

研究简报

Si 中注入 Zn 的辐射损伤

殷士端 张敬平 顾 淦 许振嘉

(中国科学院半导体研究所)

刘家瑞 章其初 李大万

(中国科学院物理研究所)

1986年2月22日收到

用高分辨的背散射-沟道效应测量了180及350keV Zn注入Si中的辐射损伤。注入剂量在 1×10^{14} — $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 范围内。实验表明,非晶层和单晶的界面深度 x_{a-c} 随剂量 ϕ 及注入能量 E 的增加而单调地增加。这些参数之间的变化关系符合直接碰撞导致非晶化模型,即每一个注入离子由于级联碰撞使表面局部的小区域非晶化。随着剂量的增加,这些非晶态的小区相互重叠而形成一无定形层。

一、引 言

离子注入晶体与晶格原子碰撞后,将部分能量传递给点阵原子,使其离开平衡位置从而产生损伤。如果被碰撞的原子获得的能量很大,便会引起级联效应,在一定区域内形成相当多的缺陷。损伤随注入离子的增多而加重。当注入剂量超过某一临界值时,晶体的表面可以完全无序化而形成非晶结构。

Si的光相对折射系数与注入剂量的变化关系表明^[1],对相同的材料在同一能量下注入不同种类的杂质,在晶格中形成损伤的机理是不相同的^[2,3]。如重离子注入后,由于传给Si原子相当高的能量,(如一个Sb原子与Si对撞后能传给Si原子约60%的能量)晶格的损伤主要是级联效应。剂量增加,由直接碰撞便能导致晶格的无序。本文将用这种模型定量地分析Si中注Zn所产生的损伤。

二、实验条件和实验结果

本实验所用样品为〈100〉取向的Si片,在室温下注入Zn,流强为 $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$,注入能量为180及350keV,剂量分 1×10^{15} , 5×10^{15} , 1×10^{16} 及 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 四种。背散射-沟道效应实验采用4117型 $2 \times 1.7\text{MV}$ 串列加速器提供的 $^4\text{He}^+$ 作分析束,离子束的能量为2MeV,束流强度为5—10nA,束斑为 $\sim 1 \times 1\text{mm}^2$ 。实验数据由带有PDP-11/34计算机的多道分析系统收集和处理,为了提高深度分辨率,采用比较小的散射角

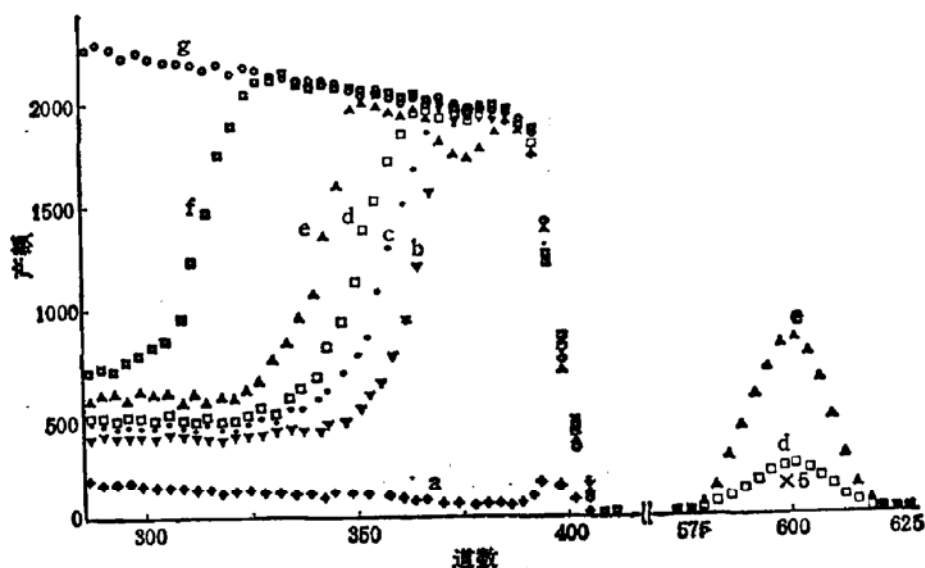


图1 180及350keV, 1×10^{13} — $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 在 Si 中注 Zn 的背散射谱. a——未注入, b——180keV, $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$, c——180keV, $5 \times 10^{13}/\text{cm}^2$, d——180keV, $1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$, e——180keV, $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$, f——350keV, $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$, g——随机谱

$\theta = 115^\circ$, 在此条件下, 深度分辨率 $\sim 60\text{\AA}$.

