

超薄 SiO_2 膜电子隧穿及低场 传输电流的温度关系*

冯文修 陈蒲生

黄世平

(华南理工大学 应用物理系 广州 510641) (香港中文大学 电子工程学系)

提要 在 N-Si 100 衬底制作了 10nm 超薄 SiO_2 作介质膜的 MOS 结构 研究了温度从 100~450K 电子从 Si 界面积累层 F-N 隧穿超薄 SiO_2 的 I - V 特性及低场传输电流随温度的变化关系 研究表明: 在较低的温度下, 电流与温度基本无关; 而在较高的温度下, 电流随温度指数增加 为从理论上解释这些实验结果, 认为在 F-N 隧穿电场范围, 电流密度 $J_1 = F^2 \exp(-\beta/F)$, 而在低场范围电流 $J = J_0 + J_2, J_2 = F \exp(-\Phi_2/kT)$. J_0 为低场漏电流 J_1 从实验数据可以求出, 电子从 N 型 Si 100 隧穿超薄 SiO_2 的势垒高度为 3.13eV. 在较高温度下, 因有效隧穿势垒随温度增加而线性地减少, 使隧穿电流指数地增加, 证实了 N 型 Si 半导体费米能级随温度增加而下移的情形 J_2 是较高温度及低场下介质膜中热激活电子从一种孤立态到另一种孤立态的跳跃产生一种欧姆导电特性, 并求得了电子热激活能 Φ_2 约为 0.163eV.

PACC: 7200F, 7200H

1 引言

众所周知, 作为硅半导体器件和集成电路中应用最多的 MOS 结构中的 SiO_2 介质膜是研究得最多和最深入的 随着 VLSI 技术向深亚微米发展, 研究超薄 SiO_2 膜的特性例如电流传输特性与膜的介电常数、抗击穿能力以及器件的性能密切相关 膜的传输电流的温度依赖性可直接影响微米量级集成电路器件的热稳定性 因此研究超薄 SiO_2 传输电流随温度变化关系亦有极为重要的意义

自从 Fowler 和 Nordheim^[1]用一种定量关系解释了电子从金属向真空发射的基本规律后, Murphy 和 Good^[2]说明了 F-N 关系可用来描述依赖于作用电场、温度和界面势垒高度

* 广东省自然科学基金资助研究项目

冯文修 男, 1945 年出生, 副教授, 主要研究方向: 半导体器件及薄膜物理

陈蒲生 男, 1939 年出生, 教授, 主要研究方向: 半导体表面及新型薄膜、敏感器件

1997-06-06 收到, 1997-11-26 定稿

中间体区域中的发射 对 Murphy-Good 理论作某些修改能够被用于电子从金属到介质膜的注入^[3,4] 此后对电子从 Al-SiO₂-Si 结构中的 F-N 隧穿的研究^[5]以及电子从 Si-SiO₂-Al 结构中的 F-N 隧穿的研究^[6]都十分广泛和深入 这些研究工作大都是用更完善的理论来更合理地解释实验的结果 例如已有报道用量子力学模型讨论 n-Si/SiO₂/Poly-Si(*t*) 结构的 *I*-*V* 特性^[7] 近些年来亦已有研究 F-N 电流扩展感生电荷的作用^[8]等深入一层的问题以及用原子力显微术来研究通常 SiO₂ 膜的 F-N 隧穿特性^[9]的报道 Sune 等人^[10]亦已报道了电子在 n-Si 100 /Si(8.5nm)/Poly-Si(*t*) 结构中的 F-N 隧穿特性的温度依赖关系的几组实验结果,并以半经典的量子机理模拟了 F-N 电流与温度函数关系的解释式

本文即以较多的实验数据从不同的角度研究了电子从 n 型 Si 100 -SiO₂(10nm)-Al 结构中 F-N 隧穿 *I*-*V* 特性随温度的变化关系,获得了有效隧穿势垒高度与温度依赖关系的实验数值 同时讨论了低场传输电流随温度的变化关系 并用前人已报道的经典或半经典的理论对实验结果作了定量关系的理论分析,得到理论与实践相一致的结果 这些在文献[10]中未见有报道

