

## 低能离子溅射引起表面损伤的研究

周祖尧 任琮欣 陈国明 胡嘉增 杨洁 傅新定 邹世昌

(中国科学院上海冶金研究所)

朱德彰 曹德新

(中国科学院上海原子核研究所)

本文应用背散射沟道技术研究了低能离子轰击不同晶向表面所引起的晶格损伤与离子能量、剂量的关系,讨论了损伤形成的动力学过程。

关键词: 溅射 损伤 刻蚀

### 一、引言

低能离子溅射在表面分析、样品剥层以及微细加工中具有独特的优点<sup>[1,2]</sup>,然而离子溅射引起晶体损伤却使得它在半导体器件上的应用受到限制。Deppe<sup>[3]</sup>和Yano<sup>[4]</sup>等人曾用背散射沟道技术测定过离子束刻蚀后硅表面的损伤并用MOS电容电压法等技术测定了损伤对半导体器件性能的影响。本文应用背散射沟道技术研究了低能离子轰击不同晶向硅单晶表面所引起的晶格损伤与离子能量、剂量的关系,并讨论了损伤形成的动力学过程。

### 二、实验

1. 样品制备 P型<100>和<111>硅片,电阻率为5—10 $\Omega$ ·cm,表面经SiO<sub>2</sub>胶体抛光,然后刻成8×25mm<sup>2</sup>小片,分成六个区域以进行不同条件的刻蚀。刻蚀前硅片均经清洗。

2. 溅射条件 用自制的LK-1离子束刻蚀机<sup>[5]</sup>刻蚀硅片。所用氩离子能量范围为300—1500eV;剂量范围为 $8 \times 10^{13}$ — $2.25 \times 10^{19}$ 离子/cm<sup>2</sup>;束流强度为0.01—1.0mA/cm<sup>2</sup>不等,视所要求的剂量而定;离子束入射角均为0°;用半导体致冷器使硅片温度不超过50°C;氩离子剂量用法拉第筒及束流积分仪测定。

3. 背散射分析 用180keV He<sup>+</sup>作分析束,束斑直径<1mm,束发散度 $\leq 0.05^\circ$ 。用金硅面垒半导体探测器探测135°方向的背散射粒子,系统能量分辨率为6keV,深度分辨率为~150Å。从背散射能谱(图1)中损伤峰的面积求出损伤层中的移位原子数 $N_D$ (指偏离正常晶格结点0.2Å以上的原子),进而换算成损伤层的厚度。并用Della Mea<sup>[6]</sup>介绍的方法,即从定向谱中减去归一化的随机谱来求得损伤峰的面积 $A_{Si}$ 。考虑到表面第一层原子及其热振动,必须从 $A_{Si}$ 中扣除1.7原子层对背散射产额的贡献<sup>[7]</sup>。

### 三、结果

1. 损伤与剂量的关系 用1keV氩离子以0°入射角溅射P型<100>硅单晶。硅表面移位原子数与氩离子剂量的关系示于图2。起先移位原子数随剂量的增加而增加,至 $5 \times 10^{15}$ 离子/cm<sup>2</sup>时,损伤接近无定形,离子剂量再进一步增加损伤量无明显变化,这表明当剂量 $D \geq 5 \times 10^{15}$ 离子/cm<sup>2</sup>时损伤层厚度不再增加,而只是以与溅射相同的速率向体内推进。

