

## 金属薄片上无定形硅(SOM)的激光再结晶研究

林成鲁 邢昆山 陈莉芝 许学敏 谭松生 邹世昌

(中国科学院上海冶金所离子束开放实验室, 200050)

**提要:** 以 CW Ar<sup>+</sup> 激光对非晶硅再结晶得到了 SOM(Silicon on Metal)多晶硅新材料。其晶粒大小为  $10 \times 40 \mu\text{m}^2$ , 杂质分布均匀, 电学性能大大改善。用这种 SOM 材料已制备成功在 1 bar 压力范围内灵敏度为 6 mV/V 的性能良好的压力传感器。

**关键词:** 激光再结晶, SOM 材料, 压力传感器

### A study of laser recrystallization of SOM (Silicon On Metal) material

*Lin Chenglu, Xing Kunshan, Chen Lizhi, Xu Xuemin, Tan Songsheng, Zou Shichang*

(Ion Beam Laboratory, Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai)

**Abstract:** CW Ar<sup>+</sup> laser irradiation was used to recrystallize a-Si film, and the grain was increased to more than  $10 \times 40 \mu\text{m}^2$ , the concentration profile of impurities became uniform and the electrical properties of SOM were improved significantly. The pressure transducer made of this material has a pressure sensitivity of 6 mV/V at the pressure range of 1 bar.

**Key words:** laser recrystallization, SOM, pressure transducer

本文报告了用辉光放电的方法在 SiO<sub>2</sub> 复盖的玻莫合金薄片上沉积非晶硅, 然后用 CW Ar<sup>+</sup> 激光再结晶的 SOI 技术<sup>[1]</sup>获得晶粒大、杂质浓度分布均匀、硅和金属衬底间电绝缘性好的 SOM 压阻材料。利用这种材料, 我们已经制备了性能良好的 SOM 压力传感器<sup>[2]</sup>。本文着重研究激光辐照 SOM 材料的物理效应以及激光再结晶 SOM 材料的物理和电学性质。

### 实 验 方 法

SOM 样品的制备过程如下: 在玻莫合金薄片(厚约 300 μm)上, 用化学气相沉积法(CVD)沉积 1 μm SiO<sub>2</sub> 以形成绝缘层, 然后用辉光放电沉积 0.5 μm 非晶硅(α-Si), 在 α-Si 中注入 60 keV,  $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$  的 B<sup>+</sup> 或 180 keV,  $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$  的 As<sup>+</sup>。以 CW Ar<sup>+</sup> 激光对 α-Si 辐照再结晶, 激光功率 2~6 W, 聚焦后的束斑直径 40~60 μm, 激光束在样品上 x 方向扫描速度 4 cm/s, y 方向每次步进 20 μm, 样品预热 300~400°C。

用离子背散射分析了激光再结晶前后的硅薄膜中杂质分布, 用透射电镜和 Raman 光谱分析了硅膜的结构, 用四探针测量了样品的电学性质。并利用了这种 SOM 材料制备了压力传感器, 测出了电阻温度系数和压阻因子。

## 结果与讨论

### 1. 激光再结晶 SOM 材料的电学性质

图 1 是激光再结晶硅薄膜的薄层电阻随激光功率变化的关系曲线。随着激光功率的增加, 硅膜的薄层电阻下降, 说明杂质的激活率升高。与透射电镜对硅膜晶粒的分析相对照, 可证明在激光功率 3.2W 时薄层电阻的突变对应着  $\alpha$ -Si 向大晶粒多晶硅的相变。从图 1 可知, 在合适的激光功率下, 薄层电阻降低至  $60 \Omega/\square$  左右。

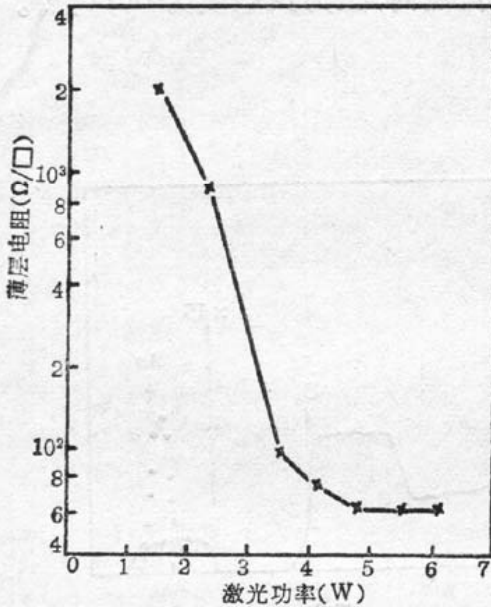


图 1 激光再结晶 SOM 样品薄层电阻随激光功率的变化

硅膜中注入  $60 \text{ keV}$ ,  $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$  的  $\text{B}^+$

