

多晶硅薄膜的 Ar^+ 激光再结晶

林成鲁 沈宗雍 方芳 林梓鑫 邹世昌

(中国科学院上海冶金研究所)

提要: 利用连续 Ar^+ 激光使绝缘层上的多晶硅薄膜再结晶。实验结果表明多晶硅晶粒尺寸显著增大,电学性能大为改善,并且与常规的集成电路工艺相容。

Recrystallization of polysilicon films by Ar^+ laser irradiation

Lin Chenglu, Shen Zongyong, Fang Fang, Lin Zixin, Zou Shichang

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

Abstract: CW Ar^+ laser is used for recrystallization of polysilicon films on isolating layers. Experimental results show a large increase in grain size, significant improvement in electrical properties and compatibility with conventional integrated circuit technology.

引言

利用连续 Ar^+ 激光辐照使绝缘层上的多晶硅薄膜进行再结晶,可以得到一种性能优良的 SOI (Silicon on Insulator) 新材料^[1~4]。这种材料对于发展高速器件、抗辐照器件、复合功能器件和三维集成电路的研制有重要意义。我们利用激光再结晶 SOI 材料已成功地制备了 n 沟、 p 沟 MOSFET、CMOS 六倒相器和九级环形振荡器^[5], 单管及集成电路性能良好,所制备的 CMOS/SOI 器件的速度性能均优于同样尺寸的单晶硅 CMOS 器件。本文报道了利用连续 Ar^+ 激光进行 SOI 材料研究的若干新结果。

实验方法

在 n 型 $\langle 100 \rangle \text{Si}$ 上热生长厚度为 $1 \mu\text{m}$

的 SiO_2 , 然后以低压化学汽相淀积 (LPCVD) 得到 $0.5 \mu\text{m}$ 的多晶硅薄膜。利用离子注入技术在多晶硅中分别注入能量为 150keV 、剂量为 $5 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ 的砷以及能量为 60keV 、剂量为 $1 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ 的硼。部分样品作成 Van der Pauw 图形,以用于霍尔测试。将多晶硅样品置于 X 、 Y 二维可动的扫描工作台上, X 方向的移动速度为 2cm/s , Y 方向每次步进 $20 \mu\text{m}$ 。以南京电子管厂生产的 362Ar^+ 激光器进行激光辐照。实验所用的激光功率为 $7 \sim 8 \text{W}$, 经聚焦后束斑直径为 $\phi 40 \mu\text{m}$, 激光再结晶时样品预热 150°C 或 550°C 。

激光再结晶前、后的多晶硅薄膜,以透射电子显微镜研究晶体结构的变化,以四探针、霍尔测试分析其电学性能的变化,用光学显微镜和 6JA 干涉显微镜比较材料的表面形

收稿日期: 1984年11月17日。

貌。

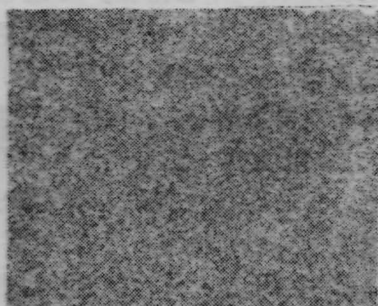
实验结果

1. 晶体结构的变化

用透射电子显微镜观察原始多晶硅和激光再结晶以后的多晶硅薄膜, 所得结果如图 1 所示。原始的多晶硅晶粒尺寸为 $300 \sim 500 \text{ \AA}$, 经 Ar^+ 激光再结晶以后增大到长度 $\sim 30 \mu\text{m}$, 宽度 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 。

2. 电学性能的改善

图 2 为注入砷的多晶硅经 1000°C 、30 min 热退火及 Ar^+ 激光再结晶后电阻率与掺杂浓度的关系。图 3 为相应的霍尔迁移率随掺杂浓度的变化情况。平均载流子浓度与掺杂浓度的关系曲线如图 4 所示。我们同时做了硼注入多晶硅样品的电学性质测量, 得到了与砷注入样品类似的结果。这些结果说明, 激光再结晶使多晶硅的电学性能大幅度改善, 电阻率和霍尔迁移率都比较接近单晶