2 实验

N 型 Si 100 单晶片(ρ 约为 $5\Omega \cdot \text{cm}$)经化学清洗腐蚀后,用高纯干 O₂ 热氧化生长 10nm 超薄 SiO₂ 膜,氧化温度为 900 ,时间为 30min 膜厚用椭圆偏振光测厚仪测量,晶片背面用稀 HF 溶液去除氧化层,然后正反面分别蒸铝,正面用常规光刻方法刻出直径为 0.04cm 圆形铝电极 最后 MOS 结构用 N₂ 气氛保护退火

MOS 样品被密封在一个由探针电极接触的恒温加热系统中 电极引线连接在由电脑自动控制测量的 HP4145B 型半导体参数测试仪输入端 系统不断地被抽真空,同时用液氮使系统冷却到小于几十 K 的低温后,用电脑自动控制其上升温度和测试点的恒温温度 从 100K 开始测量样品的 *I*-*V* 特性,每隔 50K 测量一次,直到 450K 测量的实验数据被自动地记录在测试仪的控制电脑软盘上 然后用电脑处理有关实验数据并作图

3 结果与讨论

图 1 示出了 100K、200K、300K 和 400K 温度下的 F-N 隧穿电流随电场的变化关系 图 2 示出了 150~ 450K 低场传输电流随电场的变化关系 从图 1 和图 2 可见,F-N 隧穿超薄 SiO₂ 膜的起始电场接近 $7\text{MV}/\text{cm}$,而且近似与温度无关 从图 1 可见,随着温度升高 *J*-*F* 特性上移,在 100~ 200K 移开距离很少,而 200~ 400K 移开距离比较宽,且近似为等距的,这说明低温时隧穿电流随温度增加不明显,而在较高温度则比较明显,且近似为指数变化关系 当电场低于 $7\text{MV}/\text{cm}$ 时,传输电流随温度也有类同的变化关系(见图 2).

图 3 示出了典型隧穿电场下电流随温度的变化关系 图 4 示出了典型低电场传输电流随温度的变化关系 从两图均可以看到,当温度低于 250K 时,电流随温度的增加是很缓慢的,当高于此温度时,电流随温度增加变得较快,且近似为指数上升的趋势 两图不同的是,图 3 每条曲线之间电流间隔较大,且是等距的,说明 F-N 隧穿电流随电场增加很快,且是指

