

硅基异质结 $n\text{-SiO}_x\text{N}_y/n\text{-Si}$ 二极管的 $I\text{-}V$ 特性分析

许铭真[†] 谭长华

(北京大学微电子研究所, 北京 100871)

摘要: $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 是硅上热生长的超薄绝缘 SiO_xN_y 薄膜在电、热应力作用下形成的一种具有双施主型掺杂的宽带隙 ($E_g = 9\text{eV}$) $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 型半导体材料. 随着施加电应力时的环境温度的增加, $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 的形成效率显著增加. 其形成时间的对数 $\ln t$ 随着应力电压、应力环境温度的增加而减小并呈近似的线性关系. $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 中的双施主能级是一种施主型的双缺陷能级, 当电应力引导的施主缺陷密度达到 $1.26 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 时, SiO_xN_y 绝缘薄膜呈现 n 型半导体导电特性. 在 $n\text{-Si}$ 或 $p\text{-Si}$ 衬底上形成的硅基异质结 $n\text{-SiO}_x\text{N}_y/n\text{-Si}$ 或 $n\text{-SiO}_x\text{N}_y/p\text{-Si}$ 二极管的 $I\text{-}V$ 特性具有饱和性质, 在电压大于 1V 的电压区, $I\text{-}V$ 特性可以用 1eV 势垒的 FN 隧道机制来描述. 当衬底 Si 的掺杂增加时, 势垒高度下降.

关键词: 硅基 $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 宽带隙半导体薄膜; 硅基异质结二极管; FN 隧道导电机制

PACC: 7340L; 7360J; 7340G **EEACC:** 2520M

中图分类号: TN304.2⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0369-03

1 引言

硅上热生长的超薄绝缘 SiO_xN_y 薄膜在电应力或温度应力作用一定时间以后, 由于氧相关施主缺陷掺杂导致绝缘 SiO_xN_y 薄膜转变为一种宽带隙半导体薄膜材料. 这种材料的载流子运输机制已被广泛研究^[1-4]. 其导电机理可以用二极管 $I\text{-}V$ 特性表征^[3-8], 也有用 $I\text{-}V^{-1}$ 表征^[1,2]. 至今, 这种材料的导电性的描述尚缺少模型. 本文提出硅基 $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 异质结模型, 并在此基础上研究了 $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 薄膜材料的类 FN 隧道导电性质.

2 宽带隙 $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 半导体薄膜材料的形成

硅基超薄绝缘 SiO_xN_y 薄膜在电应力或温度应力作用下, 几个缺陷产生模型已被提出^[9-11]. 近来基于变频光泵效应的低电应力下缺陷产生机制 (APCE)^[12-14] 指出: 当氧相关的缺陷密度达到 $1.26 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 时, 在 SiO_xN_y 薄膜内形成两个类施主缺陷能级 0.92 和 2eV . 当邻近缺陷的电子波函数交迭时, 俘获的电子将隧穿缺陷势垒形成缺陷带导电, 形成宽带隙 ($E_g = 9\text{eV}$) $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 半导体薄膜材料. 对于这两个能级, 根据 Mott 理论^[15], 可以计算出导电的缺陷带宽度分别为 47 和 2meV .

3 硅基异质结 $n\text{-SiO}_x\text{N}_y/n\text{-Si}$ 平衡能带图

图 1 给出包含两个深陷阱能级 (0.92 和 2eV) 的宽带隙材料 $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 与 $n^+\text{-Si}$ 形成的同性异质结平衡能带图、电荷和电场分布图.