2. 损伤与能量的关系 用 $1.8 \times 10^{18}$ 离子/cm<sup>2</sup>的相同剂量,但以300、600、1000、1300eV

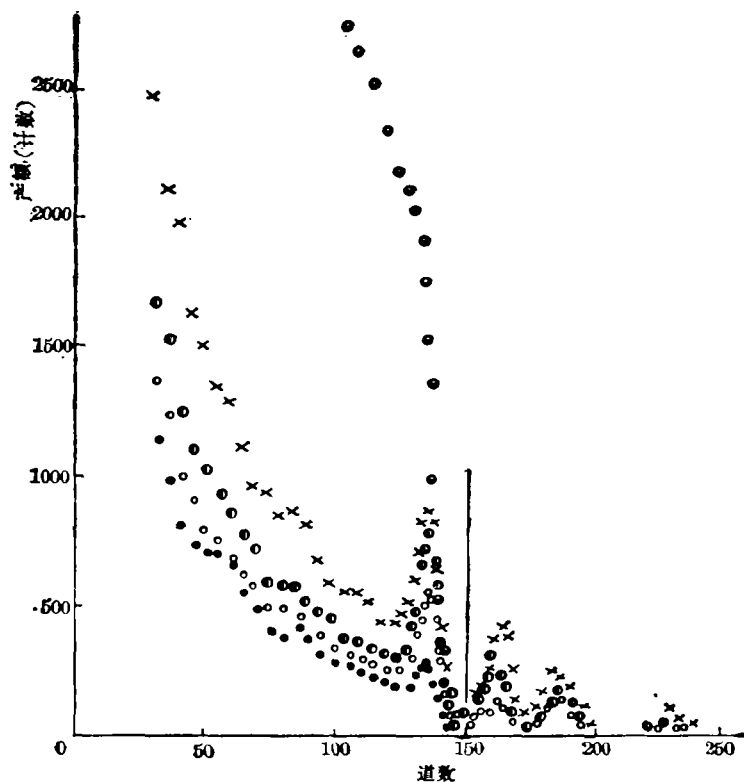


图1 经不同剂量氩离子溅射后硅的背散射能谱图

Ar<sup>+</sup>溅射<100>Si 溅射能量  $E_s=1000\text{eV}$  ● 随机谱 × 损伤定向( $4.7 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ ) ○ 损伤定向( $3.6 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ ) ○ 损伤定向( $8 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ ) ● 光片定向<100>

能量的氩离子溅射 P型<100>硅, 表面移位原子数的测量结果列于表1。结果表明移位原子数  $N_D(E) \propto E^{0.6}$ 。

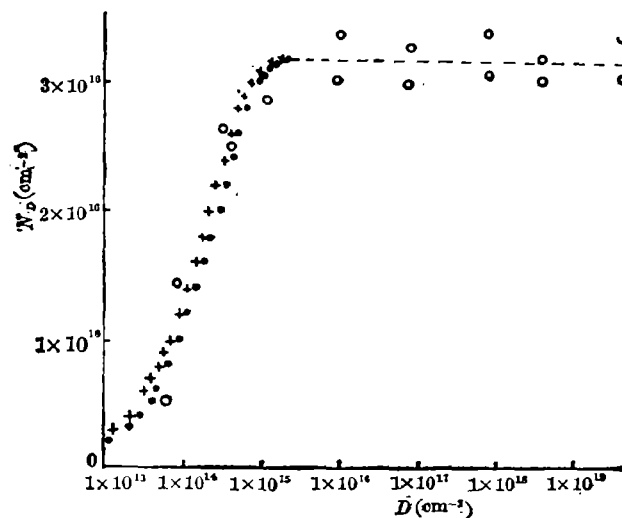


图2 移位原子数与 Ar<sup>+</sup>剂量的关系

○ 实测值 +  $V_0=1$   $Ed=5.52\text{eV}$  ●  $V_0=1$   $Ed=7.36\text{eV}$

3. 损伤与晶向的关系 在相同的溅射条件下, 不同晶向的 P型硅单晶的表面移位原子数如表 2 所示。由表可见, 不同晶向的硅单晶的表面移位原子数并无明显差别。

表1 不同能量氩离子溅射后硅单晶的  $N_D$  值

| 氩离子能量 $E$<br>(eV)                                      | 300  | 600  | 1000 | 1300 |
|--------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| 移位原子数 $N_D(E)$<br>( $1 \times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ ) | 1.43 | 2.28 | 3.20 | 3.64 |
| 损伤层厚度 $T$<br>(实验值 Å)                                   | 28.6 | 45.6 | 61   | 72.8 |
| 平均投影射程 $R_p$<br>(计算值 Å)                                | 14.6 | 22.1 | 30   | 35.1 |
| $T/R_p$                                                | 1.98 | 2.1  | 2.1  | 2.1  |