的变化相一致。将再结晶硅 Raman 峰与单晶硅 Raman 峰进行比较, 发现再结晶硅 Raman 峰存在小的声子频移  $\Delta\omega$ 。Englert<sup>[3]</sup>指出, 对受到平面二维张应力的硅膜, 其光学声子  $O(T)$  向

测得激光再结晶 SOM 材料的电阻温度系数为: 对  $60 \text{ keV}$ ,  $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$   $\text{B}^+$  注入的样品, 该膜的电阻温度系数在  $300 \sim 500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  之间<sup>[2]</sup>。

### 2. 激光再结晶 SOM 材料的结构分析

图 2 是激光再结晶后 SOM 样品硅膜的透射电镜照片。激光辐照后,  $\alpha$ -Si 结晶为多晶硅, 晶粒的平均尺寸, 长为  $40 \mu\text{m}$ , 宽为  $10 \mu\text{m}$ , 电子衍射呈单晶硅花样。

以 Raman 光谱分析不同激光功率辐照后的硅膜, 所得结果如图 3 所示。图中可见, 随着激光功率的增加, Raman 峰强度变大, 同时移向单晶硅的峰值位置  $520 \text{ cm}^{-1}$ , 其变化的趋势与图 1 所示的薄层电阻的

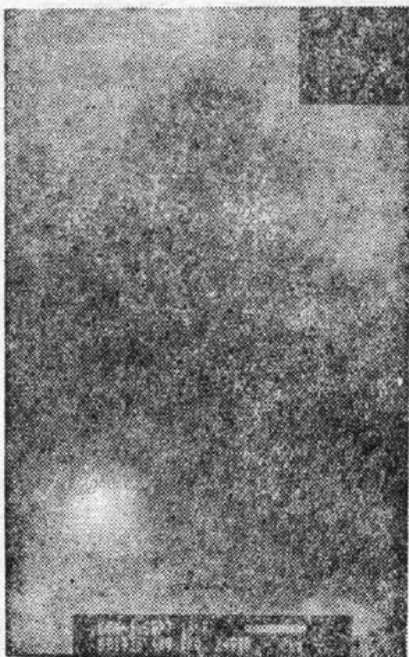


图 2 经  $4.2 \text{ W}$  激光功率辐照后硅膜的透射电镜照片

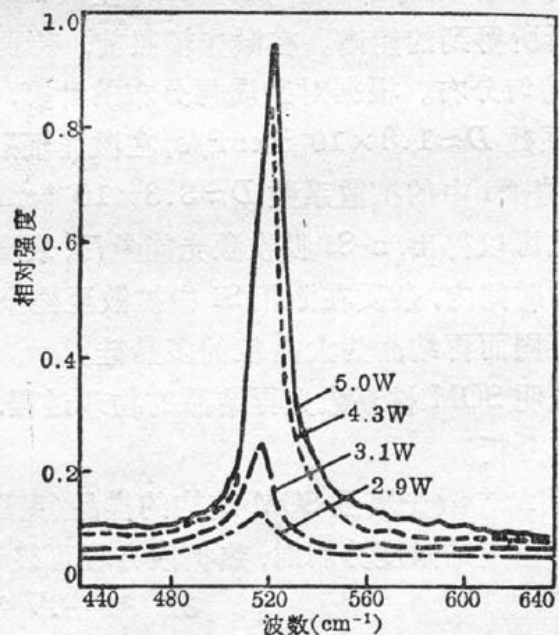


图 3 不同功率激光辐照后样品的 Raman 谱硅膜中注入  $60 \text{ keV}$ ,  $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$  的  $\text{B}^+$

低频方向移动,所受应力  $\tau$  与声子移频量  $\Delta\omega$  之间有如下关系:

$$\tau = -2.5 \times 10^9 (\text{dyne/cm}) \Delta\omega (\text{cm}^{-1}) \quad (1)$$

