

激光辐照半导体硅的掺杂研究

杜元成 孙迭麓 赵衍盛 李富铭

(复旦大学物理系)

提要: 描述一个有机胶体掺杂剂的半导体硅的激光辐照掺杂方法; P 型和 N 型两种硅单晶进行了砷、磷和硼的掺杂, 并研究了掺杂区的电和光电特性。

Investigation on semiconductor Si doping by laser irradiation

Du Yuancheng, Sun Diechi, Zhao Yancheng, Li Fuming

(Department of Physics, Fudan University)

Abstract: A method is described for semiconductor Si doping of organic colloidal dopants. Both P -type and N -type crystalline Si have been doped using arsenic, phosphor and boron. The electrical and opto-electrical characteristics of the doping area are investigated.

一、引言

应用激光直接在半导体材料上进行掺杂是近二年来才开始研究的一种新技术, 目前已有报导的是用激光辐照含有半导体掺杂剂磷、硼、镉的有机化合物的气体或液体, 经过光化学反应和热效应将掺杂剂扩散到硅的表面内, 形成 $P-N$ 结^[1~3]; 也有用激光辐照含有掺杂剂磷的 PH_3 气体, 先将 PH_3 热分解, 生成的磷再扩散到硅的表面内形成 $P-N$ 结^[4]。我们采用另一途径, 将含有掺杂剂的有机胶体涂在硅表面, 然后用激光直接在大气中辐照, 在 P 型硅上掺砷和磷, 以及 N 型硅上掺硼。在两类硅片上都获得良好的 $P-N$ 结。

二、实验装置及结果

实验采用的硅单晶片分别是 P 型 $\langle 111 \rangle$ (电阻率为 $10 \sim 12$ 欧姆·厘米) 和 N 型 $\langle 100 \rangle$ (电阻率为 $8 \sim 10$ 欧姆·厘米), 它们的厚度约 $400 \sim 500$ 微米, 表面抛光后用 HF 清洁处理, 然后将含有 SiO_2 和掺杂剂磷、砷和硼的有机胶体分别滴在 P 型和 N 型硅片上, 再用离心机甩均匀后烘干。掺杂剂的含量 (重量体积比) 砷为 $1.2 \sim 1.6\%$; 磷为 $5 \sim 4\%$; 硼为 $0.1 \sim 0.3\%$ 。

使用的激光为调 Q 的红宝石激光器, 红宝棒的尺寸为 $\phi 6 \times 8$ 毫米, 用叶绿素 D 作调 Q 染料, TEM_{00} 模输出, 波长为 6943 \AA , 输出

收稿日期: 1982年9月13日。

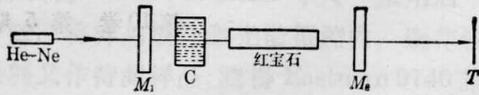
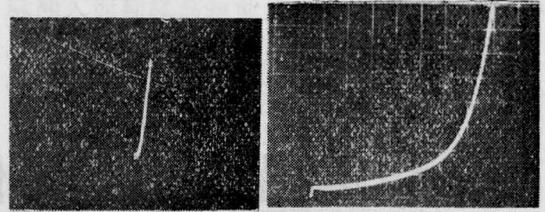


图1 实验装置示意图

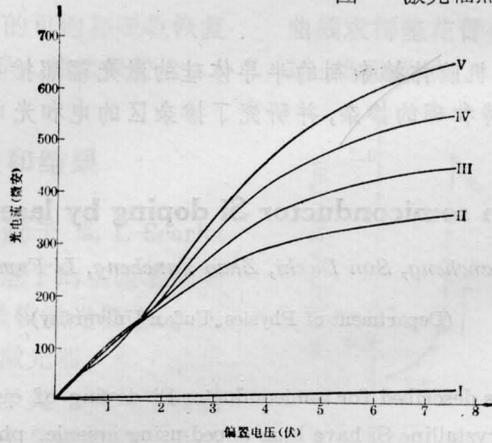
M_1 、 M_2 —反射镜； C —染料盒； T —移动台



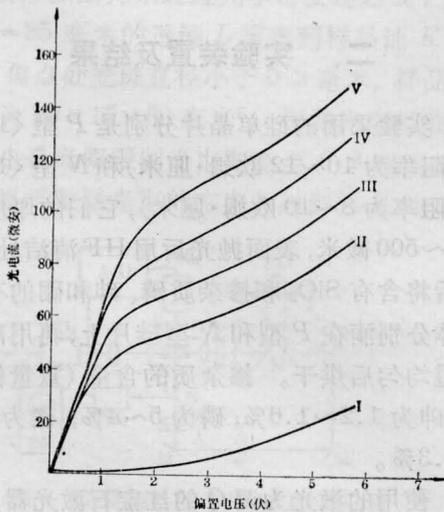
(a) 正向特性
(X: 每格2伏; Y: 每格10微安)

