

利用 FN 振荡电流估计金属-氧化物-半导体场效应管 Si-SiO₂ 界面宽度*

杨 尧^{1,2} 毛凌峰³

(1 西安电子科技大学物理系, 西安 710071)

(2 航天工业总公司 207 所 JS66 重点实验室, 北京 100854)

(3 北京大学微电子所, 北京 100871)

摘要: 给出一种利用 FN 隧穿电流振荡来估计金属-氧化物-半导体场效应管的界面宽度的方法, 数值计算的结果表明该方法可以精确而且方便地估计界面宽度, 用这种方法估计得到的界面宽度在 0.3 nm 左右.

关键词: FN 隧穿电流; MOSFET; 界面

PACC: 7340G; 7340R

中图分类号: TN 386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)01-0070-04

1 引言

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^[1~12]. 以前用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也表明, 电子的透射系数将是一个叠加周期振荡函数^[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, 并强烈依赖于栅氧化层的厚度. 因为, 界面存在使电子在氧化层禁带中的路程变短, 所以 FN 电流振荡也强烈依赖于界面, 这意味着可以用 FN 振荡来估计界面的性质.

在文献[13~16]中, 干涉方法被用来分析 FN 电流振荡, 测量栅氧化层厚度^[14]和氧化层导带底附近的电子有效质量^[15]. 本文将延续这些工作, 利用 FN 电流振荡来估计界面宽度.

2 干涉方法

在我们先前的工作中, 根据 FN 电流振荡的起

源, 从电子波之间的相互干涉引入干涉方法对其进行分析^[13~16]. 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 \bar{K} 可写成:

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

式中:

$$U(x, V) = \phi_0 - \frac{qV}{T_{ox}}x \quad (2)$$

式中 E 是电子的动能; $m^*(x)$ 是电子的有效质量; T_{ox} 是势垒的厚度; 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:

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

式中 Re 表示取复数的实数部分. 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 所示, 一次透射波和二次透射波之间的相位差为:

* 目标与环境特性国防科技重点实验室基金资助项目(00JS66.6.1.ZS6603)

杨 尧 博士研究生, 主要从事应用光学以及光电子学研究.

毛凌峰 博士研究生, 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.

2001-02-23 收到, 2001-06-04 定稿

©2002 中国电子学会

$$\Delta\phi = 2(\delta/2 + \Phi(x, V)) \quad (4)$$

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。用干涉方法研究 FN 电流振荡时发现, 电子波在理想介质的经典禁区传播一次所引起的相位偏移也是 $\pi/4^{[13-16]}$, 类似于光波的干涉。相位差为 π 的偶数倍对应于 FN 电流振荡的极大值处, 而当相位差为 π 的奇数倍对应于 FN 电流振荡的极小值处。

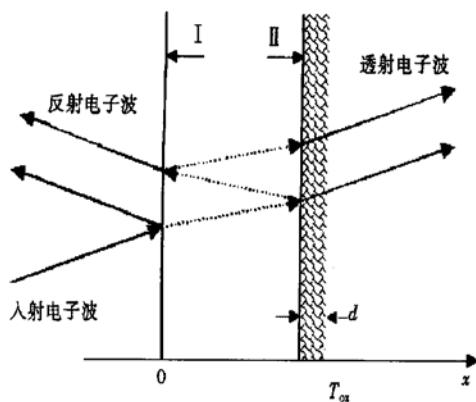


图 1 存在转变区的势垒

Fig. 1 Electron tunneling through barrier with transition region

假定一个氧化层厚度为 T_{ox} 的 MOS 结构, 存在宽度为 d 的界面转变区, 图 1 显示了这个结构。界面转变区的宽度将使电子隧穿氧化层禁带的路程变短, 并且在 FN 振荡发生时, 对于隧穿电子来说, 转变区是经典允许区。同时, 我们假定势能在界面处的变化趋势是指数变化的。基于以上的假设, 转变区可以被看作是透明的。后面的第一原理(在这里第一原理的本质是直接从薛定谔方程出发去求解隧穿电流)计算表明这个结论是成立的。正入射下, 相位变化可得到为

