

利用 FN 振荡电流测量超薄栅 MOS 结构的栅氧化层厚度

毛凌锋 谭长华 许铭真 卫建林

(北京大学微电子所, 北京 100871)

摘要: 给出了一种利用 FN 振荡电流的极值测量超薄栅 MOS 结构的栅氧化层厚度和电子在栅氧化层导带中的有效质量方法。利用波的干涉方法来处理电子隧穿势垒的过程, 方便地获得了出现极值时外加电压和栅氧化层厚度、势垒高度、电子的有效质量之间的关系。这种方法的最大优点是精确和简便, 并可方便地应用于任意形状的势垒和势阱。

关键词: 隧穿; 金属氧化物半导体结构; 干涉

PACC: 7340 EEACC: 2570D; 2570F

中图分类号: TN 386.1 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2000) 10-0999-06

Thickness Measurements for Ultrathin-Film Insulator MOS Structure Using Fowler-Nordheim Tunneling Current Oscillations

MAO Ling-feng, TAN Chang-hua, XU Ming-zhen and WEI Jian-lin

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Received 25 September 1999, revised manuscript received 13 January 2000

毛凌峰 1971 年出生, 目前在北京大学攻读博士学位, 现主要从事小尺寸 MOS 器件中的量子效应及小尺寸器件可靠性的研究[MAO Ling-feng was born in China in 1971. He is purchasing his PH. D. Degree at the Institute of Microelectronics, Peking University. His main research interest are the quantum effects in the MOS devices, modeling of MOS devices and degradation of MOS devices under uniform, nonuniform stresses(E-mail: lfmao@ime.pku.edu.cn)].

谭长华 1936 年出生, 教授, 主要从事小尺寸器件物理及可靠性物理的研究[TAN Chang-hua was born in 1936. He graduated from Moscow University, USSR. Currently, he is a professor in Institute of Microelectronics, Peking University. His current interests include physics and reliability of small-dimension devices].

许铭真 1939 年出生, 教授, 主要从事小尺寸 MOS 器件特性及其表征、半导体材料可靠性和器件可靠性的物理的研究[XU Ming-zhen was born in 1939. She graduated from the Department of Physics, Peking University, China. She is now engaged as a professor in Institute of Microelectronics, Peking University. Her current interests include physics and characterization of small-dimension devices and reliability of semiconductor material and devices].

卫建林 1972 年出生, 目前在北京大学攻读博士学位, 现主要从事小尺寸器件可靠性的研究. [WEI Jian-lin was born in China, in 1972. He is purchasing his PH. D. Degree at the Institute of Microelectronics, Peking University. His main research interest are the modeling of MOS devices and degradation of MOS devices under uniform, nonuniform stresses].

1999-09-25 收到, 2000-01-13 定稿

Abstract: A method is given for measuring the thickness of gate oxide and the effective electron mass in the conduction band of gate oxide in MOS structure using the extrema of Fowler-Nordheim tunneling current oscillations. Interference method is introduced to analyze the process of electron tunneling potential barrier. With this method, the relation between the applied voltage, oxide thickness, barrier height and effective electron mass can be obtained very conveniently. The big advantage of this method is accuracy and convenience. And it can be applied easily to the arbitrary potential barrier and well.