\*  $T \approx R_p + \Delta R_p$

#### 四、讨 论

1. 关于损伤与剂量的关系 对于给定的离子和靶, 在一定的能量下离子的平均射程是个定值。由于离子轰击形成的损伤层厚度  $T$  可取  $T \approx R_p + \Delta R_p$ 。式中,  $R_p$  为入射

离子的平均投影射程;  $\Delta R_p$  为平均投影射程的标准偏差。由此可估算硅表面损伤层中原子的移位率  $\eta = N_D / T n_0 (\eta \leq 1)$ 。式中,  $N_D$  为移位原子总数;  $n_0$  为硅原子体密度。对每一入射离子而言, 随着  $\eta$  的增加, 它平均所能产生的移位原子有效数将减少。相反每一离子平均溅射出的原子数将随  $\eta$  的增加而增加。每一入射离子在靶中所产生的移位原子数为  $(E_0 / 2Ed)(1 - \eta) - \gamma\eta$ 。式中,  $E_0$  为入射能量;  $Ed$  为移位阈能;  $\gamma$  是溅射率。靶中移位原子(或空位)的复合能力可用复合体积  $V$  来表示<sup>[1]</sup>。我们认为复合体积  $V$  随损伤层中原子移位率  $\eta$  的增加而减小, 即  $V = V_0(1 - \eta)$ 。式中,  $V_0$  为最大的复合体积, 其值可由实验确定。当损伤达到无定形时, 复合体积接近于零。由于靶原子移位、溅射和复合过程同时发生, 因此任一时刻移位原子数  $N_D$  随入射离子剂量  $D$  的变化具有如下关系:

$$dN_D = [(E_0 / 2Ed)(1 - \eta) - \gamma\eta][1 - \eta V_0(1 - \eta)]dD = [(E_0 / 2Ed) \cdot (T n_0 - N_D) / T n_0 - \gamma(N_D / T n_0)][1 - (N_D / T n_0) \cdot V_0 \cdot (1 - N_D / T n_0)]dD \quad (1)$$

解上述微分方程可得  $D = F(N_D)$  的解析解为:

$$D = \frac{T n_0}{2 \left[ \left( \frac{E_0}{2Ed} + \gamma \right)^2 - \frac{E_0}{2Ed} V_0 \left( \frac{E_0}{2Ed} + \gamma \right) + V_0 \left( \frac{E_0}{2Ed} \right)^2 \right]} \left\{ \left( \frac{E_0}{2Ed} + \gamma \right) \cdot \ln \frac{\left( \frac{E_0}{2Ed} \right)^2 \left[ 1 - \frac{V_0 N_D}{T n_0} + V_0 \frac{N_D^2}{(T n_0)^2} \right]}{\left[ \frac{E_0}{2Ed} - \left( \frac{E_0}{2Ed} + \gamma \right) \frac{N_D}{T n_0} \right]^2} + \frac{2 \left[ \frac{V_0 E_0}{Ed} - V_0 \left( \frac{E_0}{2Ed} + \gamma \right) \right]}{\sqrt{4V_0 - V_0^2}} \cdot \left[ \arctg \frac{2 \frac{V_0 N_D}{T n_0} - V_0}{\sqrt{4V_0 - V_0^2}} + \arctg \frac{V_0}{\sqrt{4V_0 - V_0^2}} \right] \right\} \quad (2)$$

在我们的实验条件下,  $E_0 = 1000 \text{ eV}$ ; 氩离子对硅的溅射率  $\gamma = 0.66$  原子/离子;  $T = 64 \text{ \AA}$ ;  $n_0 = 5.0 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ;  $V_0$  分别取 1、2、3。  $Ed$  是移位阈能, 在低剂量时  $Ed$  应取四倍键能值 (7.36 eV), 而高剂量时应采用两倍键能值 (3.68 eV)<sup>[9]</sup>。我们分别采用上述两个数值作了计算, 也采用平均值 5.52 eV 作了比较 (图 2), 计算所得的曲线形状与实验值基本相符。从以上讨论可知, 当移位原子的产生速率等于溅射率时就达到动态平衡, 即硅表面的溅射速率与损伤向体内推进的速率相同。由 (1) 式可知, 要达到动态平衡,  $\eta$  应为 99%。因此在饱和剂量下, 硅表面损伤层为无定形, 其厚度仅由离子的射程所决定。图 3 形象地示出了低能离子溅射硅单晶时硅表面损伤层的形成与溅射的动态过程。