图1为 Si 中注 Zn 的背散射谱. b. c. d. e. f 是注入 Zn 后的 $\langle 100 \rangle$ 定向谱, 其中 b. c. d. e 的注入能量均为 180keV, 剂量分别对应 1×10^{13} , 5×10^{13} , 1×10^{14} 及 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$. f 是在 350keV 下注入的, 注入剂量为 $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$. 为了便于比较, 图中还列出了完美单晶的 $\langle 100 \rangle$ 定向谱 a 以及 Si 的随机谱 g. 从图1可以看出, 所有注入样品对应 Si 表面的定向谱, 其产额与随机谱相同, 说明在所采用的注入条件下, 表面注入层已完全损伤形成无序层, 其厚度随注入剂量和能量的增大而增厚.

三、分析和讨论

Thompson^[4] 等人的研究工作表明, 重离子注入时, 损伤的形成若采用直接碰撞导致非晶化模型, 实验值与理论值很一致. 根据这个模型, 每一个注入原子通过级联效应能使晶体的某一个局部小区域无序化, 随着剂量的增加, 这些非晶态的小区相互重叠, 最后在注入区构成连续的无定形层. 当注入剂量比较低时 (即 $< 10^{13}/\text{cm}^2$), 损伤总量 N_D 随剂量 φ 的增加而单调地增加, 直到损伤的平均深度 $\bar{x}_D$ 处位移原子的浓度达到饱和值形成非晶态, 然后非晶区域向表面和 Si 衬底内部扩展. 剂量继续增加, 非晶层增厚, 非晶-单晶的界面 x_{A-C} 不断向内推移^[6]. 由于注入原子进入样品后逐渐损失了能量, 因此每个注入原子能够使 Si 原子位移的数目即损伤产生率随样品深度逐渐下降, 这便使 x_{A-C} 向样品内部推进所需增加的剂量随深度而增加. 假设 $N_D^*(x)$ 是距样品表面 x 处单位长度的损伤产生率, 则剂量增加 $d\varphi$ 引起位移原子的增加为:

$$\delta N_D(x) = N_D^*(x) \left(1 - \frac{N_D(x)}{N_s} \right) d\varphi. \quad (1)$$

式中 $N_D(x)$ 是 x 处的损伤密度, N_s 是 Si 的浓度. $1 - \frac{N_D(x)}{N_s}$ 是当剂量为 φ 时在

x 处尚未随机化的部分, 公式 (1) 描述了 x 处损伤的累积。

将 (1) 式积分得到

$$N_D(x) = N_i \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{N_i^*(x)}{N_i} \varphi\right) \right\}. \quad (2)$$

如果非晶-单晶的界面取在 $\frac{N_D(x_{A-C})}{N_i} = 1 - \frac{1}{e} = 0.68$ 处, 则根据 (2) 式得到:

$$\frac{N_i^*(x_{A-C})}{N_i} \varphi = 1. \quad (3)$$

假设在损伤平均射程 $\bar{x}_D$ 处位移原子达到 $\frac{N_D(\bar{x}_D)}{N_i} = 1 - \frac{1}{e} = 0.68$ 的剂量为 φ_0 , 则 $\frac{N_i^*(\bar{x}_D)}{N_i} \varphi_0 = 1$, 于是

$$\frac{N_i^*(x_{A-C})}{N_i^*(\bar{x}_D)} = \frac{\varphi_0}{\varphi}, \quad (4)$$

若采用一级近似, 假设损伤是高斯分布, 则

$$N_i^*(x) = \frac{N_i^*}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x}_D)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (5)$$

式中 σ 为损伤分布的标准偏差。

用 $x = x_{A-C}$ 及 $x = \bar{x}_D$ 分别代入 (5) 式并利用 (4) 式的关系, 得到:

$$x_{A-C} = \bar{x}_D + \sqrt{2} \sigma \left(\ln \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad \text{对 } \varphi > \varphi_0 \quad (6)$$

于是

$$\frac{\varphi}{\varphi_0} = \exp\left(\frac{(x_{A-C} - \bar{x}_D)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (7)$$

