

单晶硅中磷离子注入缺陷的 HREM 研究

严 勇 李 齐 冯 端

(南京大学固体微结构实验室, 南京大学物理系)

孙 慧 龄 王 培 大

(中国科学院微电子中心, 北京) (中国科学院半导体所, 北京)

1988年1月29日收到

单晶硅中磷离子注入的剖面透射电镜(X-TEM)及HREM研究表明: 能量为150keV, 剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的磷离子注入后, 在未经退火时, 单晶硅表面以下1100Å处可产生厚度为1000Å的非晶层, 非晶区与单晶区的边界为粗糙界面。在非晶区两侧, 存在着大量不同类型的缺陷: {311}面缺陷和{111}堆垛层错。它们分布在不同的层区内, 对于非晶区而言, 形成大体对称的分布状态。接近非晶区, {111}堆垛层错密度较大, 远离非晶区, {311}面缺陷密度较大, 深层的完整晶体中, 上述面缺陷的密度均很小。

主题词: 离子注入, 堆垛层错, 缺陷, WSS 理论, HREM

一、引言

近年来, 随着对大规模集成电路和半导体器件性能要求的不断提高, 离子注入技术得到了很大发展^[1,2]。用离子注入技术可将具有一定能量的某种离子注入到半导体表面层或其中某一局部区域中, 从而改变半导体材料的性能。离子注入技术的广泛应用, 迫切要求人们不断对离子注入的物理过程加深了解。而注入离子的占位问题以及离子注入过程中产生的缺陷, 即辐射损伤问题已成为离子注入进一步发展的重要课题^[3,4]。我们利用高分辨电子显微术(HREM), 研究了磷离子注入的Si单晶样品, 对所引起的缺陷及其分布规律得到了一些明确而有意义的结果。

二、实验条件

注入的磷离子能量为150keV, 剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 温度为室温。所研究的样品是(100)硅片。离子注入后, 未做退火处理。高分辨点阵象观察在顶插式JEM-4000EX高分辨电镜上进行。加速电压为400kV。剖面电镜样品制成(011)薄膜, 电子束沿<011>方向入射, 缺陷结构可通过(200)和(022)面的点阵象进行研究。其对应的面间距分别为0.27nm和0.2nm。由于加速电压较高, HREM像的观察可在较厚的区域进行, 从而完成缺陷在试样中沿其深度方向分布的观测。

三、结果和讨论

图 1 是(100)硅单晶磷离子注入后的(011)剖面电镜图象*。磷离子注入后，样品沿其深度方向明显地分为四个区域。第 I 区为单晶，厚度约为 1100 Å，由于辐射损伤，该区含有大量缺陷。第 II 区为非晶，厚度约为 1000 Å 左右，其中尚残留一些小的晶态区域。其尺寸通常小于 100 Å。第 III 区厚度为 3500 Å 左右，是含有大量缺陷的单晶区。第 IV 区为完整的硅单晶基体。电子衍射图表明，I, III 区晶体取向与 IV 区，即样品基体取向完全一致。从图 1 中可看到：I-II 和 II-III 界面，即非晶与单晶区界面两侧衬度有明显差别。表现为粗糙界面，起伏的振幅约为 150 Å。高分辨点阵象表明，单晶和非晶区之间的转变有时是突变，有时有过渡区存在。过渡区内晶格从有序逐渐转变为无序（见图 2(f)）。

图 2 是磷离子注入后硅的(011)晶向的高分辨点阵象**。分别与图 1 中不同的区域相对应。按照晶体中缺陷的分布状态，我们可进一步将 I, III 区域划分为{311}面缺陷层和{111}堆垛层错层。以 I 区为例，这是最接近表面的层区，从表面起至 600 Å 左右，属{311}面缺陷区，更深处至非晶界面处，则为{111}堆垛层错区。图 2(a)显示了部分躺在(311)晶面上的缺陷，在样品中还存在着躺在(311)晶面上的缺陷。这些存在着晶体学对称关系的缺陷可统称为{311}面缺陷。Tsubokawa 等^④对这类缺陷的微观结构进行了较为仔细的研究，并用计算机对实验中获得的 HREM 像进行了模拟，他们的观测结果与图 2(a)是基本一致的。测量表明：该区域中，{311}面缺陷密度约为 10^{12} cm^{-2} ，长度约为 100 Å，相应的畸变层厚度约为 20 Å。在 III 区中，{311}面缺陷则多分布在距表面 4600 Å 处以至更深处。

图 2(b)和 2(d)中，可观察到大量的{111}堆垛层错，它们分布在接近非晶区的单晶层中，密度为 10^{12} cm^{-2} ，长度为 50—100 Å。在非晶-单晶界面处，可观察到许多迭加在一起的{111}堆垛层错。在这一层区中，还有大量无底边的 V 型缺陷，其迹线方向分别为[211]与[211]，即(111)和(111)面与观察面的交线方向。沿图 2(d)中箭头 b 方向，即沿三角形底边方向，(011)方向观察时，点阵象的亮点在上述迹线外有一横向位移，越靠近底边位移越大，接近三角形顶点时位移变小。如沿箭头 a，即(111)方向观察时，则可看到点阵失配。这种像的特征与 Coene 等人在退火处理后的磷离子注入硅单晶样品中观测到的层错四面体十分类似^⑤。所不同的是后者亮点的位移在 V 型顶点处最大。堆垛层错四面体由四个躺在{111}面上的堆垛层错构成，其棱为六条取向为<011>，Bergers 矢量为 $b - \frac{a}{b} <011>$ 的压杆位错，它们将堆垛层错束缚在{111}面上，构成了三维的位错网络。图 3 是[011]取向样品中堆垛层错四面体的位置和

