第11卷 第8期 半 导 体 学 报 Vol. 11, No. 8
1990年 8 月 CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS Aug., 1990

N^+ 和 N_2^+ 注入 Si 的力学和电学特性

马德录 毛晓峰
(辽宁大学物理系，沈阳)
尚德颖
(沈阳冶金机械专科学校)

1989年8月6日收到

本文用X射线衍射（XRD）的运动学理论和扩展电阻（SR）研究了 N^+ 和 N_2^+ 注入 Si 的力学和电学性质，给出了不同剂量的晶格应变随注入深度的分布以及在注入层中产生的点缺陷数量．用 SR 给出了不同剂量 N^+ 和 N_2^+ 注入 Si 的电阻率随深度的变化．二者比较，我们实验的各种剂量($1\times10^{16}cm^{-2}$ 除外)的电阻率大致相等，而产生的应变，后者是前者的 1.3 倍左右．

主题词 离子注入，X射线衍射，扩展电阻，晶格应变

一、前 言

为发展超大规模集成电路，研究注入层的性质已成为半导体学科中一个异常活跃的分支领域．XRD 和 SR 能分别给出注入层的微观结构变化和宏观电学性质的大量信息．因此很多人开展了这方面的工作． B. C. Larson 等[1]用 XRD 和 IR 研究了 B^+ 注入 Si 的晶格应变随深度的分布． P. Zaumseil 等[2]用 XRD 测定了 Si^+ 注入 Si 中位错环的大小和密度． Y. Lida 等[3]用 SR 研究了注入层的电学性质．而用 XRD 和 SR 研究 N^+ 和 N_2^+ 注入 Si 目前尚未见到报道．

二、基 本 原 理

注入层内的辐射损伤一般说来是不均匀的，其损伤度和晶格应变都是深度的函数，但只要把注入层分成许多薄层，每一薄层内的损伤可看成均匀的．注入层可看成由许多薄层构成，这就是多层模型．根据 XRD 运动学理论，在 Bragg 角附近应变晶体对X射线的反射强度为[4]：

$$I(\Delta\theta) = R_N(\Delta\theta)R_N^*(\Delta\theta) + R_0^2(\Delta\theta) + 2R_0(\Delta\theta)R_e[R_N(\Delta\theta)], \tag{1}$$

$$R_N(\Delta\theta) = \sum_{j=1}^{n} |q_j| \exp\left[i\left(\frac{n\delta_j}{2} + \phi_j\right)\right]\frac{\sin\frac{n\delta_j}{2}}{\sin\frac{\delta_j}{2}} \tag{2}$$

式中：R_N 和 q_i 分别是第 N 个薄层和第 i 个晶面对X射线的反射振幅；n 是每个薄层的晶面个数；ϕ_i 是第 i 个晶面处X射线的位相.

$$\delta_i = \frac{4\pi}{\lambda} d\cos\theta_B \Delta\theta + 2\pi\left(\frac{\Delta d}{d}\right)_i \tag{3}$$

式中：θ 和 θ_B 分别为X射线和 Bragg 衍射角. R.W. James[5] 研究了完整晶体在 Bragg 主峰附近的反射振幅为：

$$R_0(\Delta\theta) = \frac{1}{2p}\left(1 + \frac{1}{4p^2}\right) \tag{4}$$

$$p = -\frac{\sin 2\theta_B}{e^2/mc^2}\frac{\pi V\Delta\theta}{\lambda^2|F^0_{hkl}|} \tag{5}$$

式中：F^0_{hkl} 和 F^i_{hkl} 分别是完整和损伤晶体（第 i 个薄层）的结构因子；V 是单位晶胞体积. 定义损伤度：

$$w = 1 - \frac{F^i_{hkl}}{F^0_{hkl}} \tag{6}$$

到目前为止，尚没有办法从实验测得的损伤层对X射线的衍射直接算出晶格应变. 因此我们先假设一个试探应变函数：

$$\frac{\Delta d}{d}(t) = \begin{cases} b_1 t + b_2 & t \leqslant b_4 \\ b_3\exp\left[-\left(\dfrac{t-b_4}{b_5}\right)\right] & t > b_4 \end{cases} \tag{7}$$

