

低能 As^+ 注入Si(100)产生缺陷的研究

翁惠民^{1,2} 黄千峰¹ 杜 罡¹ 韩荣典^{1,2}

1 (中国科学技术大学 合肥 230026)

2 (中国科学院上海冶金研究所 上海 200050)

摘要 介绍了用慢正电子束探针研究 As^+ 以不同角度注入Si(100)产生的缺陷以及退火后缺陷清除效应的结果。用正电子的Doppler展宽湮没技术对样品作无损检测,采用一维的扩散方程进行拟合,对缺陷分布求解,获得缺陷的各种信息。实验结果表明, 15° 小角度注入产生的缺陷浓度比 60° 注入的要大,而且两者的缺陷类型也不同;对于 15° 注入产生的缺陷可用快速热退火很好地消除。

关键词 慢正电子, Doppler展宽, S 参数, 缺陷, 离子注入, 退火

研究离子注入的占位和注入过程中产生的缺陷的方法有高分辨电镜(HERM)、卢瑟福背散射(RBS)、二次离子质谱(SIMS)等。它们有的可以探知固体近表面的杂质分布,但对空位型缺陷不灵敏;有的虽能给出结构缺陷的图样,但不能给以定量描述,且对低浓度点缺陷分辨能力有限;这些技术多数对样品有一定的损伤,因而不能对样品进行无损检测。而慢正电子束探针可以解决以上的问题。正电子质量小,低能正电子束强度弱,能量低且连续可调,对样品完全无损。单能正电子注入样品后,湮没光子可携带出湮没处的电子密度和电子动量分布信息。正电子探针对空位型缺陷极为灵敏,在点缺陷原子浓度为 10^{-7} 时能作出敏感的反应。本文介绍用慢正电子束探针研究 As^+ 以不同角度注入Si(100)产生的缺陷结构及退火后缺陷的清除效应。

1 实验方法

样品是电阻率为 $10\sim 14\Omega\cdot\text{cm}$ 的P型Si(100)单晶硅片,经表面抛光、清洁处理后放入离子室中进行离子注入, As^+ 能量为 25keV ,注入剂量为 $5\times 10^{14}/\text{cm}^2$ 。为了比较不同角度进行离子注入所产生的缺陷分布,选取了两个不同的注入角度:分别与晶轴成 15° 和 60° 。第三个样品是对注入角度为 15° 的硅片进行快速热退火(RTA),以了解缺陷在退火后消除、复合的效应。此外,为了得到正电子在单晶硅基体中的 S 参数、有效扩散长度等数据作为分析的基础,还测量了未经离子注入的单晶硅片。

慢正电子束实验测量在中国科学技术大学的束流装置上完成^[1]。用正电子的Doppler湮没技术^[2]对样品作无损测量。单能正电子束能量在 $0\sim 20\text{keV}$ 之间连续可调,能散 $\Delta E(\text{FWHM})<2\text{eV}$,靶室真空度为 $13.3\mu\text{Pa}$ 。湮没 γ 光子用高纯锗探测器(ORTEC GEM-10175)进行测量,能量分辨率对于 ^{85}Sr 的 514keV γ 射线为 $1.12\text{keV}(\text{FWHM})$ 。Doppler展宽能谱线性 S 参数定义为

收稿日期:1996-12-30, 修回日期:1997-04-28

$$S=\int_{-a}^a C(E)dE/\int_{-\infty}^{\infty} C(E)dE \tag{1}$$

式中， $C(E)$ 是扣除本底后的实验谱； $(-a,a)$ 是以511keV为能量坐标原点的能量区间，这里取 $a=1\text{keV}$ 。 S 参数反映的是电子动量分布和电子密度的信息^[3]。当电子在固体材料内与传导电子的湮没比份增加时， S 参数会增大，因而慢正电子束是空位型缺陷的理想探针。全谱总计数为 1×10^5 ，实验时通过改变正电子入射能量 E 即可测出每个样品的 $S-E$ 曲线。

2 结果与分析

图1给出了四个样品的 $S-E$ 实验曲线。为了解各样品中近表面缺陷的浓度及特征，我们用以下模型对数据进行处理。

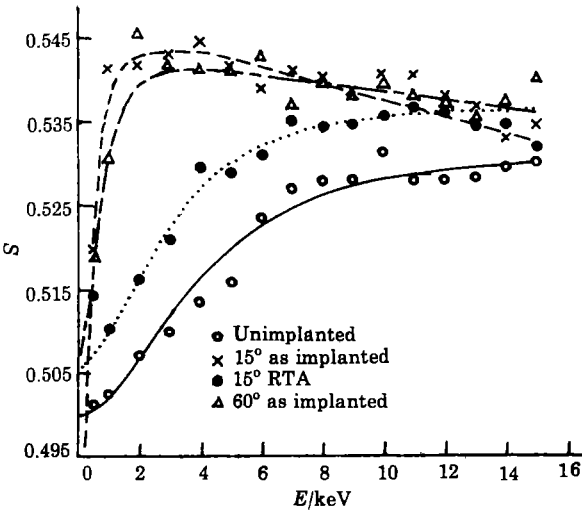


图1 各个样品的 $S-E$ 曲线
Fig.1 The $S-E$ curves for various samples

稳定的正电子束注入样品，热化后呈一似稳态分布，其分布函数 $P(E)$ 为^[3]

