

高能氩离子辐照硅产生的缺陷研究*

朱智勇 侯明东 金运范 李长林
刘昌龙 张崇宏 孙友梅

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 在室温下 750MeV 氩离子对本征单晶硅进行辐照, 通过用正电子湮没寿命测量技术、电子顺磁共振技术以及红外光吸收方法研究了辐照产生的缺陷。结果表明: 电中性双空位是辐照产生的主要空位团; 在 4.3×10^{14} ions/cm² 的高剂量下未见样品发生非晶化转变; 虽然在离子射程末端双空位的浓度随剂量的增加而显著增大, 但在以电离激发过程为主要能损方式的区域里双空位的浓度基本不变。据此可以认为, 电子能损过程对辐照产生的缺陷有退火作用。

关键词 单晶硅 离子辐照 缺陷

1 引言

硅是广泛应用于现代工业和日常生活的重要半导体材料之一。由于离子注入技术在半导体工业中的应用, 人们对辐照在硅中引起的缺陷进行了深入的研究。过去的工作主要是对低能离子注入过程中产生的缺陷进行了研究, 在低能区, 缺陷主要是通过核碰撞过程产生的。近年来, 随着半导体器件向高集成度方向的发展, 高能重离子在半导体材料中的辐照效应的研究已成为国际性的研究热点, 在已开展的工作中, 人们观察到一些不同于低能注入时的实验现象^[1]。

本工作用 750MeV 氩离子在室温下对单晶硅样品进行了辐照, 通过正电子湮没寿命测量、电子顺磁共振 (EPR) 测量以及傅利叶变换红外光吸收 (FTIR) 测量技术对辐照产生的缺陷进行了研究。

2 实验

用兰州重离子加速器 (HIRFL) 提供的 750MeV 氩离子, 在室温下对厚约 320 μ m、表面沿 $\langle 111 \rangle$ 晶向的二个本征单晶硅样品进行了辐照, 剂量分别达到 9×10^{13} 和 4.3×10^{14} ions/cm²,

1998-09-11 收稿

* 中国科学院“九五”重点基金 (KJ952-S1-423) 和博士后科学基金资助项目

辐照期间对束流进行了横向扫描, 以确保在 $5\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的面积上获得均匀的辐照. EPR 谱是在室温下由一瓦里安 E115 型谱仪在 X 波段获取的, 测量期间样品的表面垂直于磁场方向, 谱仪微波功率设置为 2mW . 付里叶变换红外光吸收测量是在 Perkin Elmer 公司生产的 2000 型谱仪上进行的, 测量时谱仪分辨设置在 8cm^{-1} .

正电子寿命谱是在中国科学院近代物理研究所的快-快符合谱仪上进行测量的, 由 ^{60}Co 源在 ^{22}Na 窗下测得的谱仪时间分辨约为 244ps , 寿命谱测量期间样品的温度控制在 $(17 \pm 1)^\circ\text{C}$, 每个谱的累积计数约为 2×10^6 个. 由于在每个剂量点下只有一个辐照的 Si 样品, 故不能用常规的三明治方式进行寿命谱的测量, 这里采用了“未辐照 Si 样品-正电子源-辐照 Si 样品”的形式. 为了消除非对称测量造成的影响, 本工作在寿命谱分析中, 将部分未辐照 Si 样品对寿命谱的贡献作为源修正加以扣除. 由于所用 Si 样品的寿命成份很单一, 上述方法非常成功.

750MeV 氩离子在硅中的射程约为 $316\mu\text{m}$ (TRIM91 计算结果), 与样品的厚度相接近, 所以沿样品厚度方向产生的损伤不均匀. 由核能损过程产生的缺陷主要集中在靠近样品背面 (辐照面的反面) 的区域里, 而在离子射程末端之前直至辐照面的大部分区域里, 电子能损过程是离子损失能量的主要方式, 因而在正电子寿命谱的测量中采用了两种几何布局: 一种是将正电子源放在样品的辐照面一侧; 另一种是将正电子源放在样品辐照面的另一侧; 由于 ^{22}Na 正电子在材料中的分布是指数衰减型, 因而预计两种测量方式将给出不同的寿命谱.

3 结果和讨论

3.1 EPR 测量

图 1 给出了室温下测得的 EPR 谱. 由图可见, EPR 谱主要由代表中性四空位的 P3 心^[2,3]组成, 未见有代表单负电性双空位的 G7^[3]谱出现, 且在 $4.3 \times 10^{14}\text{ions}/\text{cm}^2$ 的高剂量下也未观察到相应于非晶相的顺磁共振峰 ($g \approx 2.0055$)^[3]. 注意到在低能离子注入实验中, 当通过核能损过程沉积的能量达 $10^{21}\text{keV}/\text{cm}^3$ 时就足以在室温下使硅非晶化^[4], 本实验中高剂量下沉积在离子射程末端的能量已高达 $3 \times 10^{21}\text{keV}/\text{cm}^3$ 而未能使硅非晶化的事实反映出高能离子注入与低能离子注入可能在损伤产生机理上有所不同, 其可能的解释是高能离子注入中大的电子能损对硅的非晶化转变过程有抑制作用^[1].