$$\Phi(V) = \int_{x_1}^{T_{ox}-d} \bar{K}(x, V) dx \quad (5)$$

式中 x_1 是电子隧穿进入氧化层导带处的位置。最后可得到

$$\begin{aligned} \Phi(V) &= \frac{2\sqrt{2m^*}}{3\hbar} \left[\frac{qV + E - \Phi_m}{qV} T_{ox} - d \right] \\ &\times \sqrt{qV \frac{T_{ox} - d}{T_{ox}} + E - \Phi_m} \end{aligned} \quad (6)$$

方程(6)明显地不同于界面平整时的情况, 即方程(3)。

$$\Phi(V) = \frac{2\sqrt{2m^*}}{3\hbar qV} (qV + E - \Phi_m)^{3/2} T_{ox} \quad (7)$$

假定量子干涉主要来源阴极费米能级附近的电子, 因此, 方程(6)、(7)可改写为

$$\begin{aligned} \Phi(V) &= \frac{2\sqrt{2m^*}}{3\hbar} \left[\frac{qV - \Phi_m}{qV} T_{ox} - d \right] \\ &\times \sqrt{qV \frac{T_{ox} - d}{T_{ox}} - \Phi_m} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Phi(V) = \frac{2\sqrt{2m^*}}{3\hbar qV} (qV - \Phi_m)^{3/2} T_{ox} \quad (9)$$

电流振荡的极值处出现的条件可写为

$$\Phi(V) = \left[n - \frac{1}{2} \right] \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

式中 n 是整数。 n 为奇数时, FN 电流出现极小值; n 为偶数时, FN 电流出现极大值。

从方程(8)、(9)、(10)可断言, Si-SiO₂ 界面的宽度可引起出现极值处的外加电压的漂移, 由此可通过这种漂移来估计界面宽度。

3 分析和讨论

对于一个给定的如图 1 所示的 MOS 结构, 我们可由方程(8)来确定极值处的外加电压值, 同时也可以通过数值求解薛定谔方程来确定。在数值求解中, 界面处的势取的是指数变化形式。图 2 显示了由方程(8)和数值求解薛定谔方程确定的极值处的电

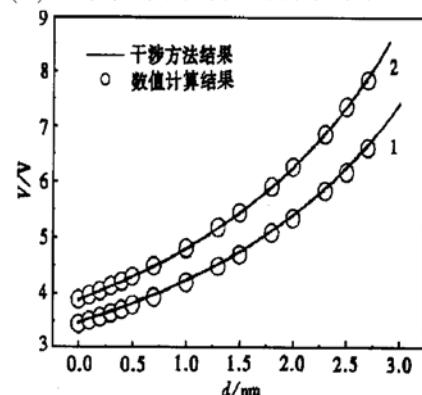


图 2 对于不同界面宽度在栅氧化层厚度为 6nm 时, 数值计算结果和干涉方法结果的对照(两条曲线 1, 2 分别代表第一和第二极值)

Fig. 2 Comparison of current oscillations calculated from the interference method and a numerical calculation for different widths of transition region with a barrier thickness 6nm

压值, 其中氧化层的厚度为 6nm, 界面的宽度从 0 到 3nm 变化。从图 2 可看出, 两种方法吻合得很好。

它表明当势能的变化在界面处是指数衰减时, 转变区可以被看作是透明的。同时也表明了, 方程(8)可用来估计界面宽度对 FN 电流振荡的影响, 由此也可利用 FN 电流振荡的变化来估计界面的宽度。

我们利用文献中的 FN 电流振荡数据来估计界面宽度的值, 从文献[2]的数据, 可得到界面的宽度为 0.35nm。从文献[3]的数据, 可得到界面的宽度为 0.36nm。从文献[4]的数据, 可得到界面的宽度为 0.46nm。从文献[5]的数据, 可得到界面的宽度为 0.35nm。从文献[6]的数据, 可得到界面的宽度为 0.35nm。从文献[7]的数据, 可得到界面的宽度为 0.27nm。从上面这些结果可看出, 界面的宽度一般在 0.3nm 左右, 这个结果与文献[3]和[17]的结果吻合得很好。