2. 关于损伤与能量的关系 按 Sigmund 的溅射理论<sup>[10]</sup>, 离子的平均投影射程  $R_p \propto E^{2m}$ , 当能量  $E$  处于几百到一千电子伏范围内时,  $m = 0.3$ , 因此  $R_p \propto E^{0.6}$ , 表 1 中列出了不同能量时的  $R_p$  值, 并将同一剂量 ( $D = 10^{18}$  离子/ $\text{cm}^2$ ) 不同能量氩离子溅射硅表面所产生的移位原

表 2 <111>、<100> 硅在同剂量下的移位原子数\*

| 剂量(离子/ $\text{cm}^2$ ) |       | $5.6 \times 10^{17}$  | $1.9 \times 10^{18}$  | $1 \times 10^{19}$    |
|------------------------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 晶 向                    | <111> | $3.94 \times 10^{16}$ | $3.85 \times 10^{16}$ | $4.18 \times 10^{16}$ |
|                        | <100> | $3.45 \times 10^{16}$ | $3.40 \times 10^{16}$ | $3.60 \times 10^{16}$ |

\* 入射离子能量  $E = 1 \text{ keV}$

子数实验测量值换算成损伤层厚度 $T$ 。在 300 至 1300eV 能量范围内,损伤层厚度与离子射程 $R_p$ 的比值为常数 $\sim 1.6$ ,可见移位原子数 $N_D(E) \propto E^{0.6}$ ,也服从 Sigmund 理论。

## 五、结 论

1. 低能氩离子(300—1300eV)溅射硅单晶,在低剂量时损伤随剂量增加而增加,当剂量大于 $5 \times 10^{15}$ 离子/cm<sup>2</sup>时,损伤层厚度不再增加,而只是以与溅射相同的速率向体内推进。损伤层为无定形,其厚度由离子的平均投影射程所决定。