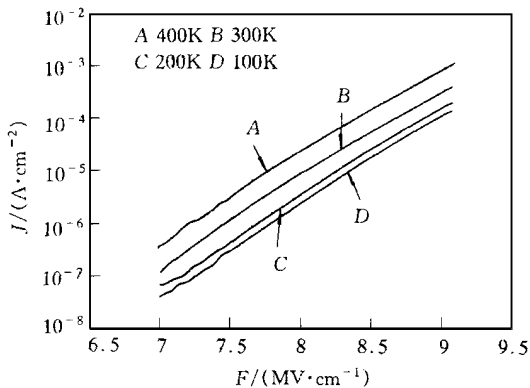


图 1 不同温度下, 隧穿电流随电场的变化关系

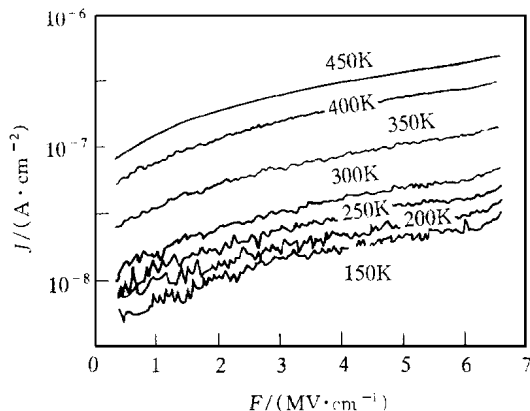


图 2 不同温度下低场传输电流随电场的变化关系

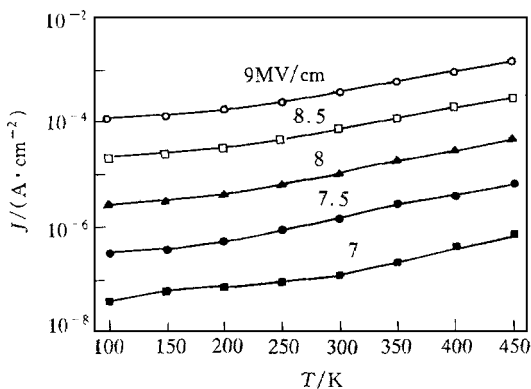


图 3 典型电场下隧穿电流随温度的变化关系

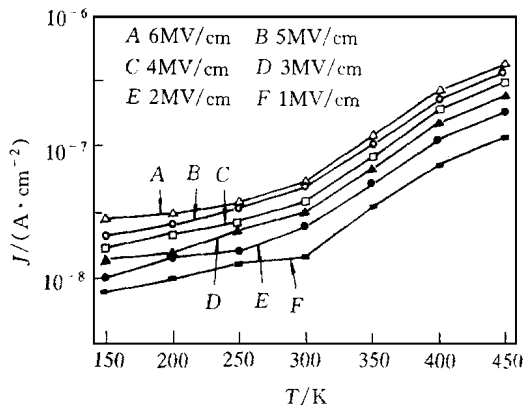


图 4 典型低电场传输电流随温度的变化关系

数地增加的 图 4 曲线之间的电流间隔很少, 说明低场传输电流随电场的变化缓慢, 电场从 1MV/cm 增加到 6MV/cm, 电流增加约一个数量级 另一点不同的是较高温度时隧穿电流随温度的增加没有低场时的传输电流增加那么快 这些实验结果与文献[10]已报道的有类似的变化规律性

4 理论分析

Krieger 和 Swanson^[6]用如图 5 所示的模型已经较详细地从理论和实验上研究了电子从 100 晶向硅到热生长 SiO₂ 的 F-N 隧穿 尽管他们的分析考虑了诸因素, 但分析并不简单, 结论也较为复杂, 不便於分析本文的实验结果

Weinberg^[11]在总结前人的理论和实验工作时指出: 从 N-Si 100 隧穿 SiO₂ 膜(如图 5 所示)在一个很大的范围内极好地符合电子从金属电极隧穿 SiO₂ 的经典 F-N 隧穿公式^[12]:

$$J = CF^2 e^{-\beta/F} \tag{1}$$

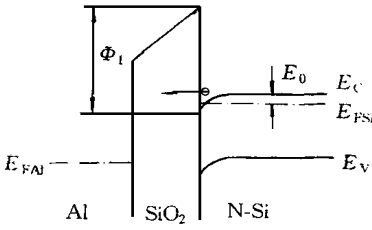


图 5 电子从 Si 100 堆积层隧穿 SiO₂ 热垒模型

$$C = \frac{q^3 m_0}{16\pi^2 \hbar m_{ox} \Phi} \tag{2}$$

$$\beta = \frac{4}{3} \left(\frac{(2m_{ox})^{1/2}}{q\hbar} \right) \Phi^{3/2} \tag{3}$$

式中 q 为电子电荷, m_0 和 m_{ox} 分别为真空中自由电子质量和氧化物中电子有效质量; Φ 为隧穿势垒高度; $2\pi\hbar$ 为普朗克常数; F 表示电场强度 W enberg 在忽略了镜像势能的影响之后, 用更为简便的方法分析了处于 n 能态的每一个电子从 100 晶向 Si 隧穿 SiO₂ 时的传输几率为:

$$Q = \left[\frac{2}{Z_n^{3/2}} \left(1 + \frac{m_{ox}}{m_{Si}} \times \frac{E_n}{\Phi_1} \right)^{-1} \left(\frac{m_{ox}}{m_{Si}} \times \frac{E_n}{\Phi_1} \right)^{1/2} \right] \times \frac{E_n}{\hbar} e^{-\beta(E_n)/F} \tag{4}$$