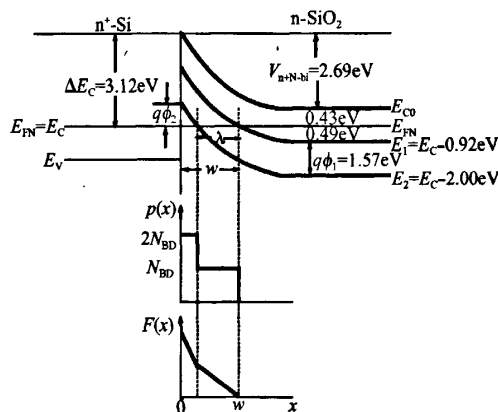


图 1 同性异质结平衡能带、电荷和电场分布图

Fig. 1 Energy band, charge, and field diagrams for an ideal isotype heterojunction

当 SiO_xN_y 薄膜内产生两种类施主缺陷时, 具

[†] 通信作者. Email: mxu@pku.edu.cn

2006-12-31 收到

有半导体导电特性的 n-SiO_xN_y 薄膜的费米能级可以从电中性条件得到,

$$E_{FN} = \frac{E_C + E_1}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_1}{2N_C}\right) \quad (1)$$

其中 $E_1 = E_C - 0.92\text{eV}$; $N_1 = N_{BD} = 1.26 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$; $N_C = 8.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ($m_e/m_0 = 0.5$, $T = 300\text{K}$), 所以 $E_{FN} \cong E_C - 0.435\text{eV}$. 于是, n⁺-Si/n-SiO_xN_y 异质结势垒电位 $qV_{n^+N-bi} = \Delta E_C - E_{FN} = (3.12 - 0.43)\text{eV} = 2.69\text{eV}$. 对于零偏置, 平衡态异质结宽度 W 和空间电荷区宽度 λ 与平衡态结电位 V_{n^+N-bi} 之间的关系满足泊松方程,

$$2\epsilon_{ox} V_{n^+N-bi} / qN_{BD} = 2W^2 - 2W\lambda + \lambda^2 \quad (2)$$

求解(2)式得到 W

$$W = \lambda \left[1 + \sqrt{1 + 2\left(\frac{V_{n^+N-bi}}{\phi_t} - 1\right)} \right] \quad (3)$$

其中 λ 可由耗尽近似^[16]得到

$$\lambda = [2\epsilon_{ox}\phi_t / qN_{BD}]^{1/2} \quad (4)$$

其中 $q\phi_t = E_{FN} - E_2 = 1.57\text{eV}$. 当 $N_{BD} = 1.26 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 时, 可得到 $\lambda = 2.32\text{nm}$, $W = 2.94\text{nm}$ ($W - \lambda = 0.62\text{nm}$).

4 宽带隙 n-SiO_xN_y 半导体材料的缺陷带导电以及类 FN 隧道导电机制

从图 1 可以知道 n⁺-Si/n-SiO_xN_y 界面势垒已由 Si/SiO₂ 界面的矩型势垒变为 n⁺-Si/n-SiO_xN_y 界面的三角势垒. 导致了类 FN 隧道导电机制的形成. 3 个 FN 电流分量是:

(1) 电子隧穿从 n⁺-Si 到 n-SiO_xN_y 导带, 其势垒 $q\phi_0 = 3.025\text{eV}$ (考虑了 n-Si/n-SiO_xN_y 界面的量子效应^[17]).

(2) 电子隧穿从 n⁺-Si 到 n-SiO_xN_y 的第一缺陷带, 其势垒 $q\phi_1 = q\phi_0 - E_1 = (3.025 - 0.92)\text{eV} = 2.105\text{eV}$;

(3) 电子隧穿从 n⁺-Si 到 n-SiO_xN_y 的第二缺陷带, 其势垒 $q\phi_2 = q\phi_0 - E_2 = (3.025 - 2)\text{eV} = 1.025\text{eV}$; 总的 FN 电流可用下式描述

$$J = \sum_{i=0}^2 A_i F_c^2 \exp\left(-\frac{B_i}{F_c}\right) \quad (5)$$

其中 F_c 是阴极电场; $A_i = 1.54 \times 10^{-6} \left(\frac{m}{m_x}\right) \frac{1}{q\phi_i}$;

$B_i = 6.83 \times 10^7 \left(\frac{m_x}{m}\right)^{\frac{1}{2}} (q\phi)^{\frac{3}{2}}$, m 和 m_x 分别是电子在真空和 n-SiO_xN_y 中的有效质量, $q\phi_i$ 是对应于 $\frac{m_x}{m} = 0.5$ 的势垒高度^[12], 并且 $q\phi_0 = 3.025\text{eV}$, $q\phi_1$