$$P(Z,E)=(m/Z_0)(Z/Z_0)^{m-1}\exp[-(Z/Z_0)^m] \tag{2}$$

式中， $Z_0=Z/\Gamma(1+1/m)$ ，其中 $\Gamma(1+1/m)$ 是 Γ 函数，一般取 $m=2$ ； $\bar{Z}$ 为能量为 E 的正电子的平均注入深度， $Z=(D_+ \tau_b)^{1/2}(E/E_0)^n$ ， $n=1.6$ 为注入轮廓参数， E_0 为注入正电子有一半份额扩散回表面时的注入能量， D_+ 是正电子扩散长度， $1/\tau_b$ 是正电子体湮没率。热化后的正电子在样品中扩散，与电子缺陷相互作用，其扩散过程可由下述方程描述

$$D_+n''(Z)-(1/\tau_{eff})n(Z)+P(Z)=0 \tag{3}$$

式中， $n(Z)$ 为正电子在距表面 Z 处的密度分布， $1/\tau_{eff}$ 为正电子总捕获率

$$1/\tau_{eff}=1/\tau_b+K=1/\tau_b+\mu C_d \tag{4}$$

式中， $K(Z)$ 为缺陷对正电子的捕获系数，与缺陷浓度 $C_d(Z)$ 成正比，比例系数为 μ ^[4]。 τ_{eff} 与正电子有效扩散长度 L_{eff} 的关系为

$$L_{eff}=[D_+ \tau_{eff}]^{1/2} \tag{5}$$

在上述模型中还考虑了正电子在三种情形下湮没时对 S 参数的贡献:(1)在完整晶格中湮没, 参数为 S_b ; (2)扩散到表面, 束缚于表面层, 参数为 S_s ; (3)为缺陷捕获并湮没, 参数为 S_d 。实验测得的 S 参数是 S_b 、 S_s 、 S_d 的加权线性组合

$$\begin{aligned} S &= F_s S_s + F_b S_b + F_d S_d \\ F_s + F_b + F_d &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, F_s 、 F_b 、 F_d 是正电子在三种情形下湮没所占的百分比。

$$F_s = -J(0) = D_+ n'(Z) \big|_{z=0} \quad (7)$$

$$F_d = \int_0^\infty K(x) n(x) dx \quad (8)$$

$$F_b = \int_0^\infty (1/\tau_b) n(x) dx \quad (9)$$

从上述扩散方程出发, 加上一定的边界条件, 即 $n(0) = n(\infty) = 0$, 可以对缺陷分布作出求解。编制相应的拟合程序, 由 $S-E$ 曲线可得到 S_s 、 S_d 、 S_b 及 L_{eff} 值, 从而获得有关缺陷的各种信息。

