

研究简报

# 用脉冲激光把稀土元素 Yb 引入硅单晶中

鲁永令 傅春寅

(北京大学物理系)

1983年10月16日收到

用Q开关 Nd: YAG 脉冲激光辐照淀积在 Si 上的稀土元素 Yb, 当输出能量密度  $\geq 6.0\text{J}/\text{cm}^2$  时, 成功地把 Yb 引入 Si 中. 用二次离子质谱 (SIMS) 分析指出进入 Si 中 Yb 的表面浓度为  $3 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ , 在离表面  $0.75\mu\text{m}$  处, 浓度仍有  $7 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ .

## 一、引言

把杂质引入半导体材料中, 通常采用热扩散和离子注入技术. 热扩散, 往往受到元素的固溶度和扩散性质的限制. 离子注入技术虽然能克服上述限制, 却在晶体中产生大量缺陷, 并且, 重元素原子只能引入很浅一层. 目前, 正在发展中的激光掺杂技术广泛为人们重视<sup>[1]</sup>. 本文首次报道用Q开关 Nd:YAG 脉冲激光 ( $\lambda = 1.06\mu\text{m}$ ,  $\tau_p = 10\text{ns}$ ) 辐照淀积在 Si 表面上的稀土元素 Yb. 在激光器输出能量密度等于或大于  $6.0\text{J}/\text{cm}^2$  的条件下, 已成功地将 Yb 引入 Si 中. 用二次离子质谱技术研究了激光掺杂行为.

## 二、实验

### 1. 样品制备及激光辐照

直拉  $1.0\Omega\text{-cm}\langle 110 \rangle$  取向的 N 型硅单晶片, 经过单面抛光和常规清洗. 利用真空镀膜

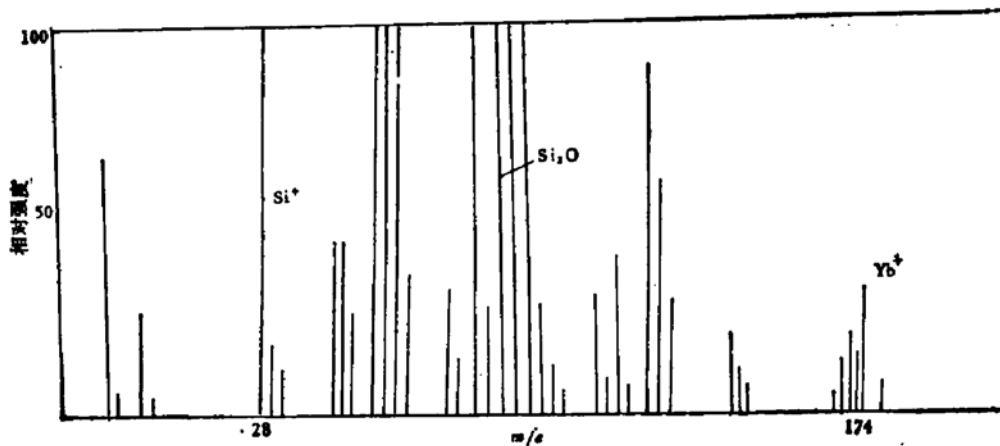


图1 激光掺 Yb 二次离子质谱全谱

技术把高纯(99.99%)稀土元素 Yb 淀积到硅的抛光面上(真空度为  $3.5 \times 10^{-5}$  托)。用 Q 开关 Nd:YAG 脉冲激光进行正面辐照。在样品和激光器之间置放一个聚焦透镜,用来调节激光光束直径,控制激光输出能量密度。表 1 给出了不同激光光束直径辐照的情况。

表 1 不同激光能量密度辐照 Yb-Si 表面及金相观察结果

光束直径 (cm)	激光器输出能量密度 ( $J/cm^2$ )	Si 表面金相观察结果(放大 180 倍)	
		去 Yb 膜前	去 Yb 膜后
0.40	0.6	光照部分的 Yb 发白	硅片表面没有反应
0.30	1.2	光照部分的 Yb 膜有斑纹	硅片表面仍看不到反应
0.20	2.6	有明显斑点	光照部分显暗淡
0.15	4.6	光斑周围 Yb 层脱落光斑之中有凹陷痕迹	光照部分硅片显粗糙
0.13	6.1	光斑中有同水波一样的起伏从光斑中心向四周传播	硅片出现熔洞,光照部分凹陷
0.08	>16.1	表面有孔洞	硅片被击穿

## 2. 二次离子质谱分析及结果

经输出能量密度  $\geq 6.0 J/cm^2$  的激光辐照后的样片,用稀盐酸和王水煮沸,去掉 Si 表面残存的 Yb 膜,首先做样品的二次离子质谱的全谱,如图 1 所示。经分析表明是 Yb 的特征谱群。接着二次离子质谱仪针对 Yb 的特征谱做纵向剥离收谱。即按 Yb 元素的离

