

高剂量 As 注入单晶 Si 低温加热和高温 电子束两步退火性能研究

卢殿通 张通和 苏 颖

(北京师范大学低能核物理研究所)

高 愈 尊

(北京有色金属研究总院)

1985年10月28日收到

本文研究高剂量 As 注入 P-Si 单晶, 经过低温热退火和高温电子束扫描两步退火方式后的性能。用高压电子显微镜观察样品注入层的剩余缺陷, 结果表明: 只经过一步高温热退火或电子束退火的样品, 剩余缺陷密度为 $10^9/\text{cm}^2$ 以上, 线缺陷长度为 $2\text{--}4\mu\text{m}$, 有位错环和位错网存在。两步退火后, 样品注入层的缺陷密度降到 $10^7/\text{cm}^2$ 量级, 线缺陷长度小于 $0.5\mu\text{m}$, 位错网消失。

一、前 言

国外已有专用的电子束退火设备, 用离子注入和电子束退火技术已经研制出太阳能电池^[1]。近几年国内也开展了电子束退火的研究工作, 并且试制出电子束退火装置^[2]。电子束退火的特点是电激活率高, 杂质扩散小, 易于控制。高剂量的离子注入样品经过电子束退火可以获得高浓度浅结。

二、实验方法

选用 $8\text{--}12\Omega\text{-cm}$ 的 p-Si(111) 单晶, As 注入能量为 $60\text{--}150\text{keV}$, 剂量为 $5 \times 10^{13}\text{--}1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 。注入后样品切成 $6 \times 6\text{mm}^2$, 然后分别进行一步高温热退火、高温电子束退火和两步退火。高温热退火选 1000°C , 30分钟, N_2 气保护。两步退火是先低温热退火 600°C , 5小时, N_2 气保护; 接着高温电子束退火。电子束退火是用长沙半导体设备研究所试制出来的 DT-1型电子束退火机完成的。通过改变扫描电子束的电流或扫描次数来选取最佳退火效果, 使退火后样品方块电阻最小。