2. 在饱和剂量下,硅表面损伤层厚度 $T \propto E^{0.6}$ 。

3. 低能氩离子溅射不同晶向的硅造成的损伤无明显差别。

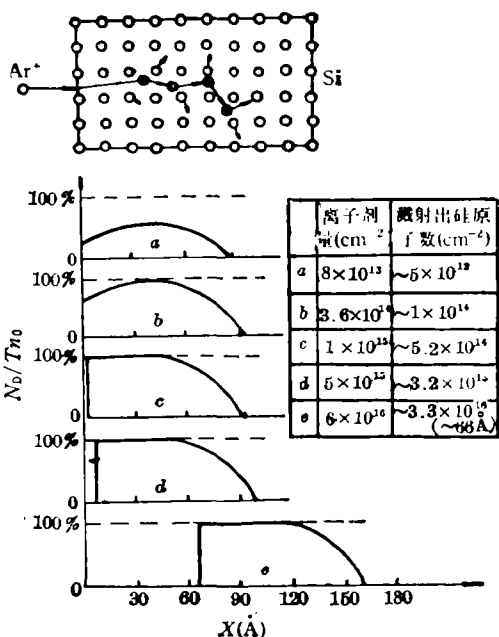


图3 低能离子溅射硅单晶产生损伤的动态过程

## 参 考 文 献

- [1] D. Bollinger and R. Fink, *Solid State Technol.*, 23, 11, 79(1980); 23, 12, 97(1980).
- [2] 陈国明等, 电子技术, 10, 5(1980).
- [3] H. R. Deppe et al., *Electronics*, 20, 1, 51 (1977).
- [4] H. Yano et al., *Proceedings of the symposium on electron and ion beam science and technology 8th international conference*, 1978, p. 582.
- [5] 张玉春等, 电子与自动化, 4, 51(1980).
- [6] S. Datz et al. ed., *Atomic collisions in solids*, Vol. 2.
- [7] T. W. Sigmon et al., *Appl. Phys. Lett.*, 24, 105(1974).
- [8] Chr. Lenmann, *Interaction of radiation with solids and elementary defect production*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1977, p. 175.
- [9] P. Sigmund, *Appl. Phys. Lett.*, 14, 3, 114(1969).
- [10] P. Sigmund, *Sputtering by ion bombardment: Theoretical concepts*, Physics Institute, Odense University, 1980, p. 30.
- [11] E. Bøgh, *Can. J. Phys.*, 46, 653(1968).

(1985年6月6日收到)

(上接第6页)

- [4] C. K. Meins et al., *ibid*, 71, 13 (1983).
- [5] B. H. Cooper and T. A. Tombrello, *ibid*, 80, (3/4), 203(1984).
- [6] M. H. Menaenhall et al., *CALTECH BAP -29, July* (1982); B. T. Werner et al., *Thin Solid Films* 104, 163 (1983).
- [7] S. Jacobson et al., *Thin Solid Films*, 107, 89(1983).
- [8] I. V. Mitchell et al., *Appl. Phys. Lett.*, 44, 193 (1984).
- [9] I. V. Mitchell et al., *Appl. Phys. Lett.*, 45, 137 (1984).
- [10] T. A. Tombrello, *Int. J. Mass. Spectrom. Ion Phys.*, 53, 307 (1983).
- [11] R. L. Headrick and L. E. Seibering, *Appl. Phys. Lett.*, 45, 388(1984)
- [12] Y. Qiu, et al, *Nucl. Instr. Meth.*, B1, 118 (1984).
- [13] C. R. Wie et al., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. November*, 35, 305 (1985).
- [14] R. P. Livi et al., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. November*, 31, 467 (1984).
- [15] C. R. Wie et al., *Nucl. Instr. Meth.*, B9, 20(1985).

## Abstracts in English

### The enhanced adhesion caused by fast heavy ion beam

Qiu Yuanxun

(Lanzhou University, Academia Sinica)

**Keywords:** heavy ion    adhesion    interface    sputtering

### Investigation of Si surface damage induced by low energy ion sputtering

Zhou Zuyao    Ren Congxin    Chen Guoming    Hu Jiazeng

Yang Jie    Fu Xinding    Zou Shichang

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

Zhu Dezhang    Cao Dexin

(Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica)

Silicon crystal lattice damage induced by low energy ions is measured by RBS and channeling. The dependence of the lattice damage on crystal orientation, ion energy and dose is investigated. The kinetics of damage formation is discussed.

**Keywords:** sputtering    damage    etching

### A compact sputtering PIG ion source

Yu Jinxiang

(Peking University)

A compact sputtering PIG ion source with end extraction was described, which can produce both gas and metal ions from cathode materials. The magnetic field is provided by a SmCo permanent magnet. Using Ar and  $\text{BF}_3$  as the discharge gas when discharge power was about 30 W, 500—680  $\mu\text{A}$  for  $\text{Ar}^+$ , 150  $\mu\text{A}$  for  $\text{Ar}^{2+}$  and 100—130  $\mu\text{A}$  for  $\text{B}_{11}^+$  beam intensities were produced. With argon auxiliary gas, we have got 70  $\mu\text{A}$  for  $\text{Zr}^+$ ,  $\text{Fe}^+$ ,  $\text{Al}^+$  etc., 50—60  $\mu\text{A}$  for  $\text{Ta}^+$  and about 30  $\mu\text{A}$   $\text{Ti}^+$ ,  $\text{Mo}^+$  metal ions beam intensities. The beam intensity of double charge metal ions were usually  $1/2$ — $1/5$  of that of single charge metal ions.

**Keywords:** SmCo permanent magnet    sputtering PIG ion source