(a) 原始多晶硅 ($\times 5000$)



(b) 激光再结晶多晶硅 ($\times 1200$)

图 1 多晶硅薄膜的透射电子显微镜照片

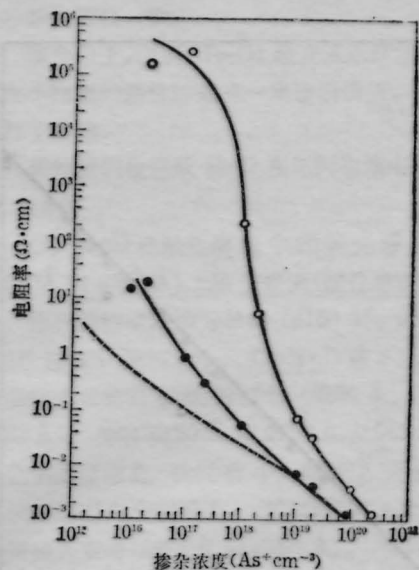


图 2 热退火及激光再结晶多晶硅的电阻率与掺杂浓度的关系

○—热退火; ●—激光再结晶; ——单晶硅

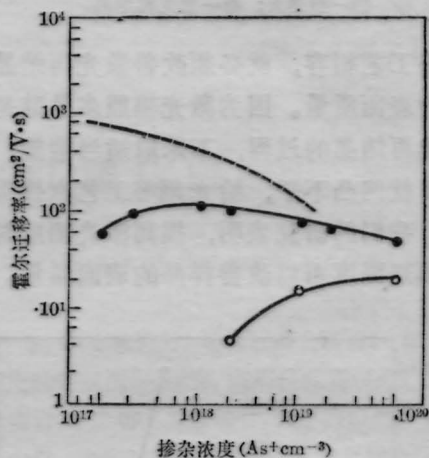


图 3 热退火及激光再结晶多晶硅的霍尔迁移率与掺杂浓度的关系

(注同图 2)

硅的值。激光再结晶多晶硅的平均载流子浓度比热退火的样品要高, 而且接近于掺杂浓度。电学性能的这种变化, 我们在 [4] 中已经进行了研究, 它是由晶体结构的变化所引起的。

3. 表面质量的改进

要使 SOI 材料与大规模及超大规模集

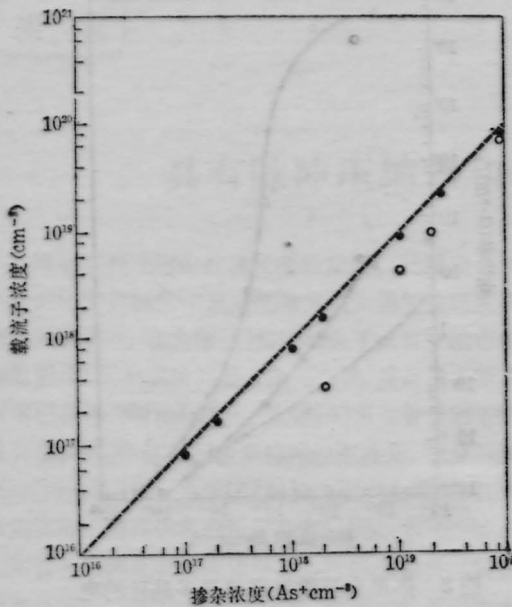


图4 热退火及激光再结晶多晶硅的平均载流子浓度与掺杂浓度的关系
○—热退火；●—激光再结晶

成电路工艺相容，就必须改善激光再结晶多晶硅的表面质量。因为激光辐照多晶硅是局部熔化再结晶的过程，不采取适当措施，样品表面就凹凸不平，给光刻等工艺直接带来困难。我们的研究表明，提高激光辐照时硅片的预热温度可以改善样品的表面质量。对