从实验测得的  $\Delta\omega = -1 \text{ cm}^{-1}$ , 故应力  $\tau$  为  $2.5 \times 10^9$  达因, 这种应力是很小的。

### 3. 激光再结晶 SOM 材料的压阻性质

用悬臂法<sup>[2]</sup>测试 SOM 材料的压阻因子, 对于注入  $60 \text{ keV}$ 、 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2 \text{ B}^+$  的样品, 其压阻因子 (GF) 值达 35。利用激光再结晶的 SOM 材料, 制备了四电阻桥式压力传感器, 其桥路输出电压随压力变化的曲线如图 4 所示, 在  $0 \sim 1.0 \text{ bar}$  压力范围内, 压力灵敏度为  $6 \text{ mV/V}$ 。

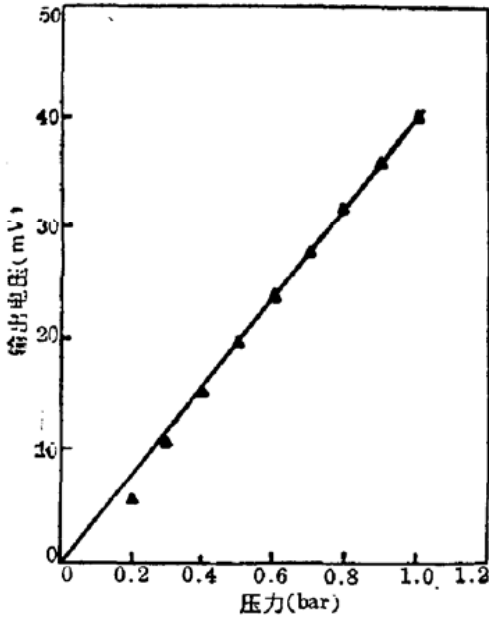


图 4 SOM 压力传感器桥路输出电压与压力的关系。硅膜中注入  $60 \text{ keV}$ 、 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2 \text{ B}^+$ , 激光再结晶功率  $4.2 \text{ W}$

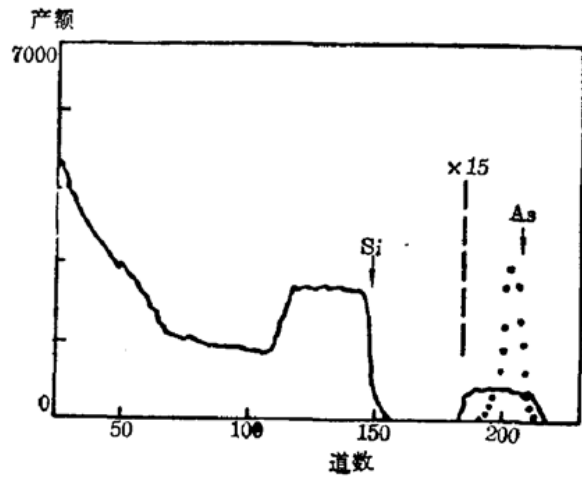


图 5 SOM 样品中注入  $180 \text{ keV}$ 、 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2 \text{ As}^+$ , 以  $4.2 \text{ W}$  激光辐照后用  $2 \text{ MeV He}^+$  作背散射分析所得到的能谱

### 4. 激光辐照 SOM 材料引起杂质分布的变化以及温度场分布的分析

图 5 为  $180 \text{ keV}$ 、 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2 \text{ As}^+$  注入 SOM 样品, 经激光再结晶前后以  $2 \text{ MeV He}^+$  作背散射分析所得到的能谱。在激光辐照前, 杂质浓度呈高斯分布, 辐照后, 注入的 As 在整个 Si 层中呈均匀分布。根据对杂质再分布的计算, 可说明再结晶的机制。  $1200^\circ\text{C}$  时 As 在固相 Si 中扩散系数  $D \approx 1.8 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 在激光辐照的  $1.5 \times 10^{-3} \text{ s}$  时间内不可能实现平均分布; 而 As 在激相 Si 中的扩散系数  $D \approx 3.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 在激光辐照的时间里则可以使杂质平均分布。由此可以得出,  $\alpha\text{-Si}$  吸收激光能量后, 表面开始熔化, 并迅速推进至  $\alpha\text{-Si}/\text{SiO}_2$  界面, 在激光辐照的时间内, 杂质在激相 Si 中扩散至整个 Si 层。激光扫描过去后, 激相 Si 从 Si/SiO<sub>2</sub> 界面开始凝固而再结晶为大晶粒的多晶硅。

