

等离子体氧轰击硅生成缺陷的研究

王放平 徐建国 孙恒慧

(复旦大学物理系)

1986年5月12日收到

提 要

本文对等离子体氧轰击硅产生的缺陷进行了研究。发现等离子体氧轰击在硅中引入两个缺陷 $E_1(E_c - 0.46\text{eV})$ 及 $E_2(E_c - 0.04\text{eV})$ 。测量了缺陷的光电离截面谱,分析表明,缺陷 E_2 的电子声子相互作用很强,其 Frank-Condon 移动达 0.76eV , 缺陷 E_1 的电子声子相互作用较小,其 Frank-Condon 移动为 0.04eV 。由实验结果得到与缺陷 E_1 、 E_2 相耦合的声子模分别为 $\hbar\omega_p^{(1)} = 28\text{meV}$, $\hbar\omega_p^{(2)} = 20\text{meV}$ 。

一、引 言

在集成电路的制造工艺中,等离子体去胶是一个重要的环节。这一过程在样品中引入缺陷的性质以及缺陷对器件性能的影响,目前未见报道。本文用深能级瞬态谱(DLTS)^[1]及深能级光学谱(DLOS)^[2]对硅中等离子体氧轰击产生的缺陷作了较详细的研究。实验所用样品为 $50\Omega\cdot\text{cm}$ 的 n/n^+ 硅外延片,背面蒸铝合金形成欧姆接触,留下一小块未蒸铝的地方以供光照用。正面经等离子体氧轰击半小时左右,然后蒸金,形成肖特基结。

二、缺陷的电学性质

测量了样品的 DLTS 曲线如图 1 所示。可以看到,曲线主要由一大峰组成。对此峰测量了它的峰位所对应的温度 T 与锁相频率 f 的关系(电子发射率 e_n 与 f 成正比),得到图 2 的直线,由此得到缺陷 E_1 的能级位置为 $E_c - 0.46\text{eV}$, 俘获截面 $\sigma_{n1} = 1.7 \times 10^{-17}\text{cm}^2$ 。还可以看到,此峰的低温侧较高温侧为胖,这说明样品中存在不止一个缺陷。

为了对 DLTS 曲线中低温侧较平缓作定量的解释,假设样品中存在两个缺陷,而对 DLTS 曲线进行拟合,调节这两缺陷的参数,得到的最佳拟合结果如图 1,相应的参数为: $E_{T1} = 0.46\text{eV}$, $\sigma_{n1} = 4 \times 10^{-17}\text{cm}^2$, $E_{T2} = 0.04\text{eV}$, $\sigma_{n2} = 6 \times 10^{-25}\text{cm}^2$ 。可以看到, E_1 缺陷的参数与图 2 的结果较一致。缺陷 E_2 的俘获截面很小,表明这缺陷的性质较为特殊。

改变 DLTS 的注入脉冲高度 V_p , 观察 DLTS 信号大小的变化,发现当 $V_p < V_R - 0.5\text{V}$ 时(V_R 为反偏电压), DLTS 信号很小,表明缺陷分布在很靠近表面的地方。

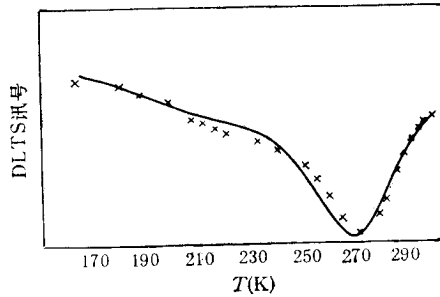
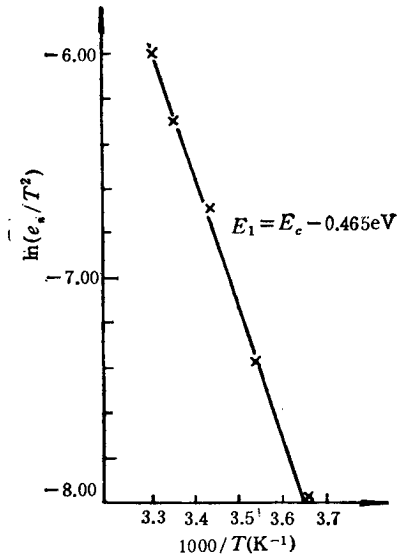