Key words: tunnel; MOS structure; interference

PACC: 7340 **EEACC:** 2570D; 2570F

Article ID: 0253-4177(2000)10-0999-06

1 引言

二十年来,电容-电压(*C-V*)法被广泛地用来获取MOS器件的栅氧化层厚度.测量栅氧化层和栅氧化层/硅界面的电子陷阱的性质需要知道精确的栅氧化层厚度.同时由于跨导以及MOS场效应管反相器和放大器的增益均反比于栅氧化层厚度,因此设计现在及将来的集成电路中高性能的MOS场效应管也需要知道精确的栅氧化层厚度.当晶体管的面积缩小到深亚微米的范围时,为了保持想得到MOS场效应管的电流-电压特征栅氧化层的厚度必需减少到10nm以下.并且对于在从一个MOS场效应管的加速应力数据外推工作电压时的失效时间的过程中,由于失效率直接与电子量子隧穿薄栅氧化层的几率成正比,因此外推过程中所使用的栅氧化层厚度精确度将决定所得到的失效时间的精确度.由于隧穿几率随栅氧化层厚度的减少指数增加,因此由外推法得到的MOS场效应管工作电压时的失效时间的误差随着栅氧化层厚度的减少迅速增加.例如,对于一个5nm厚的栅氧化层,如果厚度有5%($\pm 0.25\text{nm}$)的不确定将会引起外推的工作电压为3.3V的MOS场效应管的失效时间有100倍的不确定.

在对超薄栅MOS结构中FN电流的研究结果表明:在高电场下穿过栅氧化层的隧穿电流有一小的振荡成分^[1-7].以前精确处理整个势垒来求解电子隧穿梯形势垒透射系数的理论工作,表明电子的透射系数也将是一个叠加周期振荡函数的函数^[8-10].因此相应的FN电流会包含振荡成分,这些振荡来源于电子之间的量子干涉,强烈依赖栅氧化层的厚度^[11].意味着可以用FN振荡来精确测量栅氧化层的厚度,这种方法对于栅氧化层厚度的不断变薄而使得当用常规的方法如椭圆偏振法和电容-电压法测量引起的误差越来越大时具有明显的意义.

2 已有的利用FN振荡测量栅氧化层厚度的公式及其不足

Zafar等人提出了一个利用FN电流振荡测量栅氧化层厚度的公式^[12]. FN振荡电流出现极值的条件为^[2, 11-14]:

$$\left[\frac{8\pi^2 q m_{cb} F_n}{\hbar^2} \right]^{1/3} \left[L_{ox} - \frac{\Phi_0}{q F_n} \right] = K_n \quad (1)$$

式中 Φ_0 是势垒高度; m_{cb} 是栅氧化层导带中电子的平均有效质量; \hbar 是普朗克常数; L_{ox} 是栅氧化层厚度; q 是电子的电荷; 对于极小值情况, F_n 是第 n 个极小值出现处的电场强度; K_n 是 Airy 函数的导数的第 n 个零值出现处. 对于极大值情况, F_n 是第 n 个极大值出现处的电场强度, K_n 是 Airy 函数的第 n 个零值出现处. 这个极值条件来源于先前的工作^[5, 8-14], 在这些工作中求解电子隧穿三角势垒得到的电流密度为

$$J = BJ_0 \quad (2)$$

$$J_0 = AF^2 e^{-C/F} \quad (3)$$

$$B = \left[A i(-a_0 x_1)^2 + \left(\frac{a}{k} \right)^2 A i'(-a_0 x_1) \right]^{-1} \quad (4)$$

式中 B 是振荡因子; Ai 和 Ai' 分别是 Airy 函数和 Airy 函数的导数; k 是电子的波矢; x_1 是电子在势垒中传播的路程; J_0 是经典的 FN 隧穿电流^[11]; A 和 C 是与势垒高度和隧穿电子的有效质量相关的常数。由于 B 是与 Airy 函数及其导数均相关的函数, 公式(1)仅仅当满足 $(a/k)^3 \ll 1$ 时, 振荡因子 B 将在 $Ai(-ax_1) = 0$ 时出现极大值, 并且振荡因子 B 在 $Ai^2(-ax_1)$ 出现极大值时(例如 $Ai'(-ax_1) = 0$)会出现极小值^[2, 13, 14]。另一类误差则是由振荡因子 B 是对精确解的修正引起。因此用公式(1)来测量栅氧化层的厚度存在明显的问题, 即 Airy 函数或其导数出现零值时并不一定相应于 FN 振荡电流出现极值。