样品退火后用微分电导法测量载流子浓度分布。用背散方法测量杂质浓度分布^[3]。

用 JEM-1000 型高压透射电镜观察样品注入层的剩余缺陷。

三、实验结果

1. 电子束退火条件的选择

我们采用多次扫描电子束退火方式: 固定加速电压 15kV , 束斑 $\phi 2$ 或 $\phi 5\text{mm}$, 线扫

描时间 6.5—80ms, 帧扫描时间 0.5 秒; 通过改变扫描电流或扫描次数选取最佳退火条件, 使样品方块电阻最小。

图 1(a) 是样品 18-1—18-4 的方块电阻和电子束电流的关系。

图 1(b) 是样品 7-1—7-4 的方块电阻和扫描次数的关系。

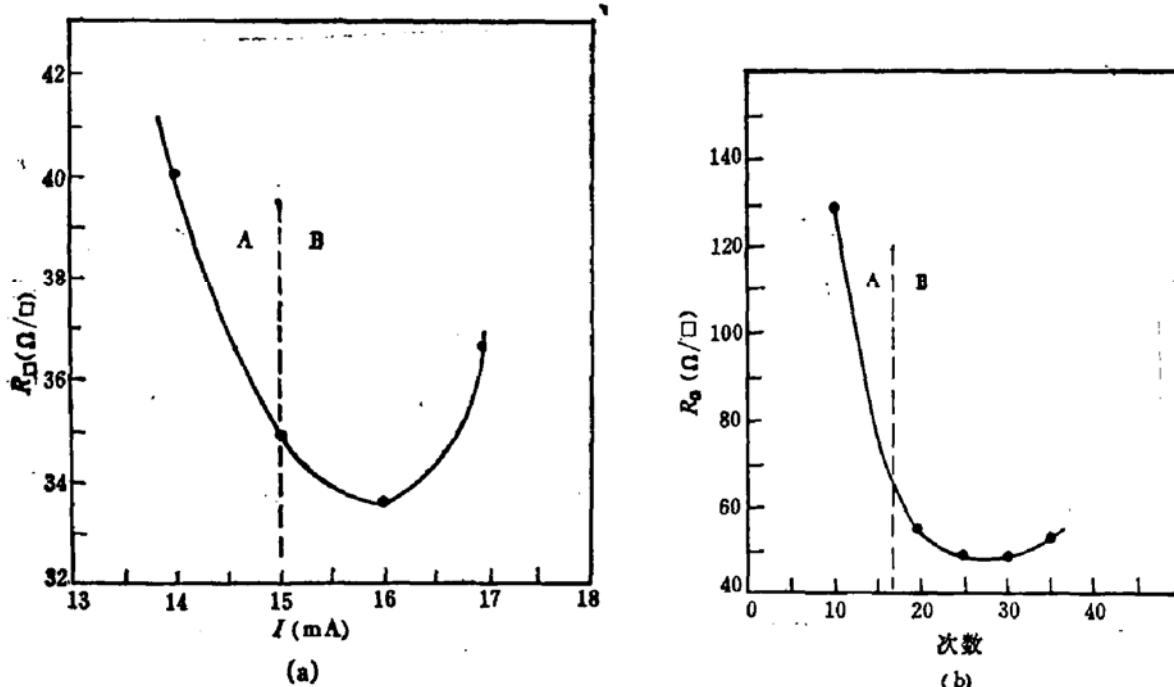


图 1(a) $\text{As} \rightarrow \text{Si}$ 100keV, $7.24 \times 10^{19}/\text{cm}^2$ 18-4, 18-3, 图 1(b) $\text{As} \rightarrow \text{Si}$ 60keV, $3.5 \times 10^{19}/\text{cm}^2$ 7-1, 7-2, 7-3, 7-4 15000V, $\phi 5, 28$ 阶, 6.4ms, 20 次
18-2, 18-1 15000V, $\phi 5, 28$ 阶, 6.4ms, 17mA

其中 A 区为不充分退火, B 区为高温充分退火。最佳退火条件应在 B 区选择, 不同的样品其最佳退火条件稍有差异。本实验得到平均载流子浓度高于 $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 和结深在 0.15—0.3 μm 之间的高浓度浅结。载流子的平均迁移率在 40.1—60.1 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 之间。

2. 一步退火和剩余缺陷

图 2(a) (见图版 I) 为样品经过不充分退火的 TEM 照片。电子衍射图上有非晶环存在。

图 2(b) (见图版 I) 为样品经过充分电子束退火的 TEM 照片。缺陷密度 $N_D \sim 10^9/\text{cm}^2$, 线缺陷长度达到 $2 \mu\text{m}$ 。

图 3 (见图版 I) 是一步高温热退火样品的 TEM 照片。缺陷密度 $N_D \sim 9 \times 10^8/\text{cm}^2$, 线缺陷长度达 $4 \mu\text{m}$, 并有网状结构。

3. 两步退火和剩余缺陷

图 4 (见图版 II) 是两步退火后样品的 TEM 照片。缺陷密度 $N_D \sim 1—8 \times 10^7/\text{cm}^2$, 线缺陷长度小于 $0.5 \mu\text{m}$, 位错网消失。

四、实验结果讨论

1. 一步退火方式的缺点

高剂量 As 注入单晶 Si 中, 形成无序层。要想得到良好的电学性能必须恢复晶格的完

整性和激活注入杂质：即使 As 原子处于代位的晶格位置上。一步退火是一次完成上述两个过程。在晶格处于无序状态下，高温退火时，注入层中的损伤缺陷很容易长大，形成位错线、位错环和位错网^[4]。

2. 两步退火的优点

两步退火方式把恢复晶格完整性和激活杂质分开两步进行。低温退火实际上是一个固相外延过程。图 5(a) (见图版 II) 是低温退火后样品的电子衍射照片，非晶环已消失，晶格损伤已经恢复。

由 W·S·S 理论可知^[5]，离子注入样品晶格原子位移数深度分布为：

$$N(x) = \frac{0.42E\phi}{\sqrt{2\pi}\Delta\langle x \rangle_D E_d} \exp\left(-\frac{(x-\langle x \rangle_D)^2}{2\Delta\langle x \rangle_D^2}\right). \quad (1)$$

其中 E : 注入能量, ϕ : 注入剂量, E_d : 晶格原子位移能, $\langle x \rangle_D$: 损伤峰深度, $\Delta\langle x \rangle_D$: 标准偏差。在图 4 中, $E = 100\text{keV}$, $\phi = 1 \times 10^{16}\text{As/cm}^2$, $E_d = 16\text{eV}$, 算出: $\langle x \rangle_D = 575\text{\AA}$, $\Delta\langle x \rangle_D = 357\text{\AA}$, 从而得到损伤分布图 5(b), 无序层深度为 1635\AA 。 600°C 时, Si<111> 晶向外延速度为 $20\text{\AA}/\text{分}$ ^[6], 退火 5 小时足以完成晶格恢复。