图1 DLTS 曲线

×为实验点；——为理论拟合； $f = 10\text{Hz}$ ； $V_R = 3\text{V}$

图2 E_1 的能级位置

三、缺陷的光学性质

为了深入研究样品中缺陷的物理性质，用 DLOS 方法测量了样品的光电离截面谱。DLOS 测试用的样品架的控温范围为 10—400 K，控制精度可达 0.02 K。测量时，先用电脉冲将样品的深中心注满电子，然后在暗场中等约半小时，再测量光照将电子由深中心激发到导带而引起的结电容变化。电子的光电离截面 σ_n^0 是由光电容变化初始部分的斜率和入射光强决定的。入射光强由热释电探头测量。由于测量得到的光强是相对值，得到的光电离截面谱 $\sigma_n^0(h\nu)$ 也是相对的，故 σ_n^0 的单位为任意单位。

测得的光电离截面谱如图 3。从图 3 明显看出，在光子能量为 0.5 eV 和 0.9 eV 附近有两个峰，低能峰较尖锐，高能峰则较平坦。可以看到，高能端的小峰的峰高随温度的升高而逐渐变小，这是由于存在电子声子相互作用，在高温下声子的影响使谱线展宽变得平坦。此小峰可能对应于缺陷从基态到激发态的跃迁。由前面分析可知样品中存在两个缺陷，因此认为图 4 的两个峰分别由 E_1 ， E_2 引起。由于峰位在能量上分离较大，可以认为它们各自产生的光电离截面谱在峰位附近不产生重叠。据此，采用了修正的 Lucovsky 模型^[2]对光子能量为

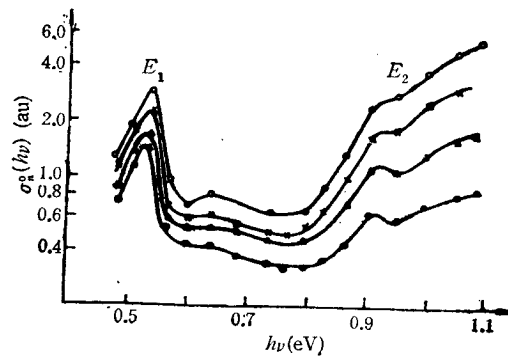


图3 缺陷的光电离截面谱温度

- 46.5K;
- ▲——55.7K;
- ×——66.3K;
- 75.7K

0.5 eV 和 0.9 eV 附近的光电离截面谱分别进行拟合, 这时, 电子由缺陷态到导带的跃迁几率 $\sigma_{il}^o(h\nu)$ 为

$$\sigma_{il}^o(h\nu) \propto \frac{1}{h\nu} \cdot \frac{(h\nu - E^o)^{\alpha + \frac{1}{2}}}{[1 + (h\nu - E^o)/E_B]^{2\beta}}, \quad (1)$$

式中 $\alpha = \begin{cases} 0 & \text{许可跃迁} \\ 1 & \text{禁戒跃迁} \end{cases}$, $\beta = \begin{cases} 1 & \text{Dirac-}\delta \text{ 势} \\ 2 & \text{库仑势,} \end{cases}$

$$E_B = \frac{\hbar^2 a^2}{2m^*} \quad (a \text{ 为波函数扩展长度的倒数}).$$

如无电子声子相互作用, $\sigma_{il}^o(h\nu)$ 就是光电离截面谱, 为考虑缺陷与晶格的耦合, 采用半经典近似^[3]来计算电子光电离截面谱, 此近似在高温强耦合条件下较为适用. 这时, 光阈值能 $E^o = E_T + d_{FC}$, 其中 E_T 是热激活能, d_{FC} 为 Frank-Condon 移动, 它反映缺陷与晶格间的耦合强度. 在半经典近似下, 考虑了电子声子相互作用后光电离截面谱可表示为

$$\sigma_n^o(h\nu) \propto \int \sigma_{il}^o(h\nu) \exp\left[-\frac{(h\nu - E^o - E)^2}{4kTd_{FC}}\right] dE. \quad (2)$$