$= 2.105\text{eV}$, $q\phi_2 = 1\text{eV}$. 可以计算出 $A_0 = 1.02 \times 10^{-6} \text{A/V}^2$, $A_1 = 1.46 \times 10^{-6} \text{A/V}^2$, $A_2 = 3.08 \times 10^{-6} \text{A/V}^2$, $B_0 = 254\text{MV/cm}$, $B_1 = 147\text{MV/cm}$, $B_2 = 50.1\text{MV/cm}$, 很明显第二缺陷带的隧穿电流是主要的. 于是有

$$J \approx J_2 = A_2 F_c^2 \exp\left(-\frac{B_2}{F_c}\right) \quad (6)$$

5 结果与讨论

图 2(a) 和 (b) 给出 SiO_xN_y 薄膜由绝缘体变为宽带隙半导体材料的临界时间 $\ln t$ 与应力电压、应力温度之间的关系.

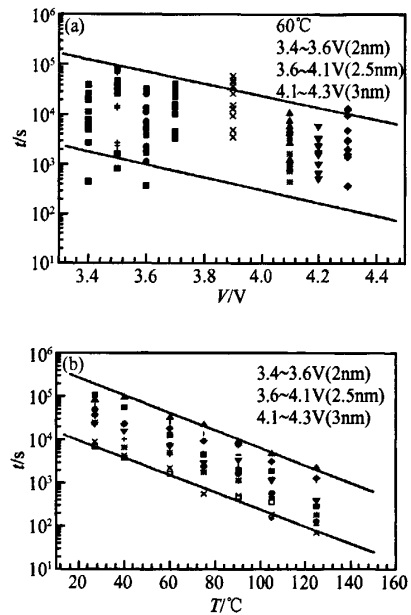


图 2 SiO_xN_y 薄膜由绝缘体变为宽带隙半导体材料的临界时间与应力电压、应力温度之间的关系

Fig. 2 Critical conversion time as a function of both stressing voltage and stressing temperature for SiO_xN_y converting from insulator film to wide band gap semiconductor film

图 3 给出 n⁺-Si/n-SiO_xN_y 和 p-Si/n-SiO_xN_y 二极管的 $J-F$ 和 $\ln(J/F^2) - 1/F$ 之间的关系 (其中 J 是电流密度, F 是电场).

由图 3 得到 n⁺-Si/n-SiO_xN_y 和 p-Si/n-SiO_xN_y 的 FN 隧道 B 因子分别是 39.6 和 50MV/cm, 相应的界面势垒是 0.88 和 1.03eV. 所以, 高掺杂的 n⁺-Si/n-SiO_xN_y 界面势垒低于 p-Si/n-SiO_xN_y 的界面势垒.

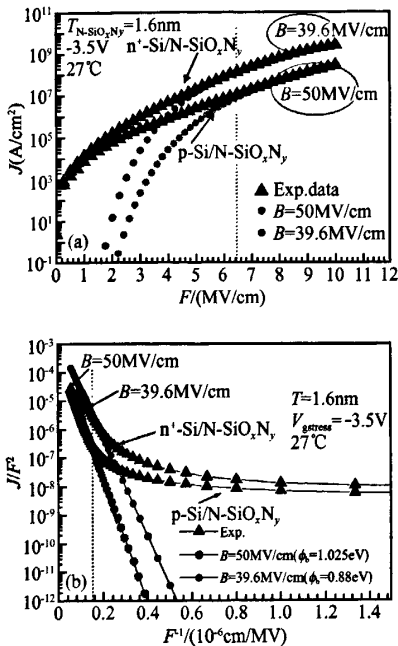


图3 $n^+\text{-Si}/n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 和 $p\text{-Si}/n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ 二极管的 $J\text{-}F$ 和 $J/F^2\text{-}1/F$ 关系

Fig.3 J versus F and J/F^2 versus $1/F$ plots of both $n^+\text{-Si}/n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ and $p\text{-Si}/n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ diodes