式中：t 为注入深度. 由(1)式计算X衍射强度与实验值模拟迭代可得损伤层内的应变分布. 迭代时用 Levenberg-Marquardt 最优化法，Jacobi 矩阵中的偏导数由两点割线法求出. 选用目标函数：

$$F(b_1, b_2\cdots b_5, \Delta\theta) = \frac{1}{\sqrt{N-M}}\left[\frac{I_{cal}(b_1\cdots b_5\Delta\theta) - I_{exp}(\Delta\theta)}{I_{exp}(\Delta\theta)}\right]^2 \tag{8}$$

式中：$b_1, b_2\cdots b_5$ 为待定参数；M 为实验点数；N 为多层模型的层数. 通过求目标函数的最小值求出应变分布，使理论计算的衍射强度与实验值在最小二乘意义下误差最小，最后得与实验曲线拟合最好的应变函数.

三、实 验

实验样品选用 n-Si⟨100⟩ 单晶片，电阻率 $\rho = 3\sim6\Omega$cm，表面抛光，正常清洗. 为避免沟道效应，偏⟨100⟩7° 角注入. 注入能量和剂量分别为 180keV 和 1×10^{12}—1×10^{16}cm^{-2}. 注入后在 350—1100℃ 下热退火，每次退火 30 分钟. 每次注入和退火后都进行X衍射和扩展电阻测量. 在X衍射仪上，将样品在 Bragg 角附近连续扫描得到 Si 的铜 K_α 衍射图形(图 1). 根据 Miller 指数标定法，标出其对应的晶面指数. X衍射的所有数据都存贮在衍射仪附属的微机中，因此我们可得到 Bragg 角附近晶体对X射线的衍射强度. 在自动扩展电阻仪上，测量样品，它附属的微机可自动将扩展电阻转换成电阻率和载流子浓度等.

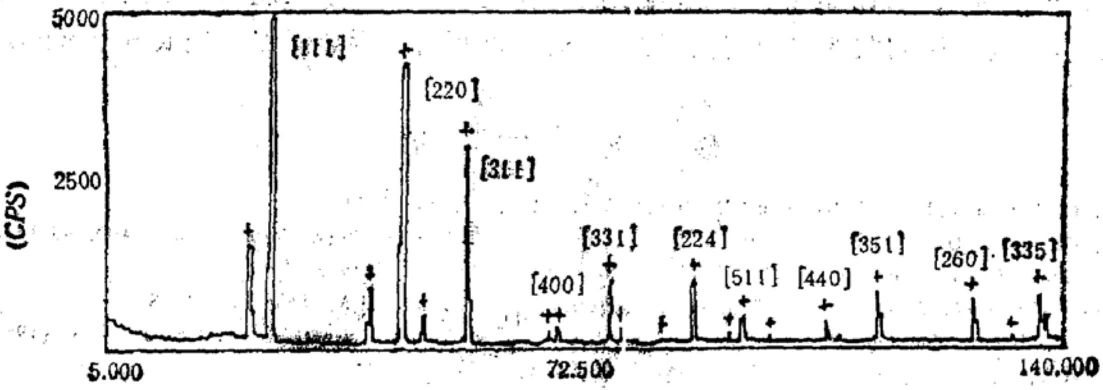

图 1　N_2^+ 注入 Si 的 X 射线峰
能量 180keV　剂量 5×10^{14}atom/cm²　退火温度 450℃

四、结果与讨论

图 2 给出了不同剂量 N^+ 和 N_2^+ 注入 Si 的应变和损伤随注入深度的变化，从图上可看出相同剂量的 N_2^+ 是 N^+ 注入 Si 所产生应变的 1.3 倍左右．该图的曲线 4 为 1×10^{16} cm^{-2} N^+ 注入 Si 损伤度随深度的变化，其最大损伤度已超过 50%，说明晶体内已形成非晶层[6]．图 3 为不同剂量的 N^+ 和 N_2^+ 注入 Si 的电阻率随深度的变化．从图上可看出我们实验的各种剂量(未全画)，$1\times10^{16}cm^{-2}$ 除外，二者的电阻率大致相等．$1\times10^{16}cm^{-2}$ 的 N_2^+ 注入 Si 在深 1500 Å 处出现一尖峰，这是在该处形成 200 Å 左右的一层 Si_3N_4 的缘故，我们测其红外吸收谱已证实了这一点．此外我们还测量了注入产生的点缺陷和不同退火温度应变恢复的情况．比较由 XRD 得到的晶体微观结构变化和由 SR 得到的宏观