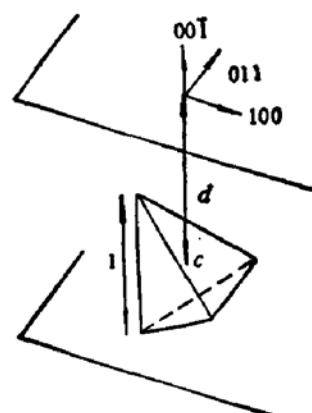


图 3 [011] 取向样品中堆垛层错四面体的位置和取向示意图

* 图 1 见图版 I。

** 图 2 见图版 I, II.

取向示意图。其一条棱与电子束入射方向平行，形成明锐的V型图象。而与该棱不共面的两层错面与观察面斜交，不能得到明确的象，因而堆垛层错四面体投影后形成了开口三角形，即V型图象。这种V型缺陷在接近非晶-单晶界面的两侧大量存在，其密度随距界面距离的增加而逐渐减少。这在未经退火的磷离子注入硅单晶（能量 150keV ，剂量 $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ ）中还是首次观察到。值得指出的是：在I, III区内都大量存在着小块严重畸变区，晶格严重扭曲的，且有较大的无序度。

图2(c)是II区的高分辨点阵象照片，在这一区域中，试样主要显示为非晶态结构。但也可观察到少量尺寸小于 100\AA 的小晶粒，由于其晶格取向与基体晶格取向完全一致。我们认为这是离子注入后，非晶区中残留的部分小的有序区。实际上，晶体中小晶粒比照片上的更多，改变聚焦条件，一些新的小晶粒将显示出来，这可能是由于小晶粒在样品中的深度不同所致。

在离子注入的条件下，固体靶中产生的结构损伤与原子碰撞过程中能量沉积成正比。当一定能量的入射离子进入固靶后，通过弹性和非弹性碰撞，把能量传给固体中的原子和电子。如果考虑到注入离子与晶格原子间的相互作用，位移原子也可能把它的能量依次转移到其它原子上，发生级联位移，形成众多的缺陷，甚至将晶格完全打乱形成非晶。如果忽略沟道效应，根据能量沉积的WSS理论^④，可知固体中离子转移给晶格原子的能量随深度变化近似为高斯型分布。从观察结果看，样品中的辐照损伤依次为{311}面缺陷层，{111}堆垛层错层，非晶层，{111}堆垛层错层，{311}面缺陷层，完整晶体层。这一分布，与理论计算的高斯型分布是定性符合的。因此，产生{111}堆垛层错所需能量比{311}面缺陷要高，尤其是V型缺陷，更接近于晶体非晶化所需要的能量。

综上所述，具有注入能量 150keV ，注入剂量 $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ ，沿[100]方向的硅单晶磷离子注入样品，沿注入方向可划分为：含有大量缺陷的单晶区，非晶区，缺陷单晶区和完整晶体区。为消除这些缺陷对材料的不良影响而做的退火处理及电镜观察工作，我们正在进行。

参 考 文 献

- [1] 北京师范大学，“离子注入原理与技术”，北京出版社，1982。
- [2] 罗晋生，“离子注入物理”，国防工业出版社，1980。
- [3] E. Myers, G. A. Rozgonyi, D. K. Sadana, W. Maszar, J. Jwortman and J. Narayan, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 52, 109 (1986).
- [4] Z. Lilietal-Weber, R. W. Carpenter, and J. C. Kelly, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 52, 139(1986).
- [5] Y. Tsubokawa, M. Kowaboka, H. Endoh and H. Hashimoto, *Proc Int Cong on Electron Microscopy, Kyoto*, 953 (1986).
- [6] W. Coene, H. Bender and S. Amelinckx, *Phil. Mag.*, 52, 369 (1985).
- [7] K. B. Winterben, P. Sigmund and J. B. Sanders, *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk* 37, 14 (1970).

HREM Study of Defects in P⁺ Implanted Si

Yan Yong, Li Qi, Feng Duan

(Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University)

(Department of Physics, Nanjing University)

Sun Huiling

(Center of Microelectronics, Academia Sinica, Beijing)

Wang Peida

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

By means of cross-section transmission electron microscopy, the microstructures and defects in P⁺ implanted Si crystals are investigated. P⁺ implantation with energy of 150 keV and dose of about $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ was done at room temperature. It is found that there are an amorphous layer 110 nm below the incident surface of specimen with thickness of about 100 nm, and two imperfect layers which are full of various kinds of defects located symmetrically on each side of the amorphous layer. {111} stacking faults and stacking fault tetrahedra are found near the amorphous layer, and {311} defects are away from the layer. The interface between the amorphous and the imperfect layers are rough. In addition, some other microdefects are found to be randomly distributed in these two layers. But the crystalline substrate still remain perfect.

KEY WORDS: Ion implantation, Stacking fault, WSS theory, HREM