3.2 FTIR 测量

图 2 为辐照样和未辐照样红外光吸收谱, 由图可见, 辐照后样品在约 $1.8\mu\text{m}$ 的波长处有强的吸收峰出现, 其叠加在近边吸收带之上, 吸光度随着剂量的增大而增大. 由于未观察到相应于双负

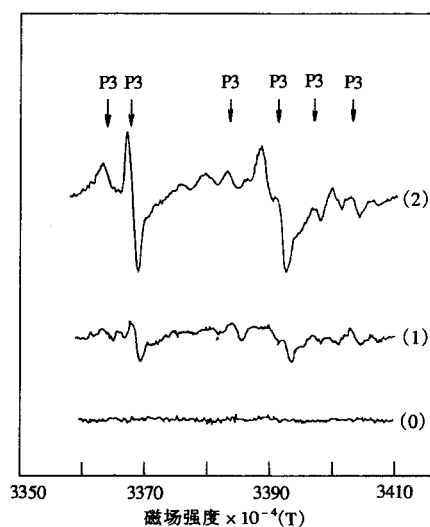


图1 室温下 750MeV 氩离子辐照本征单晶硅样品的 EPR 谱

$H//\langle 111 \rangle$, $\nu = 9.506\text{GHz}$; 辐照剂量分别为 (0) 0, (1) 9×10^{13} 和 (2) $4.3 \times 10^{14}\text{ions}/\text{cm}^2$.

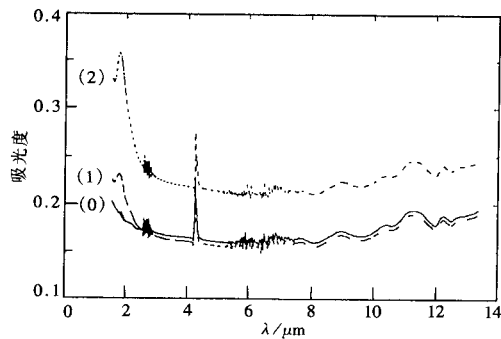


图2 750MeV氦离子辐照硅样品的红外吸收光谱
图中(0)、(1)和(2)分别指未辐照样、 9×10^{13} ions/cm² 辐
照样和 4.3×10^{14} ions/cm² 辐照样品的测量结果。

电性和单正电性双空位的吸收峰(分别在 $3.3\mu\text{m}$ 和 $3.9\mu\text{m}$ 处)^[5],而 $1.8\mu\text{m}$ 处的吸收峰可以由单正电性、单负电性、双负电性以及中性双空位产生^[5],因而结合 EPR 的测量结果我们断定,本实验中辐照在样品中主要产生了电中性的双空位,由相应的吸光度可求得^[6]在 9×10^{13} 和 4.3×10^{14} ions/cm²的剂量下,中性双空位的平均浓度分别为 1.4×10^{17} 和 $3.2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 。

3.3 正电子湮没寿命测量

对正电子寿命谱的二态自由拟合结果显示,在辐照样中有一长的寿命成份出现($\tau_2 \approx 286\text{ps}$),由于这一寿命比硅中正电子在单空位型缺陷(单空位、单空位与杂质原子复合体、双空位与杂质原子复合体等)中的寿命(约 270ps)^[7]长,因而推断辐照在材料中产生了大的空位团。虽然 EPR 测量结果显示有中性四空位存在,但对正电子寿命谱的分析却未能将其分离出来,这可能是由于四空位浓度低的缘故,因而认为本实验中中性双空位是辐照产生的主要空位团。已知双空位中正电子的寿命约为 320ps ^[7],故对正电子寿命谱进行了强制三态拟合,即将相应于单空位型缺陷和双空位的正电子寿命分别固定在 270ps 和 320ps 。表1给出了计算得到的相应缺陷对正电子的俘获率,其中 K_a 为单空位型缺陷对正电子的俘获率, K_D 为双空位对正电子的俘获率。由于在高剂量下将正电子源放在辐照面背面测得的寿命参数有违俘获模型^[8],因而未给出相应的俘获率,但表中给出了将样品背面化学减薄 $4\mu\text{m}$ 后的测量结果(由星号标