式中 Z_n 是 Airy 函数(起点有 $Z_0 = 2.34$); m_{Si} 为电子在 Si 中法向于内表面时的有效质量; Φ_1 表示电子从 Si 100 隧穿 SiO₂ 时的有效隧穿势垒高度; E_n 是所有导带底附近的每一个电子法向地运动到内表面时的动量 E_n 与电场的关系为:

$$E_n = \frac{Z_n}{2^{1/3}} \left(\frac{q\hbar}{m_{Si}^{1/2} F_{Si}} \right)^{2/3} \tag{5}$$

即 F-N 隧穿电流表示为:

$$J_1 = qONQ \tag{6}$$

式中 N_i 为运动到界面单位面积电子数, ON_i 表示位于能量最低的导带底部电子数

将(4)、(5)式代入(6)式并利用: $ON_i = \left(\frac{q\epsilon_x \epsilon_0}{q} \right) F$ 以及 $F_{Si} = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_{Si}} F$ 可以得到:

$$J_1 = C_1 F^2 e^{-\beta(E_0)/F} \tag{7}$$

$$C_1 = O \frac{\epsilon_x^2 \epsilon_0}{\epsilon_{Si}} \left(1 + \frac{m_{ox}}{m_{Si}} \frac{E_0}{\Phi_1} \right)^{-1} \left(\frac{2q^2 m_{ox}}{m_{Si}^2 \Phi_1} \right)^{1/2} \tag{8}$$

$$\beta(E_0) = \frac{4}{3} \left(\frac{(2m_{ox})^{1/2}}{q\hbar} \right) \Phi_1^{3/2}; (\Phi_1 = \Phi - E_0) \tag{9}$$

式中 ϵ_0 表示自由真空介电常数; ϵ_x 和 ϵ_{Si} 表示氧化物和 Si 相对介电常数; Φ 表示电子从 100 硅隧穿 SiO₂ 时的势垒高度 当 $T = 300K$ 时, 对 ρ 为 $5\Omega \cdot cm$ 的 N-Si 100 取 $E_0 = 0.2eV$, $O = 0.63$, $\epsilon_x = 3.9$, $\epsilon_{Si} = 11.7$, $m_{Si} = 0.916m_0$, $m_{ox} = 0.5m_0$, 求得 $C_1 = 2.82 \times 10^{-6} / \Phi^{1/2} A/V^2$, Φ_1 单位为 eV.

比较(7)式和(1)式可见, 当电子从 N-Si 100 隧穿 SiO₂ 时仍然遵循 F-N 的基本关系 从本文实验数据求 $\ln(J_1/F^2) - 1/F$ 变化关系的斜率 β 随温度的变化, 并由(9)式求出有效隧穿势垒高度 Φ_1 列表 1 中 从表 1 可以看到 Φ_1 随着温度的升高而有降低 当将费米能级看作为能量的起点时, E_0 可由下式决定:

$$E_0 = E_c = E_{FSi} = -kT \ln(AT^{3/2})^{-1} \tag{10}$$

式中 k 为玻尔兹曼常数 ρ 为 $5\Omega \cdot cm$ 的 N-Si 在杂质饱和电离的温度范围, n_0 约为 $10^{16} cm^{-3}$, 取 $\frac{m_{Si}}{m_0} = 0.916$ 即 $A = 0.543K^{-3/2}$, 计算 E_0 的值也列在表 1 中

表 1 不同温度下 $\ln(J_1/F^2) \cdot 1/F$ 变化斜率及有效隧穿势垒高度 Φ_1 和理论计算的 E_0 数值

T/k	100	150	200	250	300	350	400	450
$\beta(\times 10^8 \text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$	2 507	2 499	2 495	2 477	2 419	2 364	2 324	2 295
Φ_1/eV	2 998	2 991	2 989	2 974	2 927	2 883	2 854	2 829
E_0/eV	0 055	0 090	0 127	0 166	0 206	0 248	0 290	0 333