为了说明 SOM 材料激光再结晶的物理过程, 我们对激光辐照 SOM 材料时的温度场分布进行了计算分析。

以 CW  $\text{Ar}^+$  激光辐照 SOM 结构的样品 (见图 6), 激光沿  $x$  方向以速率  $V$  扫描, 样品在瞬间达到一个稳定的温度分布时, 热扩散方程可表示为:

$$\partial T / \partial t - D \nabla^2 T = Q / C_p \quad (2)$$

式中  $T$  为不考虑导热系数随温度变化的线性温度,  $D$  和  $C_p$  分别为样品的热扩散系数和热容量,  $Q$  为样品所吸收的激光热源,

$$Q = \frac{P(1-R)}{2\pi r^2} \exp\left[-\frac{(x-Vt)^2 + y^2}{2r^2}\right] f(z) \quad (3)$$

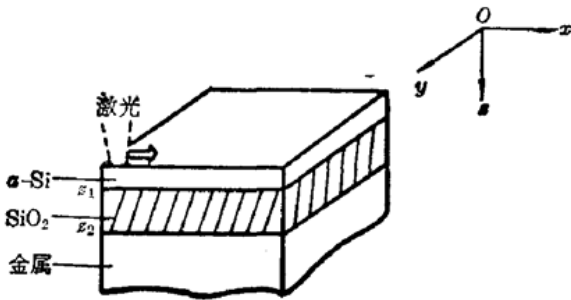


图 6 激光辐照 SOM 材料示意图

其中  $P$  为激光总功率,  $R$  为样品表面的反射率,  $r$  为高斯光束半径,  $f(z)$  为样品在  $z$  方向对激光能量的吸收系数。

采用 Green 函数的方法对方程 (2) 求解, 可以得到温度分布的解析解。对表面中心 ( $x=y=z=0$ ), 在激光扫描速率  $V$  较小 ( $V=0$ ) 的情况下, 得到表面中心最高温度  $\theta_{\max}^{[4]}$ :

$$\theta_{\max} = P(1-R)/2\sqrt{2\pi} C_p D r \quad (4)$$

考虑到导热系数  $k$  随温度变化的情况,

$$k(T) = C_p D(T) = A/(T-B) \quad (5)$$

其中  $A=299 \text{ W/cm}$ ,  $B=99 \text{ K}$ , 利用 Kirchoff 变换<sup>[5]</sup>, 得到真实温度  $T_{\max}$  与计算温度  $\theta$  的关系:

$$T_{\max} = B + (T_{\text{sub}} - B) \exp\left[\frac{C_p D(T_{\text{sub}})}{A} \theta\right] \quad (6)$$

式中  $T_{\text{sub}}$  为样品的衬底温度。

为了求出温度与其它参数的关系, 必须进行数值计算, 为此定义:

$$\eta = \frac{\theta}{\theta_{\max}} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{du}{u^2+1} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(X+Vu^2)}{u^2+1} + \frac{Y^2}{u^2+1} + \frac{Z^2}{u^2}\right]\right\} \quad (7)$$

式中  $X=x/r$ ,  $Y=y/r$ ,  $Z=z/r$ ,  $V=vr/2D$ ,  $v$  为激光扫描速度,  $u = (-2Dt'/r^2)^{1/2}$ ,  $t'$  为 Green 函数的时间变量。

由于 Si、SiO<sub>2</sub> 和金属层热扩散系数不同, 为计算温度场的深度分布, 引入如下关系<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} dz' = (D_1/D_2) dz \\ dz' = (D_1/D_3) dz \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  分别为 Si、SiO<sub>2</sub> 和金属层的热扩散系数,  $z'$  是几何变换后的新坐标,  $z$  为真实深度坐标, 两种坐标尺寸变换如下:

$$\begin{cases} \text{在 Si 层,} & z' = z \\ \text{在 SiO}_2 \text{ 层,} & z' = z_1 + (z-z_1)\sqrt{D_1/D_2} \\ \text{在金属层,} & z' = z_1 + (z_2-z_1)\sqrt{D_1/D_2} + (z-z_2)\sqrt{D_1/D_3} \end{cases} \quad (9)$$