表1 750MeV氦离子辐照单晶硅样品正电子寿命谱的三态强制拟合结果

剂量 (ions/cm ²)	正电子源靠近辐照面		正电子源靠近辐照面背面	
	K_a/ns^{-1}	K_D/ns^{-1}	K_a/ns^{-1}	K_D/ns^{-1}
9×10^{13}	2.33	1.15	4.69	1.26
4.3×10^{14}	3.86	1.08	—	—
4.3×10^{14}	3.41*	1.19*	6.12*	2.35*

* 高剂量辐照样背面化学减薄 $4\mu\text{m}$ 后的结果。

出)。如表1所示,将正电子源放在未辐照面时所得的缺陷对正电子的俘获率要比将正电子源放在辐照面时的大,这表明在靠近未辐照面处,即在靠近离子射程末端,有更大的缺陷浓度。红外光吸收测量显示,化学减薄后有约25%的双空位消失。但在低剂量(9×10^{13} ions/cm²)时双空位对正电子的俘获率与正电子源的位置关系不大,约为 1.2ns^{-1} 。由于在低剂量辐照样中,电中性双空位的浓度约为 $1.4 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ (如图2所示),因而可知硅中中性双空位对正电子的特征俘获率约为 $9 \times 10^{-18}\text{cm}^3/\text{ns}$, Mascher^[7]等曾推测中性双空位的特征正电子俘获率的上限为 $2 \times 10^{-17}\text{cm}^3/\text{ns}$ 。增大辐照剂量后,各类缺陷的浓度应增大,但实验发现,在将正电子源放在样品的辐照面进行测量时,双空位的浓度随剂量的变化很小,约为 $1.3 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 。由于在硅中94%以上的正电子是湮没在前 $300\mu\text{m}$ 的范

围内的,因而认为将正电子源放在辐照面进行的测量,主要反映了在电子能损起主要作用的区域里缺陷的产生情况,双空位浓度在这一区域里的饱和现象表明,电子能损过程对由核能损过程产生的缺陷有退火作用.

4 总结

室温下用 750MeV 氦离子对 320 μm 厚的本征单晶硅样品进行了辐照,对辐照后的样品进行了正电子寿命测量、电子顺磁共振测量以及红外光吸收测量. 其主要结果如下:

(1) 电中性双空位是辐照产生的主要空位团,在电子能损为主的区域里中性双空位的浓度在较低的剂量下就已饱和;

(2) 电中性双空位对正电子的特征俘获率约为 $9 \times 10^{-18} \text{cm}^3/\text{ns}$;

(3) $4.3 \times 10^{14} \text{ions}/\text{cm}^2$ 的高剂量辐照未使硅样品发生非晶化转变.

上述结果表明,大的电子阻止本领对辐照产生的损伤有退火作用,而且,在本实验的条件下,纯的电子能损过程不可能使硅非晶化.

参 考 文 献

- 1 Varichenko V S, Zaitsev A M, Kazutchits N M et al. Nucl. Instr. and Meth., 1996, **B107**:268
- 2 Daly D F, Pickar K A. Appl. Phys. Lett., 1969, **15**:267
- 3 Brower K L, Beezhold W. J. Appl. Phys., 1972, **43**:3499
- 4 Dennis J R, Hale E B. J. Appl. Phys., 1978, **49**:1119
- 5 Cheng L J, Corelli J C, Corbett J W et al. Phys. Rev., 1966, **152**:761
- 6 Stein H J, Vook F L, Border J A. Appl. Phys. Lett., 1969, **14**:328
- 7 Mascher P, Dannefaer S, Kerr D. Phys. Rev., 1989, **B40**:11764
- 8 Zhu Zhiyong, Hou Mingdong, Jin Yunfan et al. Nucl. Instr. and Meth., 1998, **B135**:260

Study of Defects in Silicon Irradiated With High Energy Ar Ions*

Zhu Zhiyong Hou Mingdong Jin Yunfan Li Changlin

Liu Changlong Zhang Chonghong Sun Youmei

(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract Single crystalline silicon specimens are irradiated at room temperature with 750MeV argon ions. Positron lifetime, electron paramagnetic resonance as well as infrared optical absorption measurements are conducted to study the radiation induced defects in the specimens. It is found that neutral divacancies are the main vacancy clusters induced by the irradiations. Up to 4.3×10^{14} ions/cm² no amorphous phase is detected. At the end of the range the divacancy concentration increases dramatically with increasing dose whereas in the electronic processes dominating area the concentration of divacancy saturates. It is therefore proposed that the radiation induced defects can be annealed by the energy deposition through electronic processes.

Key words single crystalline silicon, ion irradiation, defects

Received 11 September 1998

* Project Supported by Chinese Academy of Sciences(KJ952-S1-423) and the Chinese Postdoctoral Foundation