因此 $(x_{A-C} - \bar{x}_D)^2$ 随 $\ln \varphi$ 线性变化, 斜率是 $\frac{1}{2\sigma^2}$ 。

按照 Sigmund^[7] 等人的理论, 对于 Si 中注 Zn 的情况, 杂质平均投影射程分布和 Si 的损伤分布之间的近似关系为: $\bar{x}_D \sim 0.83R_F$, $\sigma \sim 1.05\Delta R_F$ 。由图 1 的 Zn 谱得到 Zn 的平均投影射程 $R_F = 980\text{\AA}$, 标准偏差 $\Delta R_F = 380\text{\AA}$ 。于是 $\bar{x}_D = 810\text{\AA}$, $\sigma = 400\text{\AA}$ 。若将 x_{A-C} 取在随机谱谱高的 $\frac{1}{e}$ 处, 则 $(x_{A-C} - \bar{x}_D)^2$ 随 $\ln \varphi$ 的变化关系如图 2 所示, 与将 $\sigma = 400\text{\AA}$ 代入 (7) 式得到的计算直线很一致。这说明在 $10^{15} - 10^{17}/\text{cm}^2$ 剂量范围内损伤层的形成主要是直接碰撞导致非晶化的结果。由图 2 纵座标的截距得出 $\varphi_0 = 2 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 。 φ_0 是 $\bar{x}_D$ 处损伤达到饱和值的 $\frac{1}{e}$ 时所对应的剂量。 φ_0 比 Si 中用注入形成无定形层的剂量阈值 $\varphi_c \sim 1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ ^[8] 为小是合理的。

根据 (3) 式, x_{A-C} 随 $\frac{1}{\varphi}$ 的改变 (图 3) 直接反映损伤率随深度的变化, 即 $N_i^*(x)$ 接近抛物线函数。

对于同一注入剂量, 无定形层的厚度显然随注入能量的增加而增厚。从图 1 的曲线 b

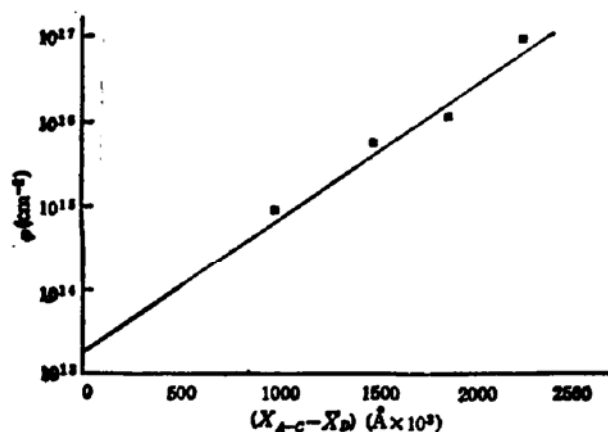
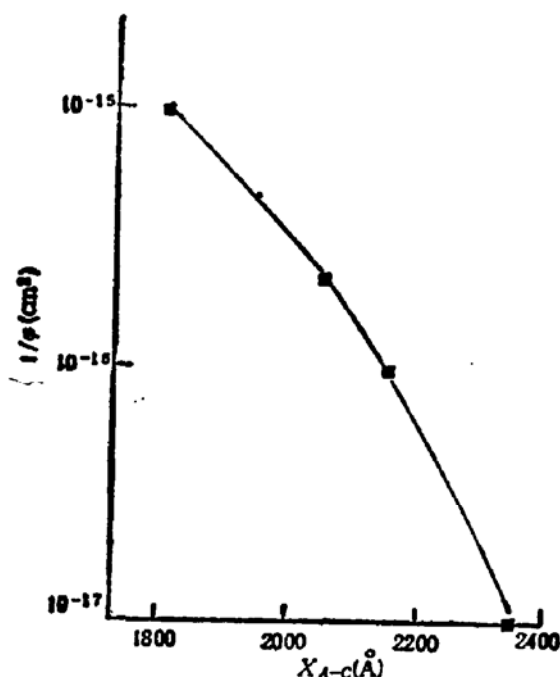
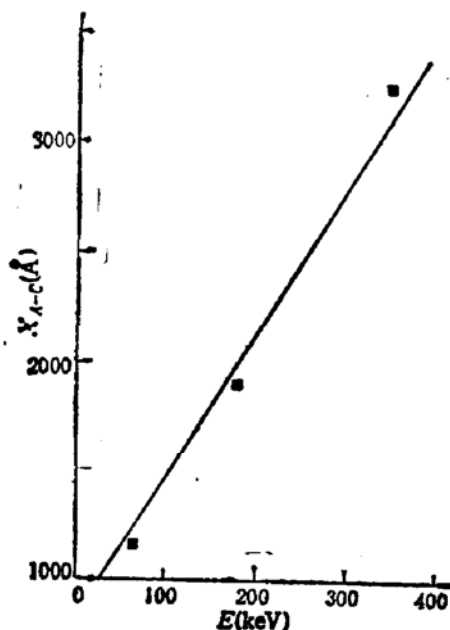
图2 180keV 时 $(X_{A-C} - \bar{x}_D)^2$ 随 φ 的变化