室温时的 $E_0 = 0.206 \text{eV}$, 即实际的隧穿势垒高度 Φ_1 约为 3.13eV , 是不随温度而改变的。由此可见在 200K 以上 E_0 随温度的改变与实验结果是基本一致的, 证实了 E_0 随温度增加是 N-Si 费米能级下移 (实质上是电子动量的增加) 的结果, 从而使有效隧穿势垒高度近为线性地降低, 使在较高的温度隧穿电流随温度指数地增加。将表 1 实验值代入 (7) 式从理论上计算出的曲线与实验曲线符合得较好。如图 6 所示。

图 6 同时给出了低场范围 (小于 6MV/cm) 传输电流随温度的变化关系。由图可见, 电场改变对电流的改变并不明显, 近似为一种欧姆特性。低温时电流基本与温度无关, 在较高的温度下, 电流随温度指数地增加。为了解释实验结果, 本文认为低场传输电流主要由两部份组成。其一是电场作用下流经介质膜的基础漏电流 J_0 , 与膜的质量、厚度、测量的环境气氛等因素有关。这可能是低激活能的离子导电, (如碱金属离子沾污等)。基础漏电流决定了薄膜的电阻率。本文实验用的 10nm SiO_2 膜, 电阻率由基础电流计算约为 $2 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$, 比普通体 SiO_2 的电阻率低约 1~2 个数量级。由此求作 6MV/cm 时的 J_0 曲线如图 6 虚线所示。其二是由于热生长的 SiO_2 引入有杂质、空位、缺陷及离子等都可能带有电荷, 这些电荷可以在热激发后, 在电场作用下产生从一个孤立态到另一个孤立态的跳跃, 而引至电流传输。这个过程也给出一种欧姆定律的 $I-V$ 特性。设这些带电粒子被激活时所需要的平均能量为 Φ_2 , 电场作用下产生的电流可用下式表示^[13]:

$$J_2 = C_2 F e^{-\Phi_2/kT} \tag{11}$$

由实验结果求作 $\ln J_2 \sim 1/T$ 变化斜率可得 Φ_2 约为 0.163eV 以及 C_2 约为 $4.3 \times 10^{-12} \text{A/V} \cdot \text{cm}$ 。再用这些实验结果代入 (11) 式作 6MV/cm 时理论曲线如图 6 虚线所示, 并与高温端实验曲线相符。从图 6 明显看到, 低场时传输超薄 SiO_2 膜的总电流可以写为:

$$J = J_0 + J_2 \tag{12}$$

当温度较低时主要由 J_0 来决定; 而当温度较高时主要由 J_2 来决定, 并展示了电流随温度指数增加的变化关系。这样便解释了实验的结果。

对质量较好的 SiO_2 介质膜在高温高场可观察到膜中陷阱电子的被陷——发射效

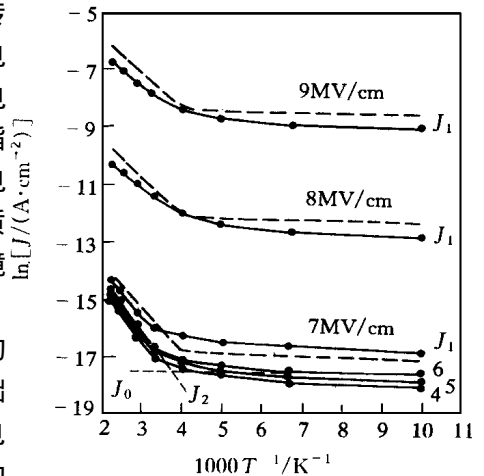


图 6 典型电场下电流随温度倒数变化关系 (实线表示实验曲线, 虚线表示理论曲线)

应^[14]. 这种效应产生的电流随温度变化的斜率比较大, 本文的实验结果中未见到此现象. 这说明超薄的 SiO_2 膜中 Poole-Frenkel 效应是不明显的.