各个样品的拟合结果见表1。从未注入的标准样品的 $S-E$ 曲线得到正电子在单晶硅中的扩散长度 L_b 为190.4nm。由表1可以看到, 经As⁺注入后, 正电子的 L_{eff} 大大减小, 如15°注入时, $L_{\text{eff}} = 5.3\text{nm}$; 60°注入时, $L_{\text{eff}} = 13\text{nm}$ 。从图1可以看到, S_d 最大值在 $E = 1-2\text{keV}$ 区间, 由平均注入深度可算得深度约17nm, 说明As⁺的注入对 S 的晶格造成了损伤, 在近表面产生了大量的缺陷, 形成对正电子的强捕获中心, 从而使得正电子的 L_{eff} 急剧减小。取Si(100)的 $D_+ = 2.7\text{cm/s}^{[5]}$, 由式(5)和式(4)可以算得对于15°和60° As⁺注入样品的 K 分别为 $1280 \times (1/\tau_b)$ 和 $215 \times (1/\tau_b)$ 。由于 K 与 Ca 成正比, 所以As⁺在以15°斜角注入硅单晶时, 产生的缺陷浓度比60°注入时大得多。这是因为当As⁺的注入与晶面成小角度时, 与晶格上的原子发生小角度碰撞的几率较大, 这样As⁺就可以沿注入方向运动更长的距离, 与更多的晶格原子发生碰撞, 造成它们的位移; 同时, 每次碰撞传递给原子的能量也较小, 碰撞产生的初始出射原子产生级联碰撞的机会也小得多。而当As⁺以60°注入时, 与晶格原子发生对心碰撞的几率增大, 这样每次传递给晶格原子的能量较大, 因此碰撞产生的初始粒子有足够的能量产生一次及多次的级联碰撞, 从而产生以多空位团簇为主的缺陷结构。由于每次碰撞损失的能量较多, 因此生成的缺陷浓度减小, 但产生的缺陷类型不同于15°注入的情形。这一点, 从两者 S_d 的不同也可以看出: 60°注入产生的缺陷的 $S_d = 0.5442$, 比15°注入的 $S_d = 0.5405$ 要大。As⁺ 15°注入时产生的缺陷以点缺陷类型为主^[6]。与之相比, 多空位团簇缺陷区域的外层传导电子相对密度更大, 导致 S_d 较大。未退火样品的缺陷浓度高, L_{eff} 很小。高温退火时, 会产生微观结构重组, 离子与空位大量复合, 使得缺陷得到相当程度的恢复, 浓度降低。对15°注入的样品进行快速热退火, 温度是1200℃, 时间为10s, 对退火后的样品测得的 $L_{\text{eff}} = 98.6\text{nm}$, $K = 1.7 \times (1/\tau_b)$, 与未退火时的 $K = 1280 \times (1/\tau_b)$ 相比, 可以认为注入时产生的缺陷已被很好地消除。这一点从 $S_d = 0.5360$, 相当接近于完整晶格的 $S_b = 0.5301$ 也可以看出。总之退火消除了绝大部分缺陷, 但 S_d 与 S_b 仍存在一定的差别。另外, 从有效扩散长度看, 退火后的 $L_{\text{eff}} = 98.6\text{nm}$ 比未注入样品的 $L_{\text{eff}} = 190.4\text{nm}$ 要小, 这可能是残留的极少量缺陷和As原子对正电子捕获的贡献。

表1 对不同制备条件的样品的测量结果
Table 1 The fitting results for the samples prepared in different conditions

样品制备条件	Reparation condition of samples	S_s	S_b	S_d	L_{eff}/nm
未注入	Unimplanted	0.4996	0.5301		190.4
15°注入未退火	15° as implanted	0.4853	0.5301(fixed)	0.5405	5.318
15°注入退火	15° RTA 1200℃ 10s	0.5051	0.5301(fixed)	0.5360	98.57
60°注入未退火	60° as implanted	0.5675	0.5301(fixed)	0.5442	12.96

3 结论

用慢正电子束研究了As⁺以不同角度注入P型Si(100)产生的缺陷。结果表明，以15°小角度注入所产生的缺陷浓度比60°注入时的大5倍左右，两者的缺陷浓度类型也不同，前者以点缺陷为主，后者以多空位团簇为主。对于15°注入样品产生的缺陷，用快速热退火可以很好地消除，使其微结构接近于完整晶格。因此，用小角度注入的方法制备浅结是一种有利的方法。

参 考 文 献

1 韩荣典, 郭学哲, 翁惠民, 等. 物理学报, 1988, 37(9):1517
2 GUO X Z, WENG H M, HAN R D. Chinese Phys Lett, 1992, 9(9):391
3 Schultz P J, Lynn K G. Rev Mod Phys, 1988, 60(3):701
4 P.豪托贾维编, 何元金等译. 正电子湮没技术. 北京:科学出版社, 1984
5 Nielsen B, Lynn K G. Phys Rev, 1991, B44(4):1812
6 Szeles C S, Nielsen B, Asoka-Kumar P, et al. Mater Sci Forum, 1995, 175—178:545

Investigation of defects produced by low energy As⁺
implantation in Si(100)

WENG Huimin^{1,2} HUANG Qianfeng¹ DU Gang¹ HAN Rongdian^{1,2}

1 (University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

2 (Shanghai Insitute of Metallurgy, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Abstract

Si(100) samples were implanted with low energy As⁺ ions at different incident angles and followed by rapid thermal annealing. The defects in Si(100) were measured by Doppler broadening of positron annihilation. The distribution of defects is solved by simulating a one dimensional diffusion equation. The density of defects produced by 15° implantation of As⁺ is higher than that by 60° implantation, and the types of defects are different. The defects produced by 15°implantation can be eliminated effectively by rapid thermal annealing.

Keywords Slow positron, Doppler broadening, Parameter S, Defect, Ion implantation, Rapid thermal annealing