

# 用 DLTS 研究中子嬗变掺杂硅中的 电子陷阱

吴书祥 晏懋洵

(北 京 大 学)

杜光庭 孟祥提

(清 华 大 学)

1981年7月31日收到

## 一、引 言

硅单晶的中子嬗变掺杂(NTD),是硅原子俘获热中子发生 $(n, \gamma)$ 反应而实现嬗变掺磷的。这一核反应过程是 $^{30}\text{Si}(n, \gamma)^{31}\text{Si} \rightarrow ^{31}\text{P} + \beta^- (T_{1/2} = 2.6\text{h})$ 。由于NTD工艺具有掺杂均匀、易于精确控制等优点,日益受到注意。在大功率器件制造中已显示了它的优越性,人们正在研究将其用于制造高质量探测器等。NTD工艺会引入辐照损伤。 $^{30}\text{Si}$ 原子俘获热中子处于激发态,以发射 $\gamma$ -射线形式释放能量时,硅原子受到反冲。反应堆中的快中子和其它高能粒子, $(n, \gamma)$ 反应中的 $\gamma$ -射线和反冲硅原子, $^{31}\text{Si}$ 衰变过程中的 $\beta^-$ 粒子和反冲磷原子等,都会造成辐照损伤。其中快中子损伤是主要的。NTD硅中的辐照损伤是很复杂的,它们对NTD硅电学性能的影响很大,人们对此研究得比较多<sup>[1]</sup>;近几年又开始了用DLTS对NTD硅进行研究<sup>[2]</sup>。NTD硅中的辐照损伤不稳定,退火处理时,其中某些缺陷会消失,也可能由于缺陷与缺陷、缺陷与杂质的相互作用而出现一些新的缺陷。未经退火的NTD硅中,缺陷的浓度通常比嬗变的磷浓度高几个数量级,磷原子也不在电活性位置。因此NTD硅一般都要作退火处理。R. T. Young等认为,NTD硅中的热中子损伤,在400°C退火能够消除;在快中子剂量小于 $5 \times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ 时,在600°C经1—2小时退火,自由载流子浓度和载流子迁移率能基本恢复。这时还有哪些残剩的深中心,是材料和器件工作者十分关心的问题。本文用DLTS研究热中子剂量为 $3.7 \times 10^{17}\text{cm}^{-2}$ 的NTD硅经700°C退火后残剩的电子陷阱。这一辐照剂量下,嬗变磷原子浓度 $\sim 6.3 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ ,这是大功率器件工作者感兴趣的掺杂浓度。这一退火温度对自由载流子浓度和迁移率的恢复来说,已足够高,但可忽略退火过程中的沾污。

## 二、测量装置及原理

我们的DLTS装置,已专门介绍过<sup>[3]</sup>。现在改由M162, M164 Boxcar Averager执行率窗功能。根据D. V. Lang提出的DLTS原理<sup>[4]</sup>测定缺陷的能级,俘获截面和浓度。只是考虑到电子平均热运动速度 $\langle v_s \rangle$ 与导带底能态密度 $N_c$ 的乘积正比于温度的平方,认

为  $\ln\left(\frac{1}{\tau_m T_m^2}\right) \sim \frac{1}{T_m}$  是线性关系.  $\tau_m$  是率窗时间常数,  $T_m$  是 DLTS 峰对应的温度. 本文还通过改变脉冲宽度  $T_p$  对俘获截面直接作了测量.

### 三、样品制备和实验结果

初始材料由 740 厂提供的氩气氛中区熔生长的 N 型硅, 电阻率  $\sim 1400 \Omega\text{-cm}$ . 在清华大学的游泳池式反应堆中辐照, 辐比  $\sim 10$ , 辐照温度  $\sim 30^\circ\text{C}$ , 快中子剂量  $\sim 3.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ . 在热扩散炉中高纯氮气气氛下等时退火一小时. 蒸金形成直径为 1mm 的肖特基二极管.