其中  $z_1$ 、 $z_2$  分别为 Si-SiO<sub>2</sub> 界面和 SiO<sub>2</sub>-金属界面的坐标, 这种变换后我们可用  $D_1$  作为三层的热扩散系数从而使多层结构的计算转换为均匀单层介质的计算。计算中取  $D_1 = 0.64 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $D_2 = 0.85 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $D_3 \approx 1.6 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 利用 (7) 式的数值积分得到 CW Ar<sup>+</sup> 激光辐照样品时的温度场随深度的分布如图 7 所示。从图 7 可见, 在本实验所选定 (下转第 411 页)

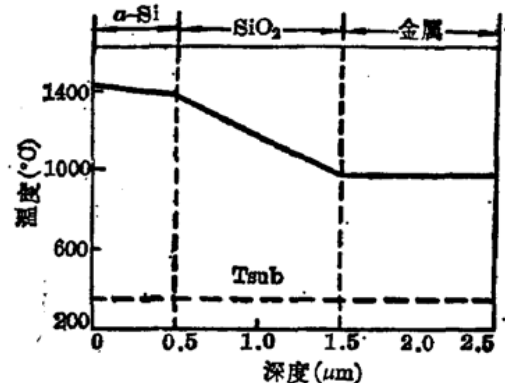


图 7 Ar<sup>+</sup> 激光辐照 SOM 样品时温度随深度的分布。激光功率 4.5W, 束斑  $\phi 40 \text{ mm}$ , 样品预热 300°C

$$E_{\lambda} = \int B_{\lambda} g(\Omega) d\Omega \quad (16)$$

与发射的总功率  $E$

$$E = \int E_{\lambda} d\lambda \quad (17)$$

由此可求得 X 光的转换效率  $\eta$ :

$$\eta = (1/E_L) \int E dt \approx Et/E_L \quad (18)$$

$E_L$  为入射激光能量

### 参 考 文 献

- 1 T. Mochizuki *et al.*, *Phys. Rev. A*, **33**, 525 (1986)
- 2 D. Duston, J. Davis, *Phys. Rev. A*, **23**, 2602 (1981); A. V. Vigogradov, V. N. Shlyapisev, *Sov. J. Quant. Electr.*, **17**(1), 1(1987)
- 3 J. A. Cobble *et al.*, *Phys. Rev. A.*, **39**, 454 (1989); G. Kuhnle *et al.*, *Appl. Phys. B*, **47**, 361 (1988); D. L. Matthews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **54** 110 (1985); W. C. Mead *et al.*, *Phys. Fluids*, **27**, 1302 (1984)
- 4 N. M. Ceglio *et al.*, AIP Proceedings Conference No. 75, American Institute of Physics, 1981, ed. by D. T. Attwood and B. L. Henke, 290
- 5 K. Eidman, T. Kishimoto, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 377 (1986)
- 6 N. M. Ceglio *et al.*, *Appl. Opt.*, **22**, 318 (1983); N. M. Ceglio, H. Meddecki, *SPIE*, **688**, 26 (1986)
- 7 Dr. Johannes Heidenhain GMBH, D-8225, FRG; T. Kishimoto, MPQ Report, **MPQ108' 41**(1985)
- 8 M. Born, E. Wolf, *Principle of Optics*, 2nd ed., Pergaman Press, 1964, 406
- 9 H. W. Schnopper, *et al.*, *Appl. Opt.*, **16**, 1088 (1981)
- 10 R. Pakula, *MPQ Report*, **MPQ95**, 122 (1985)

(上接第 419 页)

的 3.2~5.5W 激光辐照条件下 SOM 样品 Si 层发生熔化再结晶, 而 SiO<sub>2</sub> 层不会熔化破坏, 保持了电绝缘性能。而过低的激光功率 (<3W) 不能使整个 Si 层熔化再结晶, 而太大的激光功率可能导致 SiO<sub>2</sub> 层熔化破坏。

### 参 考 文 献

- 1 林成鲁 *et al.*, *中国激光*, **12**(12), 722(1985)
- 2 Xing Kunshen *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **B37/38**, 741(1989)
- 3 Th. Englert *et al.*, *Solid State Electr.*, **23**, 31(1980)
- 4 Y. I. Nissim *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **51**, 274(1980)
- 5 W. B. Joyce *Solid State Electr.*, **18**, 321(1975)
- 6 G. Yaron *et al.*, *IEEE Trans.*, **ED-27**, 964(1980)