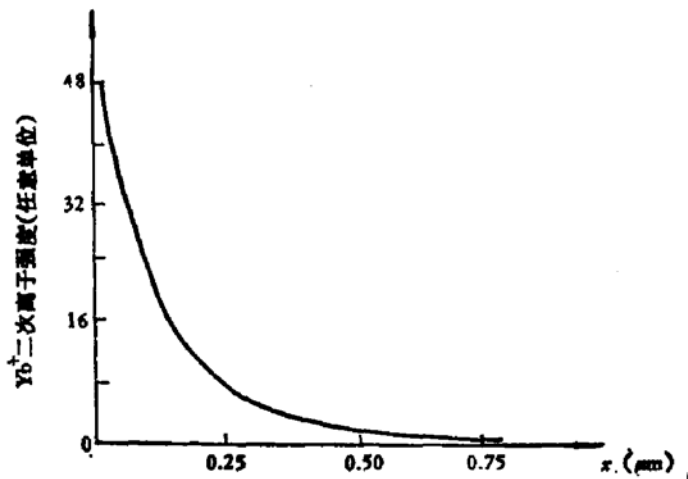


图 2 激光掺 Yb 的二次离子谱的纵向分布

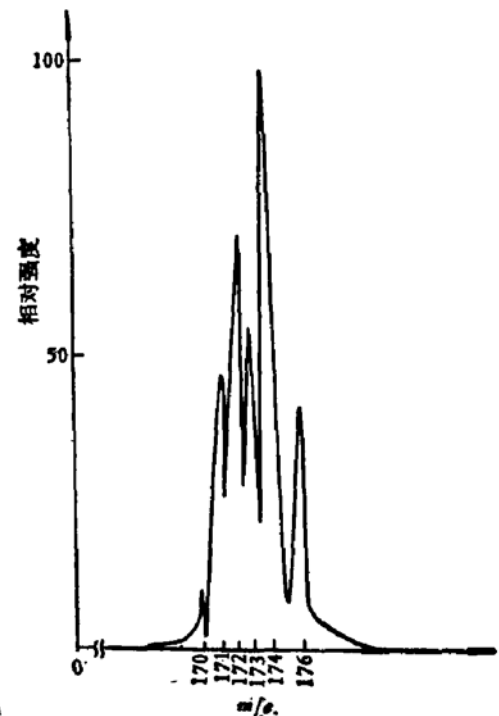


图 3 激光掺 Yb 二次离子质谱图

子调准质谱仪的输出,测量二次离子强度随时间变化,如图 2 所示. 由此可获得纵向浓度分布. 收谱一分半钟,在干涉显微镜下估计刻蚀深约为  $0.75\mu\text{m}$ , 二次离子质谱分析仪的工作条件是: 一次束流强度为  $2\mu\text{A}$ , 一次能量为  $16\text{keV}$ , 一次离子  $\text{O}_2^+$ , 一次束斑直径  $50\mu\text{m}$ , 记录纸速度  $40\text{mm/分}$ .

### 三、分析与结论

#### 1. Yb 谱群的辨认

如图 3 所示,它们是出现在质量数为 174 附近的谱线群. 该谱群的位置和谱之间的相对强度与 Yb 的特征谱群相同. 质量数为 168 处谱线不明显,可能是由于在该质量数下的 Yb 的同位素丰度太小所致. 把测量得到的谱线相对强度(即 SIMS 的每条谱线高除以各谱线高之和的百分数)与 Yb 的同位素丰度作比较,如表 2 所示.

表 2 激光掺 Yb 的二次离子质谱的相对强度与 Yb 的同位素丰度的比较

质量数		168	169	170	171	172	173	174	175	176
实验结果	SIMS 谱高	~0	0	11.9	47.7	71.5	56.0	100	0	40.9
	SIMS 谱相对强度	~0	0	3.6	14.5	21.8	17.1	30.5	0	12.5
Yb 的同位素的丰度 <sup>[2]</sup>		0.2	0	3.0	14.3	21.8	16.1	31.9	0	12.7

由此看出实验结果与 Yb 的同位素丰度符合很好. 因此,可以断定 Yb 已被激光辐照引入 Si 中.

#### 2. Yb 在 Si 中的浓度分布

由 SIMS 理论<sup>[2]</sup>,

$$C_{\text{Yb}} = C_{\text{Si}} \left( \frac{i_{\text{YbR}}}{i_{\text{SiR}}} \right) \left( \frac{a_{\text{Si}}}{a_{\text{Yb}}} \right) \left( \frac{S_{\text{Si}}^+}{S_{\text{Yb}}^+} \right), \quad (1)$$

其中  $C_{\text{Yb}}$  为引入 Si 中的 Yb 的浓度,  $C_{\text{Si}}$  为 Si 的密度,  $i_{\text{SiR}}$  为 Si 的二次离子电流强度,  $i_{\text{YbR}}$  为 Yb 的二次离子电流强度,  $a_{\text{Si}}$ ,  $a_{\text{Yb}}$  分别为 Si 和 Yb 相对应的同位素的丰度,  $S_{\text{Si}}^+ / S_{\text{Yb}}^+$  为 Si 与 Yb 的相对二次离子产额. 将测得和已知数据代入 (1) 式,

$$C_{\text{Yb}} = 3 \times 10^{21} / \text{cm}^3.$$

由图 2 可得到距表面  $0.75\mu\text{m}$  处, Yb 的浓度为  $7 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ , 并根据 Yb 的二次离子谱的纵向分布得到 Yb 的浓度分布,如图 4 所示.