5 结 论

介质膜的电流传输机理是较为复杂的, 但在不同的情况下总有其起主导作用的传输机构. 本文研究得到在以超薄 SiO_2 为介质膜的 $\text{Si-SiO}_2\text{-Al}$ 结构中的电流传输机理: 在隧穿电场下主要是电子从 N-Si 积累层隧穿超薄 SiO_2 的 F-N 隧穿电流; 在低场下主要是超薄介质膜中跳跃式导电和基础漏电流相结合的结果. 在较低的温度下电流受温度的影响较小. 而在较高的温度下电流随温度指数增加, 这是由于高场时有效隧穿势垒随温度升高而降低致使隧穿电流指数地增加; 而低场时则是跳跃式导电随温度也指数地增加. 从实验的数据求得了电子从 N-Si 隧穿超薄 SiO_2 的势垒高度约为 3.13eV . 膜中带电粒子的热激活能约为 0.163eV . 并经分析 F-N 实验证实了 N-Si 费米能级随温度下移的情形.

致谢 本研究部份由香港裘槎基金会资助. 在实验研究工作中得到香港中文大学电子工程学系张荣耀博士、诸焕忠、潘志强等技术员的帮助, 谨一同表示感谢.

参 考 文 献

- [1] R. H. Fowler and L. W. Nordheim, Proc. R. Soc. London Ser., 1928, **A119**, 173.
- [2] L. E. Murphy and R. H. Good, Jr., Phys. Rev., 1956, **102**(6): 1464~1473.
- [3] W. Tantraporn, Solid State Electron, 1964, **1**: 81.
- [4] R. M. Hill, Thin Solid Films, 1967, **1**: 39.
- [5] M. Av-Ron, M. Shatzkes, T. H. Distefano and R. A. Gdula, J. Appl. Phys., 1981, **52**(4), 2897~2908.
- [6] G. Krieger and R. M. Swanson, J. Appl. Phys., 1981, **52**(9): 5710~5717.
- [7] J. Sune, P. Olivo and B. Ricco, IEEE Trans. Electron Devices, 1992, **39**(7): 1732~1739.
- [8] H. Yamada and T. Makino, Appl. Phys. Lett., 1991, **59**(17): 2159~2169.
- [9] M. P. Murrell, M. E. Welland, S. T. O'Shea, Appl. Phys. Lett., 1993, **62**(7): 786~788.
- [10] J. Sune, M. Lanzoni and P. Olive, IEEE Trans. Electron Devices, 1993, **40**(5): 1017~1019.
- [11] Z. A. Weinberg, J. Appl. Phys., 1982, **53**(7): 5052~5066.
- [12] M. Lenzlinger and E. H. Snow, J. Appl. Phys., 1969, **40**: 278~283.
- [13] N. F. Mott and W. D. Twose, Advances in Physics, N. F. Mott, Ed. 1961, **10**(38): 107~163 (Taylor & Francis, Ltd., London).
- [14] P. Solomon, J. Appl. Phys., 1977, **40**(9): 3843~3849.

Temperature Dependence of Electron Tunneling and Low Field Transport Current in Ultrathin SiO₂ Films

Feng Wenxiu, Chen Pusheng

(Department of Applied Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Huang Shiping

(Department of Electronic Engineering, The Chinese University of Hong Kong)

Received 6 June 1997, revised manuscript received 26 November 1997

Abstract The MOS structures of 10nm ultrathin SiO₂ dielectric films have been prepared on the N-Si 100 substrate. The I - V characteristics for electrons tunneling ultrathin SiO₂ films from the Si 100 interface accumulation layer and the current transport at lower electric field have been studied at temperatures ranging from 100K to 450K. The experimental results show that at lower temperatures the current bears no relation to temperature and the current increases with temperature at higher temperatures. As a theoretical exposition of the results, it is proposed that in higher field region the F-N tunneling current density $J_1 \propto F^2 \exp(-\beta/F)$ but in lower field region the total current $J = J_0 + J_2$, here J_0 is the low field leakage current and the transport current $J_2 \propto F \exp(-\Phi_2/kT)$. From experimental data we estimate that the barrier height of electrons tunneling ultrathin SiO₂ films is 3.13eV for N-Si 100. At higher temperatures the effective tunneling barrier height decreases linearly when the temperature increases, as a result the tunneling current exponentially increases. The thermal activation energy is about 0.163eV. The hopping of thermally excited electrons from one isolated state to another state forms Ohmic characteristics in the dielectric films at higher temperatures and in lower fields.

PACC: 7200F, 7200H