4 结论

本文通过数值求解存在界面转变区时的整个势垒的薛定谔方程, 发现界面宽度对 FN 电流振荡有强烈影响, 并利用一个透明的近似来得到一个界面转变区对 FN 电流振荡影响的分析表达式。在指数衰减势的近似条件下, 数值计算的结果表明该透明近似在势以指数形式变化时是成立的。并利用该分析表达式和文献中的数据对界面宽度进行估计。得到的结果表明界面宽度在 0.3nm 左右, 这与文献中的结果吻合得很好。因此, 它可用来估计薄栅 MOS 结构的栅氧化层的势垒转变区的宽度。

参考文献

- [1] Maserjian J. *J Vac Sci Technol*, 1974, 11: 996
- [2] Lewicki G, Maserjian J. *J Appl Phys*, 1975, 46: 3032
- [3] Maserjian J, Zamani N. *J Appl Phys*, 1982, 53: 559
- [4] Poler J C, McKay K K, Irene E A. *J Vac Sci Technol*, 1994, B12: 88
- [5] Faigon A, Campabadal F. *Solid-State Electron*, 1996, 39: 252
- [6] Briere O, Brrla K, Hamaui A, et al. *Solid-State Electron*, 1997, 41: 987
- [7] Housa M, Nigam T, Mertens P W, et al. *Solid-State Electron*, 1999, 43: 159
- [8] Gundlach K H. *Solid-State Electron*, 1966, 9: 949
- [9] Ando Y, Itoh T. *J Appl Phys*, 1987, 61: 1497
- [10] Lui W W, Fukuma M. *J Appl Phys*, 1986, 60: 1555
- [11] Zafar S, Liu Q, Irene E A. *J Vac Sci Technol*, 1995, A13: 47
- [12] Zafar S, Conrad K A, Liu Q, et al. *Appl Phys Lett*, 1995, 67: 1031
- [13] Mao L F, Xu M Z, Tan C H, et al. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49: 974 [毛凌峰, 许铭真, 谭长华, 等. 物理学报, 2000, 49: 974]
- [14] Mao Lingfeng, Xu Mingzhen, Tan Changhua, et al. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2000, 21: 999 [毛凌峰, 许铭真, 谭长华, 等. 半导体学报, 2000, 21: 999]
- [15] Mao L F, Tan C H, Xu M Z. *Solid-State Electron*, 2000, 44: 1501
- [16] Mao L F, Wei J L, Tan C H, et al. *Solid State Communications*, 2000, 114: 383
- [17] Cundiff S T, Knox W H, Baumann F H, et al. *Appl Phys Lett*, 1997, 70: 1414

Estimation of Widths of Si-SiO₂ Interfaces in Metal-Oxide-Semiconductor Structures from FN Tunneling Current Oscillations*

Yang Yao^{1,2} and Mao Lingfeng³

(1 Department of Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Laboratory of JS66, No. 207 Institute, China Aerospace, Beijing 100854, China)

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

Abstract: A method is presented for estimating the widths of interface in metal-oxide-semiconductor structures by using of the FN tunneling current oscillations. A numerical calculation shows that this method can estimate the width of interface accurately and conveniently. The interface widths are observed around 0.3nm using this method.

Key words: FN tunneling current; MOSFET; interface

PACC: 7340G; 7340R

Article ID: 0253-4177(2002)01-0070-04

* Project supported by Foundation of Beijing Environmental Features Laboratory

Yang Yao PhD candidate. His main research interest is in applied optics and optic-electronics.

Mao Lingfeng PhD candidate. His main research interest is in the quantum effects in the MOS devices and the modeling of MOS devices and degradation of MOS devices under uniform, non-uniform stresses.