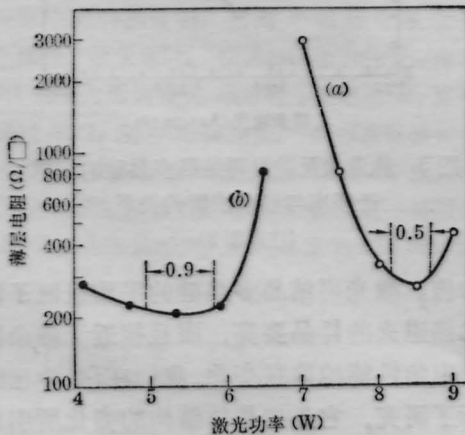


图5 在不同的预热温度下，多晶硅的薄层电阻与激光功率的关系
(a)— $T_s=150^\circ\text{C}$ ；(b)— $T_s=550^\circ\text{C}$

离子注入能量为 60 keV、剂量为 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 硼的多晶硅样品，预热温度 (T_s) 分别为 150°C 与 550°C ，以不同功率的 Ar^+ 激光进行再结晶，不同再结晶区域的薄层电阻与激光功率的关系见图 5。如果以再结晶后多晶硅薄膜的最低薄层电阻值变化 10% 为界，在 T_s 为 150°C 时，激光功率窗口(得到符合要求的再结晶多晶硅所允许的激光功率变化范围)为 0.5 W；而在 T_s 为 550°C 时，激光功率窗口为 0.9 W。较高的预热温度扩大了激光再结晶的功率窗口，功率窗口扩大，将比较容易控制激光辐照条件以得到平整的再结晶硅表面。用 6JA 干涉显微镜比较分析再结晶样品的表面质量， T_s 为 550°C 时能得到硅岛表面不平整度在 $300 \sim 500 \text{ \AA}$ 以内的直径 $\phi 50 \text{ mm}$ 的 SOI 材料，满足了常规的集成电路工艺流片的要求。

讨 论

我们在文献[3]中已指出，对连续 Ar^+ 激光辐照多晶硅-二氧化硅-单晶硅多层结构样品时温度场分布的计算，以及用离子背散射技术对杂质分布的分析均说明：最佳条件下的激光再结晶是多晶硅薄膜熔化后重新结晶的过程。多晶硅层熔化后，再结晶时固化前沿的速度 v 是由推进的固相-液相界面释放的热 $v\Delta H$ 以 $K\partial T/\partial Z$ 热扩散至衬底中的速率所决定的^[6,7]，如下式所示：

$$v = \frac{K}{\Delta H} \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (1)$$

式中 K 是热传导率， ΔH 是熔化潜热， $\partial T/\partial Z$ 是垂直于固化前沿的温度梯度。以连续 Ar^+ 激光辐照样，在束斑为 $\phi 40 \mu\text{m}$ ，扫描速度为 2 cm/s 时，激光的作用时间约为 2 ms 。在这种情况下，温度梯度 $\partial T/\partial Z$ 主要是由热扩散决定的，此时，通过忽略热传导率与温度的依赖性，对温度剖面进行线性近似便得到：

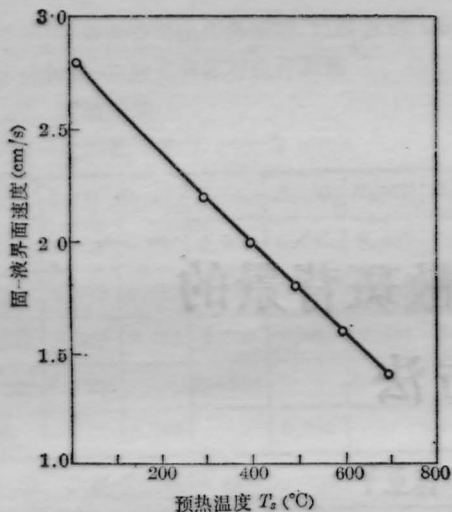


图6 多晶硅激光再结晶时固相-液相界面速度与样品预热温度的关系
(激光束斑 $\phi 40 \mu\text{m}$, 扫描速度 2cm/s)

