽层电容 C_{dep} 串联而成;反型状态时,栅电容主要由栅氧化层和反型层量子电容串联而成(此时耗尽层类似于平行板电容). 从图中可以看出,量子效应在反型状态时对总的栅电容的影响不可忽视.

本文着重探究了量子效应在反型层中对栅电容的影响,值得探讨的是量子效应对多晶硅栅的影响,

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时能带弯曲不大,认为不会形成深的量子阱,所以多晶硅中的载流子分布常用经典的方法进行描述. 但研究表明由于多晶硅和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. 这一情况值得今后更加深入的探究.

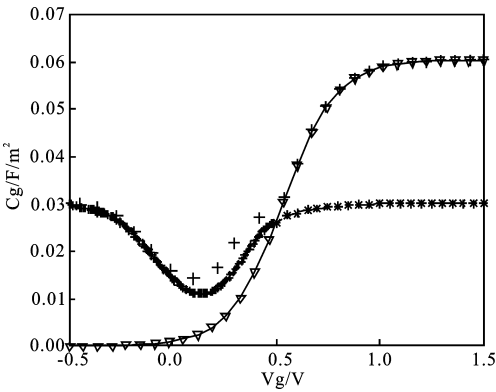


图 3 $C_g \sim V_g$ 特性曲线

图 4、图 5 分别给出了不同 A_i 下(拟合参数 $B_i = 0.2, C_i = 1$) 以及不同 B_i 下(拟合参数 $A_i = 15, C_i = 1$) 的 $C_g \sim V_g$ 特性曲线变化情况. 由图 4 可看出随着 A_i 的减小, C_g 的峰值在减小,表明参数 A_i 可能影响着反型层电荷的大小. 而图 5 中随 B_i 值的减小曲线的斜率在减小,影响了栅电容随栅压变化的速率. 因此如何选取合适的拟合参数(有关工艺参数) 对提高晶体管栅电容的线性度研究提供了依据.

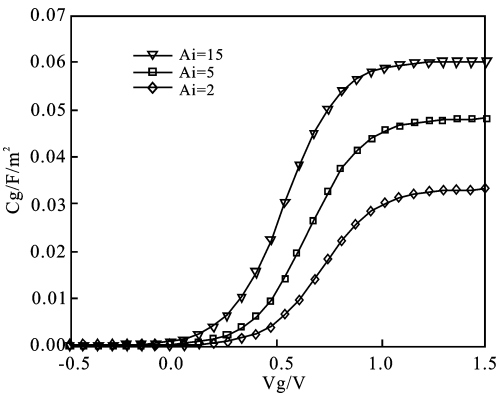


图 4 不同 A_i 下的 $C-V$ 特性曲线($B_i = 0.2, C_i = 1$)

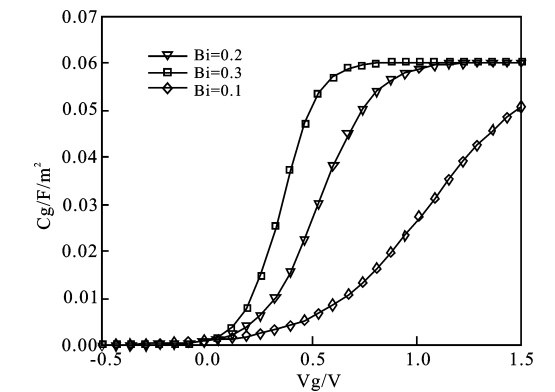


图 5 不同 B_i 下的 C - V 特性曲线($A_i = 15, C_i = 1$)

4 结束语

本文从物理能带结构关系出发推导了考虑量子效应的精确 FinFET 栅电容模型,验证了本文对费米能级与栅压关系近似处理的正确性,讨论了仿真结果并分析了物理原因,且进一步提出了量子效应对栅极有何影响的问题,此外研究了不同拟合参数对特性曲线的影响,为提高晶体管栅电容线性度的研究提供理论依据,对基于 FinFET 结构的电路设计研究具有了现实意义。

参考文献:

[1] DESHPANDE V, DJARA V, CONNOR E O, et al. Advanced 3D Monolithic hybrid CMOS with Sub-50 nm gate inverters featuring replacement metal gate (RMG)-InGaAs nFETs on SiGe-OI Fin pFETs[C]//

2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). European. IEEE, 2015 :881-884.

[2] MUDANAI S, ROY A, KOTLYAR R, et al. Capacitance Compact Model for Ultrathin Low-Electron-Effective-Mass Materials[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2011, 58 (12) : 4204-4211.

[3] YADAV C, DUARTE J P, KHANDELWAL S, et al. Capacitance modeling in III-V FinFETs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62 (11) : 3892-3897.

[4] HU C M. New sub-20nm transistors: why and how [C] // IEEE Design Automation Conference. New York, USA, 2011:460-463.

[5] JIN D, KIM D, KIM T, et al. Quantum capacitance in scaled down III-V FETs[C]// 2009 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). Baltimore, MD, USA, 2010.

[6] GANERIWALA M D, YADAV C, MOHAPATRA N R, et al. Modeling of Charge and Quantum Capacitance in Low Effective Mass III-V FinFETs[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2017, 4 (6) : 396-401.

作者简介:

高歌 女,(1993-), 硕士研究生. 研究方向为微纳电子器件及器件建模. E-mail:1040550051@qq.com

殷树娟 女,(1981-),副教授. 研究方向包括混合信号集成电路设计、无源器件设计、核电子学和 IP 可重用设计.

于肇贤 男,(1965-),教授. 研究方向包括理论物理中的非线性问题和模式识别.