3 干涉方法

在我们先前的工作中, 根据 FN 电流振荡的起源: 电子波之间的相互干涉而引入干涉方法对其进行分析^[15, 16]。电子波之间干涉可以用图 1(c)示意。直接透射的电子波和经入射界面反射后透射的电子波之间发生干涉引起 FN 电流振荡。对于三角势垒, 电子的复波矢 K 可写成:

$$K(x, V) = \frac{[2m^*(x)(E - U(x, V))]^{1/2}}{\hbar} \quad (5)$$

式中

$$U(x, V) = \phi_M - \frac{qV}{L_{ox}} x \quad (6)$$

式中 E 是电子的动能; $m^*(x)$ 是电子的有效质量; L_{ox} 势垒的厚度; V 是外加的电压; x 是电子到入射界面的距离。假定电子波是垂直入射, 则电子在势垒中传播引起的电子相位偏移为:

$$\begin{aligned} \phi(x, V) &= \operatorname{Re} \left[\int_0^x K(x, V) dx \right] \\ &= \frac{2\sqrt{2m^*(qV + E - U)^{3/2}}}{3\hbar qV} L_{ox} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 Re 取复数的实数部分(上式中积分的虚数部分是衰减因子, 它引起电子波振幅的衰减)。如图 1(c)所示, 一次透射波和二次透射波之间的相位差为:

$$\Delta\phi = 2(\delta/2 + \phi(x, V)) \quad (8)$$

式中 $\delta/2$ 是电子在经典传播的禁区传播时由于电子的本性引起(它与电磁波在理想导体中传播时磁场滞后于电场 $\pi/4$ 的情况类似^[13])。在用干涉方法研究 FN 电流振荡时发现当电子波在理想介质的经典禁区传播一次引起的相位偏移也是 $\pi/4$ 。类似于光波的干涉, 当相位差为 π 的偶数倍时对应于 FN 电流振荡的极大值处, 而当相位差为 π 的奇数倍时对应于 FN 电流振荡的极小值处。因此在第 n 个极小值处和第 n 个极大值处有如下关系:

$$L_{ox} = \frac{3\hbar(2m^*qV)^{-1/2}}{4} \left[1 + \frac{E - U}{qV} \right]^{-3/2} (2n - 1.5)\pi \quad (9)$$

$$L_{ox} = \frac{2\hbar(3m^*qV)^{-1/2}}{4} \left[1 + \frac{E - U}{qV} \right]^{-3/2} (2n - 0.5)\pi \quad (10)$$

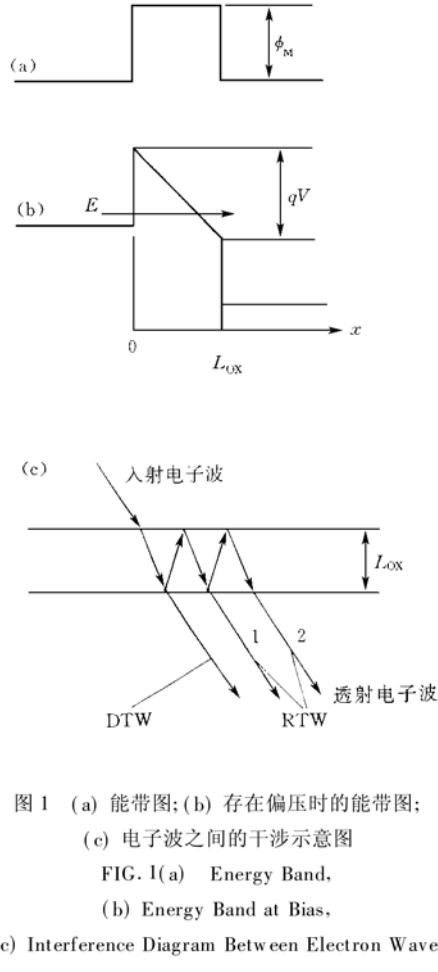


图 1 (a) 能带图; (b) 存在偏压时的能带图;