#### 3. 激光掺 Yb 机理的估计

激光掺 Yb, 在 Si 表面浓度为  $3 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ , 通过小于  $10\text{ns}$  时间, 达到距表面  $0.75\mu\text{m}$  的深度, 其  $C_{\text{Yb}}$  仍为  $7 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ , 显然不是通过固态扩散实现的. Yb 在 Si 中的扩散系数小于并接近 Al 在 Si 中的扩散系数<sup>[3]</sup>, 若按 Al 在 Si 中的扩散系数计算, 当  $T \geq 1400^\circ\text{C}$

(单晶硅片允许的最高温度), 则  $D \leq 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}^{[4]}$ , 但若按余误差分布估计激光掺 Yb 的扩散系数(假定扩散时间为脉冲宽度  $\tau_p$ )

$$D_{\text{推}} = \left[ \frac{x}{2\text{erfc}^{-1}\left(\frac{N(x,t)}{N_0}\right)} \right]^2 / t$$

$$\approx 3 \times 10^{-1} \text{cm}^2/\text{s}, \quad (2)$$

若考虑硅表面升温时间,  $D_{\text{推}}$  还要大, 但它已大大超过 Yb 在液相硅中最小的扩散系数<sup>[5]</sup>. 所以可以断定 Yb 在 Si 中是通过液相扩散的<sup>[6]</sup>. 即当激光输出能量密度  $\geq 6 \text{J}/\text{cm}^2$  时, 样品表层(Yb 层与 Si 表层)在很短时间内温度突然升高而熔化, Yb 在 Si 的熔化层中扩散.

结论: 波长为  $1.06 \mu\text{m}$  的 Q 开关 Nd:YAG 激光器 ( $\tau_p = 10 \text{ns}$ ) 辐照表面淀积 Yb 层的硅片, 当激光器的输出能量密度大于  $6 \text{J}/\text{cm}^2$  时, 可成功地把 Yb 引入 Si 中, 其表面浓度为  $3 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ , 在深入  $0.75 \mu\text{m}$  处浓度为  $7 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ .

本文是在中国科学院科学基金资助下进行的. 本系工程师郭维新为真空淀积 Yb, 北京工业学院邓仁亮和穆恭谦两同志为激光辐照给予很大帮助, 科仪厂王理等同志为样品进行了二次离子质谱分析, 作者在此表示感谢.

### 参 考 文 献

- [1] S. Damgaard *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **52**, 6907 (1981).
- [2] <日>染野檀安盛岩雄, 表面分析, 科学出版社, 62 页(1980).
- [3] 傅春寅, 鲁永令, 用热扩散方法向单晶硅中引入稀土元素 Yb 及其物理性质的研究(待发表).
- [4] 厦门大学物理系半导体物理研究室, 半导体器件工艺原理, 人民教育出版社, 31 页 (1979).
- [5] S. U. Campisano and M. G. Grimaldi, *Lettere el Nuovo Cimento*, **29**, 413 (1980).
- [6] P. Barri *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **50**, 788 (1979).

## Implantation of Rare-Earth Element Yb into Silicon Single Crystals by Pulse Laser Beam

Lu Yongling and Fu Chunyin

(Department of Physics, Peking University)

### Abstract

Ytterbium, deposited on silicon surface, has been incorporated into single crystals of silicon by a Q-switched Nd:YAG pulse laser with energy densities of  $\geq 6 \text{J}/\text{cm}^2$ . The surface concentration of Yb in Si is  $3 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ , while its concentration from the surface of Si to depth of  $0.75 \mu\text{m}$  is  $7 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ . This has been determined by secondary ion mass spectrum analysis.

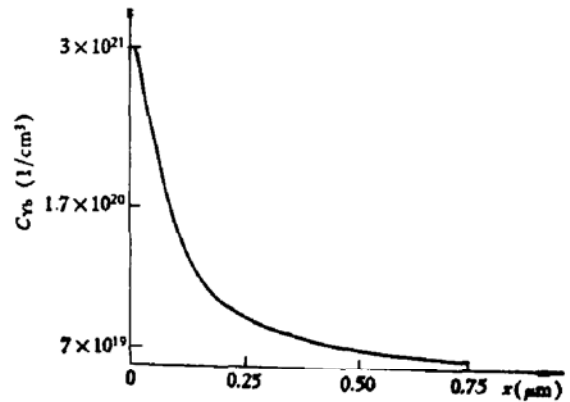


图 4 激光掺 Yb 在 Si 中的分布