图3 180keV 时非晶层厚度随剂量倒数的变化

图4 非晶层厚度随注入能量的变化(注入剂量为 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$)

和 f 可以得到在 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 剂量下注入能量为 180 及 350keV 时的 x_{A-C} (图4)。如引用 Gamo 等人^[9]以 70keV 的能量在 Si 中注 Zn 时所得到的 $x_{A-C} \sim 1000\text{\AA}$, 则 x_{A-C} 随注入能量 E 的变化可粗略地认为是线性的, 也就是说 φ_0 几乎不依赖 E 。这与 C. E. Christodoulides 等人^[10]研究在 Si 中以 20—200keV 能量注入 Pb 所得到的结果相类似。

四、结 论

在 Si 中以 $10^{15} - 10^{17}/\text{cm}^2$ 的剂量注入 Zn 时, Si 晶格的损伤是直接碰撞导致非晶

化的结果。采用这个模型,实验值和理论值很符合,即 $(x_{A-C} - \bar{x}_D)^2$ 与 $\ln \varphi$ 为线性函数关系。同一剂量下, x_{A-C} 随注入能量的增加而增加。

参 考 文 献

- [1] E. C. Baranova, V. M. Cusev, Yu. V. Martynenko, C. V. Starinin and I. B. Hailbullin, *Ion Implantation in Semiconductor and Other Materials*, B. L. Crowder, Ed., Plenum, PP. 59—71, 1973.
- [2] J. F. Gibbons, *Proc. IEEE*, **60**, 1062(1972).
- [3] L. T. Chadderton and F. H. Eisen, *First Int. Conf. on Ion Impl.*, Thousand Oaks, California (1970).
- [4] D. A. Thompson, G. Carter, H. K. Haugen and D. V. Stevanovic, *Rad. Effects*, **46**, 71(1980).
- [5] D. J. Mazey, R. S. Nelson and R. S. Barnes, *Phil. Mag.*, **17**, 1145 (1968).
- [6] C. E. Christodoulides, N. J. Kadhim and G. Carter, *Rad. Effects*, **52**, 225 (1980).
- [7] P. Sigmund and J. B. Sanders, 'Spatial Distribution of Energy Deposited by Ionic Bombardment,' in *Proc. Int. Conf. on Applications of Ion Beams to Semiconductor Technology* (Grenoble, France), P. Glotin, Ed. Editions OPHRYS, PP. 215—253.
- [8] C. E. Christodoulides, R. A. Baragiola, D. Chivers, W. A. Grant, J. S. Williams, *Rad. Effects*, **36**, 73 (1978).
- [9] K. Gamo, H. Yagita and S. Namba, *Rad. Effects*, **47**, 45(1980).
- [10] C. E. Christodoulides, N. J. Kadhim, G. Carter, J. J. Jimenez-Rodriguez and A. Gras-Marti, *Nucl. Instr. and Meth.*, **191**, 124 (1981).

Damage Generated by Zinc Implantation in Silicon and Diffusion of the Implant

Yin Chiduan, Zhang Jingping, Gu Quan, Xu Zhenjia

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Liu Jiarui, Zhang Qichu and Li Dawan

(Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract

The depth distribution of both implanted atoms and radiation damage generated by 180 and 350 keV Zn ion implantation of Si over the dose range from $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ to $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ have been measured by high resolution Rutherford backscattering/channelling analysis. Experimental results suggest that the depth of the amorphous-crystal boundary increases monotonically with both ion fluence and implantation energy. The variation relations between these parameters are found to agree well with direct impact amorphisation model in which each projectile amorphises a logical region by cascade effect. With increasing in ion fluence these amorphous zones overlap and the solid can be considered to be amorphised over a given layer depth.