(c) 电子波之间的干涉示意图

FIG. 1(a) Energy Band,

(b) Energy Band at Bias,

(c) Interference Diagram Between Electron Waves

式中 n 是自然数。从上面的方程可知, 如果知道了 FN 电流振荡的极值点就可以得到栅氧化层的厚度。因此可根据上面的两个方程来测量栅氧化层的厚度。并且 FN 电流振荡的准周期强烈依赖于栅氧化层厚度可由干涉方法很好地解释^[5]。

比较(4)式和(9)、(10)式, 从(4)式我们难以得到测量栅氧化层厚度的显式关系, 而且它使用了比较复杂的函数: Airy 函数, 因此使用(4)式来测量栅氧化层厚度是麻烦的。而(9)、(10)式是一个仅含有简单函数的表达式, 它是一个显式关系, 可直接、方便地从实验数据中抽取出栅氧化层厚度。并且由于(7)式可以用于任意形状的势垒或势阱, 因此干涉方法可能对于任意形状的势垒或势阱均适用。为了验证干涉方法的正确性及优越性, 下面将给出精确求解电子隧穿三角势垒的透射系数的方法^[8]。然后比较 Zafar 等人提出的公式和用干涉方法得到的公式和精确求解三角势垒的薛定谔方程而得到的结果。

4 精确求解电子隧穿三角势垒的透射系数

根据量子力学的理论, 势垒的薛定谔方程可写为:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} - \frac{2m^*}{\hbar^2} [U(x) - E] \psi(x) = 0 \quad (11)$$

对于如图 1 所示的势垒, 可得到电子隧穿势垒的透射系数为^[8]:

$$\begin{aligned} D(E) = & \frac{k_3}{k_1} \times \frac{4}{\pi^2} \left[\left| \frac{z'}{k_1} \{A_i'(z_0)B_i'(z_s) - A_i'(z_s)B_i'(z_0)\} \right|^2 \right. \\ & + \frac{k_3}{z'} \{A_i(z_0)B_i(z_s) - A_i(z_s)B_i(z_0)\} \\ & + \left. \left| \frac{k_3}{k_1} \{A_i(z_s)B_i'(z_0) - A_i'(z_0)B_i(z_s)\} \right. \right. \\ & \left. \left. + A_i(z_0)B_i'(z_s) - A_i'(z_s)B_i(z_0)\right|^2 \right]^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

在式中

$$z_0 = \left[\frac{aL_{ox}}{2qV} \right]^{2/3} \phi_l \quad (13)$$

$$z_s = \left[\frac{aL_{ox}}{2qV} \right]^{2/3} (\phi_l - qV) \quad (14)$$

$$z' = - \left[\frac{a^2}{4} \times \frac{qV}{L_{ox}} \right]^{1/3} \quad (15)$$

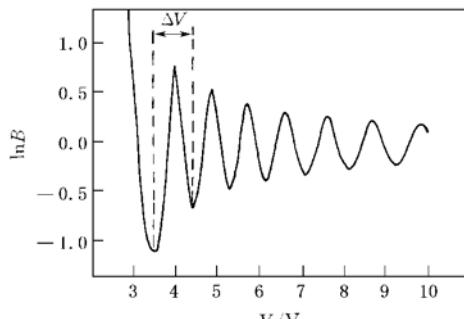


图 2 典型的 FN 振荡的振荡因子 B 随外加电压变化的曲线

FIG. 2 Curve of Oscillation Factor of FN to Applied Voltage

$$A_i'(z_0) = \frac{d}{dz} A_i(z)|_{z=0} \quad (16)$$

$$B_i'(z_0) = \frac{d}{dz} B_i(z)|_{z=0} \quad (17)$$

$$A_i'(z_s) = \frac{d}{dz} A_i(z)|_{z=L_{ox}} \quad (18)$$

$$B_i'(z_s) = \frac{d}{dz} B_i(z)|_{z=L_{ox}} \quad (19)$$

振荡因子 B 定义为:

$$D \approx B \exp(-2 \int k(x) | dx) \quad (20)$$

比较(4)式和(12)、(20), 我们可以发现(4)式是一个近似的结果。

图 2 给出典型的 FN 振荡的振荡因子 B 随外加电压变化的曲线。它是通过精确求解三角势垒的薛定谔

方程而提取出振荡因子. 在计算中所用的相关参数为: 栅氧化层的厚度 $T_{ox} = 5\text{nm}$; 电子的能量 $E = 10^{-4}\text{eV}$; 电子的有效质量 $m^* = 0.5m$ (m 是自由电子的质量), 势垒的高度 $U = 3.15\text{eV}$.

5 分析和讨论

图 3 给出了精确求解三角势垒的薛定谔方程而得到的 FN 振荡电流出现极小值处的电压, 由方程(1)计算得到的 FN 振荡电流出现极小值处的电压, 以及由干涉方法计算所得到的 FN 振荡电流出现极小值处的电压. 从图 3 可发现干涉方法在各个极小值处均很好地吻合精确的解, 但是由方程(1)所计算得到的电压值或多或少地偏离精确的结果, 这可能是导致 Zafar 等人发现的当外加电压时变化时电子的有效质量的数值呈现出较大起伏的原因^[12].

图 4 给出了在第二极小值处分别由公式(1)和干涉方法进行栅氧化层厚度测量的误差随测量电压变化的曲线. 计算使用的参数与图 2 所使用的一样. 对于各种厚度的情况下, 栅氧化层厚度测量误差的计算, 是通过精确求解各种厚度情况下的整个势垒的薛定谔方程得到出现第二极小值

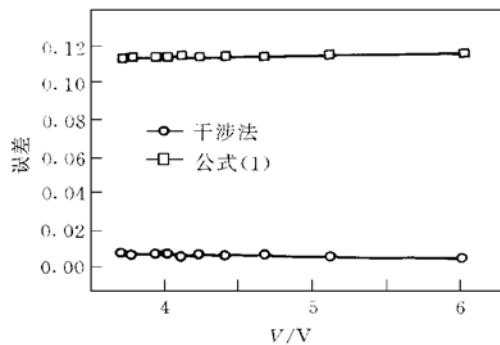


图 4 由公式(1)和干涉方法测量不同栅氧化层厚度时的理论误差

FIG. 4 Theory Errors for Different Oxide Thickness Calculating by Equation (1) and Measuring by Interference Method

图 5 给出了由精确求解三角势垒的薛定谔方程、方程(1)和干涉方法计算得到的准周期 ΔV 随氧化层厚度的变化曲线. 计算使用的参数与图 2 所使用的一样. 图 5 再次显示了干涉方法比方程(1)有着更高的精确度, 并且 FN 电流振荡的准周期强烈依赖于栅氧化层厚度^[5]可由干涉方法很好地解释.

上面的方法在确定栅氧化层厚度时具有三个主要特征: 当栅氧化层变得很薄时高的精确度, 使用简便和广泛的适应性. 由于干涉方法具有以上的特征且由于 FN 振荡电流对于电学老化前后栅氧化层的质量很敏感, 因此干涉方法是一种有用的研究栅氧化层退

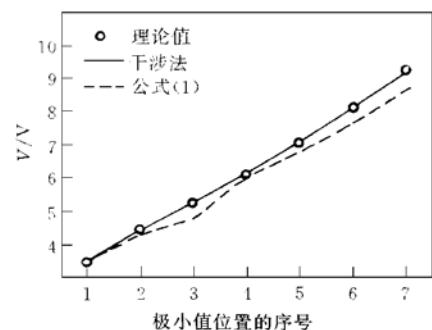


图 3 由精确求解、公式(1)和干涉方法分别计算得到的出现极小值时的外加电压

FIG. 3 Applied Voltage at Minimum of FN Oscillation Current Calculating by Accurate Evalution, Equation (1) and Interference Method, Respectively