采用上述模型对实验谱进行拟合后发现, 认为低能峰的光电离截面谱是由缺陷 E_1 引起的, 而高能峰是由缺陷 E_2 引起才能得到较好的拟合结果. 如果将两峰的归属颠倒, 则无法得到合理的结果. 详细拟合表明, 对低能峰的缺陷采用库仑势作为缺陷势, 且缺陷态到导带的跃迁为许可跃迁时, 得到的结果最佳, 如图 4. 得到的最佳参数为: $E_{T1} = 0.46$ eV, $d_{FC1}^o = 0.04$ eV, $E_{B1} = 0.04$ eV. 对高能峰也作了拟合, 发现缺陷势采用 δ 势场, 且跃迁为禁戒时, 得到的结果较好, 如图 5. 得到的最佳参数为: $E_{T2} = 0.05$ eV, $d_{FC2}^o = 0.76$ eV, $E_{B2} = 0.6$ eV. 对图 3 中四个不同温度下的光电离截面谱均作了拟合, 不同温度下得到的上述各参数是一致的.

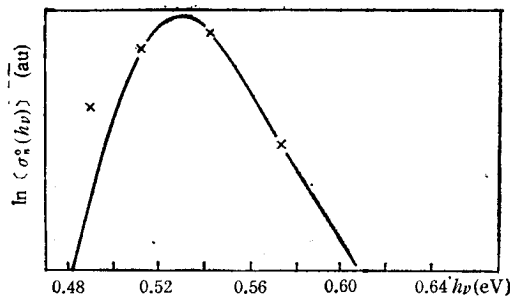


图 4 E_1 光电离截面谱拟合 × 为实验点; — 为理论拟合; $T = 46.5$ K

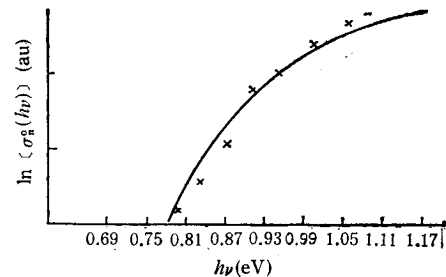


图 5 E_2 光电离截面谱拟合 × 为实验点; — 为理论拟合; $T = 75.7$ K

由 DLTS 和 DLOS 测量结果的联合分析可以看到: 1. 由光电离截面谱拟合得到的能级位置与由 DLTS 拟合得到的结果基本一致, 缺陷 E_2 的能级位置的误差稍大些. 说明样品中确实存在两个缺陷. 2. 缺陷 E_2 的波函数很局域, 而 E_1 的则较扩展, 这可由拟合得到的 E_B 的大小看出, 这反过来也说明拟合时采用的势场是合理的. 3. 光电离截面谱中高

能峰的 Frank-Condon 移动很大, 达 0.76 eV, 说明该缺陷 E_2 与晶格耦合很强, 这在硅中是少见的。

图 3 是四个不同温度下的光电离截面谱, 考虑到低温下与缺陷耦合的声子模较少, 本文采用了单声子模 $\hbar\omega_p$ 耦合假设, 并且认为 $T = 46.5$ K 时声子影响较小. 据此, 在光阈值附近, 将 $T = 56.7$ K, 66.3 K, 75.7 K 的截面和 $T = 46.5$ K 的逐一相减, 然后作 $\ln[\Delta\sigma_n^o(h\nu)] - 100/T$ 图, 得到了几条直线, 如图 6 所示。