低温退火后样品方块电阻都高于 $60\Omega/\square$, 这是因为 As 原子取代晶格位置上的 Si 原子需要更高的能量, 低温退火不能完成这一目的。

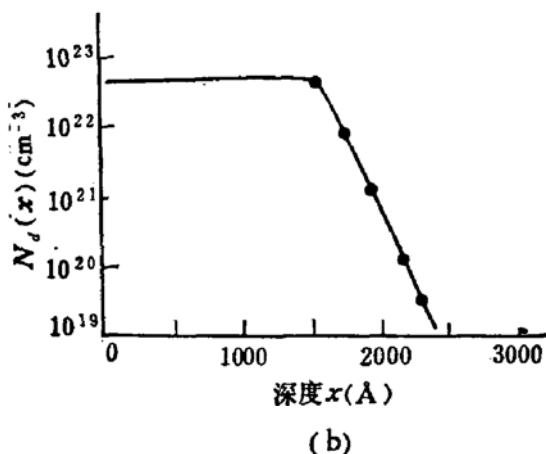


图 5(b) As 注入 P-Si<111> 单晶, 100keV , $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$,
晶格位移原子数分布

第二步退火过程几乎是在单晶情况下进行的，晶格损伤已经恢复，剩余缺陷相互作用小，线缺陷不易长大。因而使缺陷密度明显下降，使位错网消失。

As 在 Si 中 600°C 时的扩散系数比 1000°C 时要小三个数量级^[7]，低温退火杂质扩散很小，高温电子束退火是在 ms-s 之间完成的，杂质来不及扩散。所以用二步退火方式可以得到高浓度浅结，且具有较低的缺陷密度。

作者感谢长沙半导体设备所的陶敦仁、周楚材、刘日喜等同志，他们帮助完成了电子束退火实验。

参 考 文 献

- [1] A. C. Greenwald, R. G. Little, M. B. Spitzer and R. G. Wolfs, Laser and Electron Beam Interactions

- with Solids, Materials Research Society Symposia Proceeding, 62(1981).
- [2] W. K. Chu, H. Müller and J. W. Mayer, Ion Implantation in Semiconductors. Plenum Press, New York and London, 177—182(1974).
- [3] 电子束退火小组, 电子工艺技术, No.2, 40,(1983).
- [4] 卢殿通、张通和、陶敦仁等. 微细加工技术, No.2, 13—22, (1983).
- [5] M. Watanabe, Y. Matsuchita and K. Shibata, Defects and Radiation Effects in Semiconductors, Institute of Physics Conference Series, No.59, 123(1980).
- [6] J. E. Ziegler, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B6, 270—282,(1985).
- [7] S. T. PICRAUX, Defects in Semiconductors, 135, Materials Research Society Symposia Proceeding, (1981).
- [8] K. B. Winterbon, P. Sigmund, J. B. Sanders, Matematisk-tysiske Meddeleser, 37No.14, 1—73,(1970).
- [9] B. И. 鲍尔塔克斯著,薛士鑒译,半导体中的扩散,科学出版社, 202(1964).

Properties of High Dose As⁺ Implanted Silicon Annealed at a Lower Temperature and by an Electron Beam

Lu Diantong, Zhang Tonghe, Su Ying

(Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University)

Gao Yuzun

(Beijing General Research Institut of Non-ferrous Metals)

Abstract

Properties of high dose As ion implanted $\langle 111 \rangle$ Silicon annealed at a lower temperature and by an electron beam have been investigated. If the silicon specimens are only annealed at a higher temperature or by an electron beam, the density of defects is about $10^9/\text{cm}^3$, the lengths of dislocations or other defects are up to $2\text{--}4\ \mu\text{m}$, and the dislocation loops and networks are observed in the implanted layer. After two-step annealing—a lower temperature thermal annealing followed by a higher temperature electron beam annealing, the density of defects is decreased by one order at least. The length of dislocation is less than $0.5\ \mu\text{m}$. No dislocation networks are observed.