处的电压, 然后利用这个电压值通过两种方法得到不同的结果和实际计算所用的栅氧化层厚度进行比较. 使用公式(1)所得到的厚度结果的最小误差大于 11.2%, 相反如果使用干涉方法, 则所得结果的最大误差小于 0.63%. 由此, 如果我们采用公式(1)进行厚度测量将会对寿命预测带来严重影响. 但干涉方法所得的结果仍很好地吻合精确的结果.

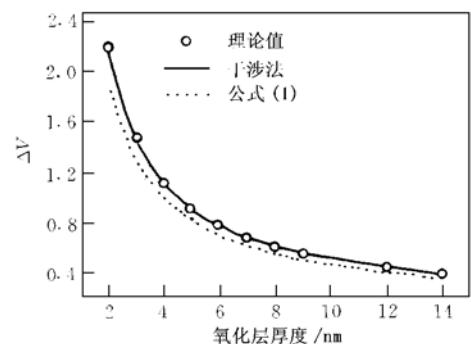


图 5 由公式(1)和干涉方法分别计算得到的准周期随栅氧化层厚度变化的曲线

FIG. 5 Curve of Quasi-Period to Varing Gate Oxide Thickness Calculating by Equation (1) and Interference Method.

化的工具.

6 结论

本文给出了一种使用 FN 振荡电流测量栅氧化层厚度的简单且精确的公式, 它也可以用来测量势垒中电子的有效质量. 且该方法可能对于任意形状的势垒和势阱均适用. 它还可能是一种研究栅氧化层退化机理的有用工具.

参 考 文 献

- [1] J. Maserjian, J. Vac. Sci. Technol., 1974, **11**: 996.
- [2] G. P. Petersson, C. M. Svensson and J. Maserjian, Solid-State Electron., 1974, **18**: 996.
- [3] G. Lewicki and J. Maserjian, J. Appl. Phys., 1975, **46**: 3032.
- [4] J. Maserjian and N. Zamani, J. Appl. Phys., 1982, **53**: 559.
- [5] O. Briere, K. Brrla, A. Hamau and G. Ghibaudo, Solid-State Electron., 1997, **41**: 987.
- [6] K. J. Hebert and E. A. Irene, J. Appl. Phys., 1997, **82**: 291.
- [7] M. V. Fischetti, D. J. Dimaria, L. Dori, J. Batey, E. Tierney and J. Stasiak, Phys. Rev., 1989, **B35**: 4404.
- [8] K. H. Gundlach, Solid-State Electron., 1966, **9**: 949.
- [9] Yuji Ando and Tomohiro Itoh, J. Appl. Phys., 1987, **61**: 1497.
- [10] Wayne W. Lui and Masao Fukuma, J. Appl. Phys., 1986, **60**: 1555.
- [11] S. Zafar, Q. Liu and E. A. Irene, J. Vac. Sci. Technol., 1995, **A13**: 47.
- [12] S. Zafar, K. A. Conrad, Q. Liu, E. Irene, G. Hames, R. Kuehn and J. J. Wortman, Appl. Phys. Lett., 1995, **67**: 1031.
- [13] C. B. Duke and M. E. Alferieff, J. Chem. Phys., 1967, **46**: 923.
- [14] M. E. Alferieff and C. B. Duke, J. Chem. Phys., 1967, **46**: 938.
- [15] L. F. Mao, Ch. H Tan, M. Zh. Xu and J. L. Wei, accepted by Acta Physica Sinica.
- [16] L. F. Mao, Ch. H Tan and M. Zh. Xu, accepted by Solid-State Electronics.
- [17] Melvin Schwartz, Principles of Electrodynamics, McGraw-Hill, Inc. USA, 1972, 234—272.