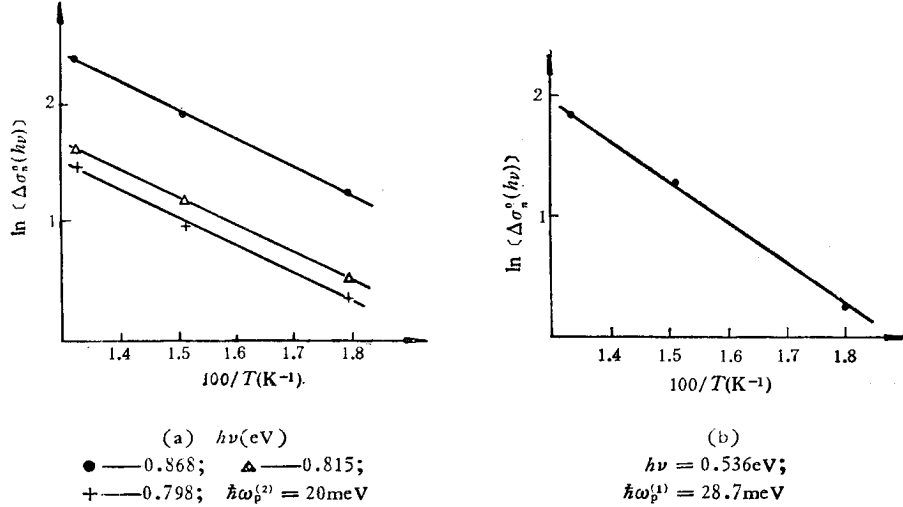


图 6 $\ln[\Delta\sigma_n^o(h\nu)] - 100/T$ 关系

理论分析表明^[4,5], 如声子模单一, 则在低温下

$$\sigma_n^o(h\nu) \propto [1 - \exp(-\hbar\omega_p/kT)]\sigma_{ei}^o(h\nu),$$

$$\Delta\sigma_n^o(h\nu) = \sigma_n^o - \sigma_{T_0}^o \propto \left[\exp\left(-\frac{\hbar\omega_p}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{\hbar\omega_p}{kT_0}\right) \right] \sigma_{ei}^o(h\nu).$$

因而

$$\ln \Delta\sigma_n^o(h\nu) = c(h\nu) - \frac{\hbar\omega_p}{kT} + \ln \left[1 - \exp\left(\frac{\hbar\omega_p}{kT} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right)\right) \right],$$

式中 $c(h\nu)$ 与温度无关。

如果

$$\left| \ln \left[1 - \exp\left(\frac{\hbar\omega_p}{kT} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right)\right) \right] \right| \ll \frac{\hbar\omega_p}{kT}, \quad (3)$$

则

$$\ln \Delta\sigma_n^o(h\nu) = c(h\nu) - \frac{\hbar\omega_p}{kT}. \quad (4)$$

这时, $\ln \Delta\sigma_n^o(h\nu) - 100/T$ 应为直线, 由其斜率可得 $\hbar\omega_p$. 由图 6 得出与 E_1 耦合的声子模 $\hbar\omega_p^{(1)} = 28$ meV, 与 E_2 相耦合的声子模 $\hbar\omega_p^{(2)} = 20$ meV. 由拟合得出的结果估计条件(3)式, 可以看出, 条件(3)式是满足的, 说明所作的近似是合理的. 得出的声子模也是合理的。

四、结 论

本工作表明, 等离子体氧轰击硅将在硅中产生两个缺陷. 它们的能级位置分别为 $E_{T1} = 0.46 \text{ eV}$, $E_{T2} = 0.04 \text{ eV}$. 其中缺陷 E_2 性质较为特殊, 它的俘获截面很小, 同时缺陷与晶格的相互作用很强, 其 Frank-Condon 移动达 0.76 eV , 这在硅中是较为少见的. 缺陷 E_1 的电子声子相互作用较弱, 其 Frank-Condon 移动为 0.04 eV . 变温 DLOS 揭示出, 各有一个声子模与 E_1, E_2 相耦合, 它们分别为 $\hbar\omega_p^{(1)} = 28 \text{ meV}$, $\hbar\omega_p^{(2)} = 20 \text{ meV}$.

参 考 文 献

- [1] D. V. Lang, *J. Appl. Phys.*, **45**(1974), 3014; 3023.
- [2] A. Chantre, G. Vincent, D. Bois, *Phys. Rev.*, **B23** (1981), 5335.
- [3] Huang and Rhys, *Proc. R. Soc.*, **A204** (1950), 406.
- [4] B. Monemar and L. Samuelson, *Phys. Rev.*, **B18**(1978), 809.
- [5] J. Bourgoin, M. Lannoo, Point defects in semiconductor II, p. 99.

STUDY OF THE DEFECTS IN OXYGEN PLASMA IRRADIATED n/n⁺ Si

WANG FANG-PING XU JIAN-GUO SUN HENG-HUI

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

ABSTRACT

The defects in oxygen plasma irradiated Si have been studied. It is found that two kinds of defects E_1 ($E_c - 0.46 \text{ eV}$) and E_2 ($E_c - 0.04 \text{ eV}$) are generated in the sample. The deep level optical spectroscopy reveals that defects E_2 has a strong electron-phonon coupling, its Frank-Condon shift is 0.76 eV . For E_1 , the coupling is weaker, its Frank-Condon shift is 0.04 eV . The analysis shows that the phonon modes coupling to defects E_1 and E_2 is 28.7 meV and 20 meV respectively.