参考文献

- [1] Farmer K R, Saletti R, Buhrman R A. Current fluctuations and silicon oxide wear-out in metal-oxide-semiconductor tunnel diodes. *Appl Phys Lett*, 1988, 52(20): 1749
- [2] Fukuda H, Yasuda M, Iwabuchi T. Oxide wearout phenomena of ultrathin SiO_2 film during high-field stress. *Electron Lett*, 1992, 28(16): 1516
- [3] Lee S H, Cho B J, Kim J C, et al. Quasi-breakdown of ultrathin gate oxide under high field stress. *IEDM Tech Dig*, 1994, 605
- [4] Okada K, Kawasaki S, Hirofuji Y. New experimental findings on stress induced leakage current of ultra thin silicon dioxides. *Ext Abst SSDM*, 1994: 565
- [5] Okada K, Taniguchi K. Electrical stress-induced variable range hopping conduction in ultrathin silicon dioxides. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(3): 351
- [6] Houssa M, Nigam T, Mertens P W, et al. Softbreakdown in ultrathin gate oxides; correction with the percolation theory of nonlinear conductors. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(4): 514
- [7] Miranda E, Suñé J. Analytic modeling of leakage current through multiple breakdown paths in SiO_2 films. *Int Rel Phys Sym Proceedings*, 2001: 367
- [8] Nigam T, Martin S, Abusch-Magder D. Temperature dependence and conduction mechanism after analog soft breakdown. *Int Rel Phys Proceedings*, 2003: 417
- [9] DiMaria D J, Stasiak J W. Trap creation in silicon dioxide produced by hot electrons. *J Appl Phys*, 1989, 65(6): 2342
- [10] Schuegraf K F, Hu C. Hole injection SiO_2 breakdown model for very low voltage lifetime extrapolation. *IEEE Trans Electron Devices*, 1994, 41(5): 761
- [11] McPherson J W, Reddy V K, Mogul H C. Field-enhanced Si-Si bond-breakage mechanism for time-dependent dielectric breakdown in thin-film SiO_2 dielectrics. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(8): 1101
- [12] Xu M Z, Tan C H. Low field stress induced double donor defect in metal oxide silicon structures. *Solid State Commun*, 2003, 128(6/7): 279
- [13] Xu M Z, Tan C H, Li M F. Extended Arrhenius law of time-to-breakdown of ultrathin gate oxides. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(15): 2482
- [14] Xu M Z, Tan C H, Mao L F. The double level calculation of oxygen related donor states in Si and SiO_2 . *Solid State Commun*, 2001, 117(6): 365
- [15] Mott N F, Davis E A. *Electronic processes in non-crystalline materials*. Oxford, Clarendon Press, 1979, chapter 2
- [16] Rhoderick E H. *Metal-Semiconductor contacts*. Oxford, Clarendon Press, 1978
- [17] Olivo P, Suñé J, Ricco B. Determination of the Si- SiO_2 barrier height from the Fowler-Nordheim plot. *IEEE Electron Device Lett*, 1991, 12(11): 620

Current-Voltage Characteristics of $n\text{-SiO}_x\text{N}_y/n\text{-Si}$ Heterojunction Diode Grown on Silicon

Xu Mingzhen[†] and Tan Changhua

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

Abstract: $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ is an n-type wide-gap ($E_g = 9\text{eV}$) semiconductor material with double donor doping which was formed by using voltage and/or temperature stressing on insulation SiO_xN_y thin film and the insulator becomes semi-conductor when donor-like defect density reaches to $1.26 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ and double donor-like energy levels coexist in $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$. The current-voltage characteristics can be described satisfactorily in terms of Fowler-Nordheim(F-N) tunneling current mechanism over the voltage range of much greater than 1V, and the barrier height decreases with increasing doping concentration.

Key words: $n\text{-SiO}_x\text{N}_y$ wide-gap semiconductor thin film grown on silicon; heterojunction diode grown on silicon; F-N tunneling conduction mechanism

PACC: 7340L; 7360J; 7340G **EEACC:** 2520M

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0369-03

[†] Corresponding author. Email: mxu@pku.edu.cn

Received 31 December 2006