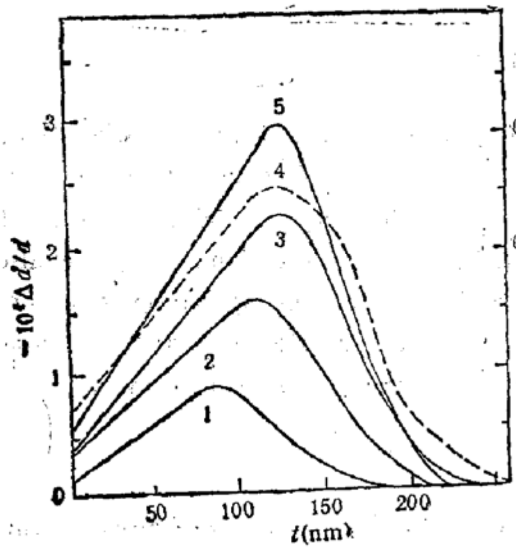

图 2　N^+ 注入 Si 的应变分布(曲线 1、2、3)和损伤分布(曲线 4)及 N_2^+ 注入 Si 的应变分布(曲线 5)　1：$5\times10^{12}N^+/cm^2$　2：$5\times10^{14}N^+/cm^2$　3—5：$1\times10^{16}N^+/cm^2$

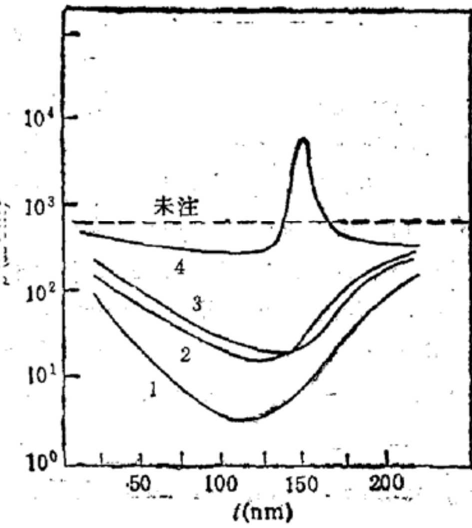

图 3　不同剂量 N^+ 注入 Si 与 N_2^+ 注入 Si 的扩展电阻率分布　1：$1\times10^{16}N^+/cm^2$　2：$5\times10^{14}N^+/cm^2$　3：$5\times10^{14}N^+/cm^2$　4：$1\times10^{16}N_2^+/cm^2$

电学性质可发现二者的符合较好。即离子注入改变晶体的电学性能不仅是由于增加了载流子浓度，也与晶体的微观结构变化有关，这对于研制新的半导体器件是很有意义的。

参 考 文 献

[1] B. C. Larson and J. F. Barharst, *J. Appl. Phys.*, **51** (6), 3181 (1980).
[2] P. Zaumseil, U. Winter, F. Cembali, M. Servidori and Z. Sourek, *Phys. Status Solidia*, **100**, 95(1987).
[3] Y. Lida, H. Abe and M. Kondo, *J. Electrochem. Soc.*, 124, 1118 (1977).
[4] Ma Delu *et al.*, Materials and Process Characterization for VLSI (ICMP'88), 242 (1988).
[5] R. W. James, The Optical Principles of the Diffraction of X-Ray, Cornell, U. P. Ithaca, N. Y. (1965).
[6] 马德录、尚德颖、于锦华，物理学报，**38**，579(1989).

Mechanical and Electrical Properties of N^+ and N_2^+ Implanted Si

Ma Delu, Mao Xiaofeng
(Department of Physics, Liaoing University, Shenyang)
and Shang Deying
(Shenyang College of Metallurgical Machinery)

Abstract

The mechanical and electrical properties of N^+ and N_2^+ implanted Si are investigated by means of the kinematic theory of X-ray diffraction and the measurment of spreading resistance The strain distributions in the layers implanted with different doses as a function of the depth are given. The number of point defects in the implanted layers as a function of depth is also given. The resistivities of N^+ and N_2^+ implanted Si are investigated by spreading resistance method. It was found that the resistivities of the N^+ and N_2^+ implanted Si with different doses except the dose of $1\times10^{16}\,cm^2$ are approximately identical, and the strain created by N_2^+ implanted is 1.3 times as much as that of N^+ implanted.

Key words Ion implantation, X-ray diffraction, Spreading resistance, Lattice strain