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{T_m - T_s}{2\sqrt{Dt}} \quad (2)$$

式中 D 为热扩散系数, T_m 为硅的熔点, t 是时间。将(2)式代入(1)式得到:

$$v = \frac{K}{\Delta H} \frac{T_m - T_s}{2\sqrt{Dt}} \quad (3)$$

在本文的实验条件下, 代入参数

$$K = 0.221 \text{ w/cmK} \quad (T \geq 1370\text{K}),$$

$$\Delta H = 4206 \text{ J/cm}^3,$$

并且 $D = K/\rho C_p$, 其中

$$\rho = 2.33 \text{ g/cm}^3,$$

(上接第721页)

基、 CO_2 和 H_2O 。碱金属含量增加, 则水在玻璃熔体中溶解度增加, 这一点与 Scholze^[3] 文章中分析的硅酸盐玻璃中水的溶解度随碱金属含量增加而增加有相似之处。

3. 玻璃物化性能的变化, 文献[2]已作过分析, 本文仅就密度和机械强度与水含量的关系作了研究。从测定结果得到密度和抗折强度随着水含量的增加而降低。这是由于玻璃结构松弛和不对称加剧所致。

4. 实验5所得结果如图4, 可以认为玻璃液中通以 SiCl_4 气体后能使 OH^- 基大幅

$$C_p = (1.978 + 3.54 \times 10^{-4}T) - (3.68 \times 10^4 T^{-2}) \text{ J/cm}^3\text{K},$$

利用(3)式计算得到的固相-液相界面速度与样品预热温度的关系见图6。

由图6可见, 随样品预热温度的提高, 再结晶时固相-液相界面速度下降。提高预热温度有利于硅的再结晶生长。但是, 将激光再结晶技术应用于器件工艺时, 还必须考虑与常规集成电路工艺的相容性, 因此也不能把预热温度升得太高, 否则可能引起下层硅中杂质的扩散、电路结构的损坏等。预热温度的确定要考虑到器件工艺, 一般情况下 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ 较为合适。

参 考 文 献

- [1] H. W. Lam et al.; *IEEE Electron Dev. Lett.*, 1980, **EDL-1**, 206.
- [2] S. Kawamura et al.; *IEEE Electron Dev. Lett.*, 1983, **EDL-4**, 366.
- [3] 邹世昌等;《电子学报》, 1983, **11**, No. 5, 1.
- [4] 方芳等; *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1985, B718, 348.
- [5] 沈宗雍等;“ Ar^+ 激光再结晶多晶硅薄膜制备 CMOS/SOI 器件”, 待发表.
- [6] G. J. Galvin et al.; *Physical Review B*, 1983, **27**, 1079.
- [7] J. M. Poate, J. W. Mayer; *Laser Annealing of Semiconductors*, 1982, Academic Press, New York.

度降低, 表现在图4曲线(1)中 $3.5 \mu\text{m}$ 吸收很小。这是由于 SiCl_4 与 OH^- 反应生成易挥发的 HCl 之故。

通 Ar 与通 O_2 入玻璃液后 OH^- 无明显差别, 但 Ar 气是惰性气体, 适合于铂金坩埚中进行通气而不会使铂金受到侵蚀。

参 考 文 献

- [1] 干福熹;《科学通报》, 1979, No 2, 61.
- [2] 姜中宏等;《光学材料》, 1982, **4**, No 2~3, 13.
- [3] Scholze H.; *Glass. Ind.*, 1966, **47**, No. 10, 48.
- [4] R. V. Adams; *Phys. Chem. Glasses*, 1961, **2**, No. 2, 50.
- [5] E. B. Shand; *Glass Engineering Handbook*, 1958, N. Y., p. 61.