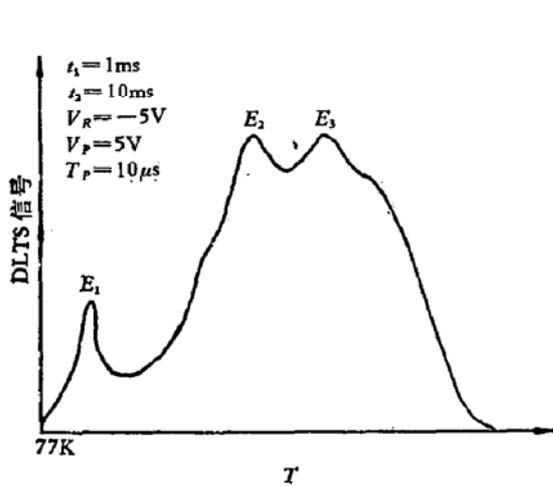


图 1 NTD FZ 硅烷在氮气气氛下, 700°C 退火一小时后典型的 DLTS 谱

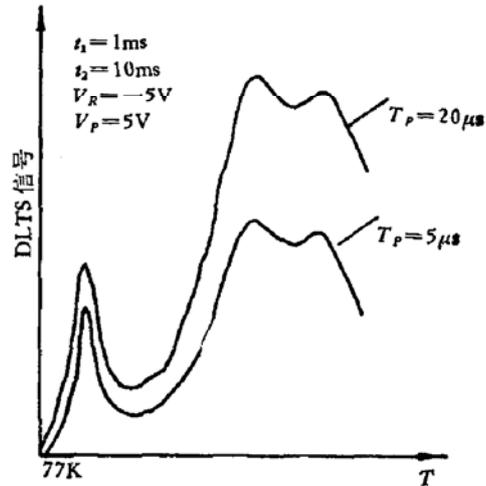


图 2 以脉冲宽度  $T_p$  为参量的典型 DLTS 谱线

700°C 退火样品的典型 DLTS 谱线如图 1 所示. 在  $t_1 = 5, 2, 1, 0.5, 0.3, 0.2\text{ms}$  和  $t_2 = 50, 20, 10, 5, 3, 2\text{ms}$  六个“率窗”下, 测量  $E_1, E_2$  和  $E_3$  峰的移动, 由  $\ln\left(\frac{1}{\tau_m T_m^2}\right) - \frac{1}{T_m}$  曲线的斜率求得相应深中心的  $E_c - E_T$  分别为 0.20、0.37 和 0.48eV. 由其截距求得俘获截面分别为  $7.0 \times 10^{-16}$ 、 $2.4 \times 10^{-16}$  和  $2.0 \times 10^{-15} \text{cm}^2$ .

DLTS 谱线峰高随脉冲宽度变化的典型谱线如图 2 所示. 由文献 [5] 知,

$$\ln \left[ 1 - \frac{\Delta C_0(T_p)}{\Delta C_0(\infty)} \right] = -\sigma_n \langle V_n \rangle N_D T_p,$$

不难证明

$$\frac{\Delta C_0(T_p)}{\Delta C_0(\infty)} = \frac{S_{m \cdot T_p}}{S_{m \cdot \infty}}$$

其中  $S_{m \cdot T_p}$  为脉冲宽度  $T_p$  时的峰高,  $S_{m \cdot \infty}$  为脉冲足够宽、深中心饱和填充时的峰高. 在  $t_1 = 1\text{ms}$ ,  $t_2 = 10\text{ms}$  下, 测定  $T_p$  为 1、5、10、20 和 50  $\mu\text{s}$  时,  $E_1, E_2$  和  $E_3$  峰高, 求得  $E_1, E_2$  和  $E_3$  峰所对应的深中心的俘获截面分别为  $1.5 \times 10^{-16}$ 、 $9.7 \times 10^{-17}$  和  $8.7 \times 10^{-17} \text{cm}^2$ .

用 Model 410 C-V Plotting System 测定样品 C-V 曲线, 求得净浅杂质浓度 ( $N_D - N_A$ )  $\sim 3.1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ , 进而求得  $E_1, E_2$  和  $E_3$  峰对应深中心的浓度  $N_{TT}$  分别为  $1.2 \times 10^{11}$ 、

$2.8 \times 10^{11}$  和  $2.7 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ .

我们还观察了 NTD FZ 硅中的深中心在  $700^\circ\text{C}$  以上的退火行为。三种温度下退火后的 DLTS 谱线如图 3 所示。

#### 四、讨论和结论

1. 在我们的辐照条件下, 按公式 [31P]  $\sim 1.68 \times 10^{-4} \Phi$  计算 ( $\Phi_n$  是热中子剂量), 嬗变磷浓度为  $\sim 6.3 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ , 而由样管 C-V 曲线求得  $(N_D - N_A) \sim 3.1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ . 这表明经  $700^\circ\text{C}$  退火, 自由载流子浓度便基本恢复。

2. 我们的样品经  $700^\circ\text{C}$  退火后, 仍残留三个深中心。可以利用两种方法测定俘获截面。通常认为由  $\ln\left(\frac{1}{\tau_m T_m^2}\right) \sim \frac{1}{T_m}$  曲线确定的俘获截面误差较大, 因  $\sigma_n \langle V_n \rangle N_c$  与温度  $T$  可能不是平方关系; 电场效应也可能严重影响俘获截面。而根据

$$\ln\left[1 - \frac{\Delta C_0(T_p)}{\Delta C_0(\infty)}\right] \sim T_p$$

曲线斜率求得的俘获截面通常认为是比较可靠的。

3. 就现有资料, 还很难对  $E_1$ 、 $E_2$  和  $E_3$  峰所对应的深中心的结构作出判断。从它们在禁带中的位置看, 与文献 [2] 的中等含碳量 NTD FZ 硅的结果基本一致。这从一个侧面表明我们的初始材料含碳量  $\sim 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ;  $0.20 \text{eV}$  的深中心可能与碳杂质有关。

4. 经  $750^\circ\text{C}$  退火,  $E_2$  和  $E_3$  峰消失,  $E_1$  峰高度大大下降, 出现  $E_4$  和  $E_5$  峰。经  $850^\circ\text{C}$  退火,  $E_1$ 、 $E_4$  和  $E_5$  峰有升高的趋势。与  $700^\circ\text{C}$  退火的 DLTS 谱线比较可见,  $E_4$  和  $E_5$  峰是  $E_2$  和  $E_3$  峰的左、右肩,  $700^\circ\text{C}$  下退火时, 它们可能被  $E_2$  和  $E_3$  峰掩盖了。从退火行为看,  $E_4$  和  $E_5$  峰可能对应缺陷和杂质的络合物。

感谢张玉峰同志在实验过程中给予的帮助。

#### 参 考 文 献

- [1] R. T. Young, J. W. Cleland, R. F. Wood, and M. Abraham, *J. Appl. Phys.*, **49**, 4752 (1978).
- [2] J. Guldberg, *J. Phys. D*, **11**, 2043 (1978).
- [3] 杜永昌, 晏懋洵 《物理》 **10**, 109 (1981).
- [4] D. V. Lang, *J. Appl. Phys.*, **45**, 3023 (1974).
- [5] M. Schulz, and N. M. Johnson, *Solid-State Commun.*, **25**, 481 (1978).

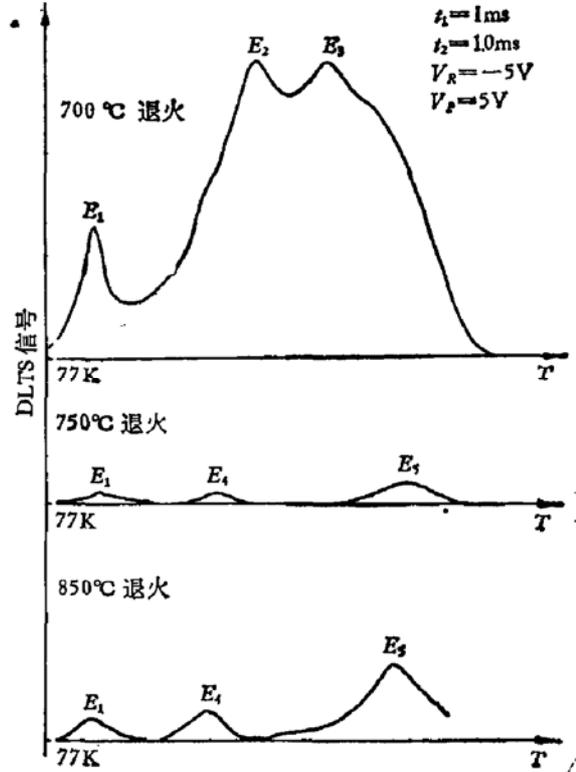


图 3 NTD FZ 硅经  $700^\circ\text{C}$ 、 $750^\circ\text{C}$  和  $850^\circ\text{C}$  等时退火后的 DLTS 谱线

## Study of Electron Traps in Silicon Doped by Neutron Transmutation through DLTS

Wu Shuxiang, Yan Maoxun  
(*Peking University*)

Du Guangting and Meng Xiangti  
(*Qinghua University*)