(b) 反向特性
(X: 每格10伏; Y: 每格10微安)

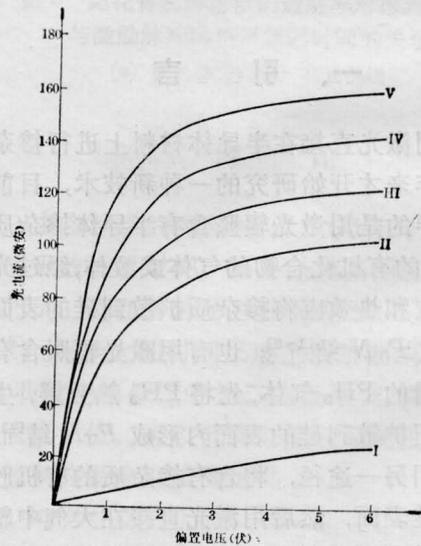
图2 激光辐照掺磷的二极管伏安特性曲线



(a) P 型<111>硅掺磷四次辐照后 $P-N$ 结的光电特性曲线。I—暗电流; II~V—不同光照



(b) N 型<111>硅单晶片掺磷三次辐照后 $P-N$ 结的光电特性曲线。I—暗电流; II~V—不同光照



(c) P 型<111>硅掺磷四次辐照后 $P-N$ 结的光电特性曲线。I—暗电流; II~V—不同光照

图 3

能量约 400 毫焦耳, 脉冲宽度 20 毫微秒, 峰值功率约 20 兆瓦。实验装置如图 1 所示, 其中 He-Ne 激光同光路作为红宝石激光器的调整和辐照位置的监视。硅片放置于 T 处, 可以二维移动。硅片样品上辐照区域的直径约 0.5 厘米。

在实验中对各类样品进行了单次和多次辐照, 个别样品还用透镜聚焦后进行辐照。在功率密度大于 50 兆瓦/厘米² 时, 无论单次还是多次辐照, 各类硅片上都能形成良好的 $P-N$ 结, 低于这一功率密度, 就很难形成 $P-N$ 结。

对辐照区进行了光和电特性的测试, 表明掺杂质已扩散到硅片表面内, 形成了 $P-N$ 结。图 2 是 P 型硅片上掺磷, 在辐照尺寸 ϕ 为 0.5 厘米的部位测得的二极管的正反向特性, 其中 (a) 是正向特性曲线, (b) 是反向特性曲线。从图上可以看出反向击穿电压大于 60 伏, 漏电流小于 10 微安。在掺砷和掺硼的样品上, 也测得了类似的特性曲线。掺砷样品的反向击穿电压和漏电流优于掺磷的结果。

辐照区的光电特性采用了两种测量方法。其一是用一个 6.3 伏 10 瓦的白炽灯作为照明光源, 另一个是用一台 He-Ne 激光器, 通过一个玻璃导光纤束照明辐照区。结果分别在图 3 和图 4 中描述。图 3 是记录仪上直接获得的曲线, (a)、(b)、(c) 分别是掺磷、砷、硼的曲线。图中的曲线 I 为暗电流(晴天室内), II 至 V 分别为改变照明光强时获得的。图 4 是改变 He-Ne 激光输出功率, 根据记录所得的曲线, 选取偏置电压 10 伏时, 光电流密度与照明光功率的变化关系。

用 50 瓦的溴钨灯作为光源经过单色仪色散, 再照辐照过的区域, 测定所得光电流大小, 得到三种样品的归一化的光谱响应曲线如图 5 所示, 其响应波长范围在 500~1100 毫微米之间, 与用其他方法制造的硅光二极管的光谱响应特性是相类似的。

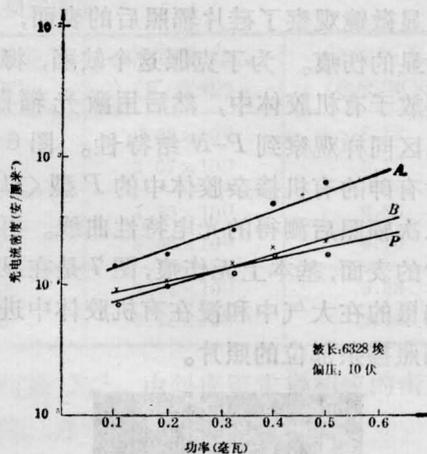


图 4 光电流密度与照明光强的变化关系

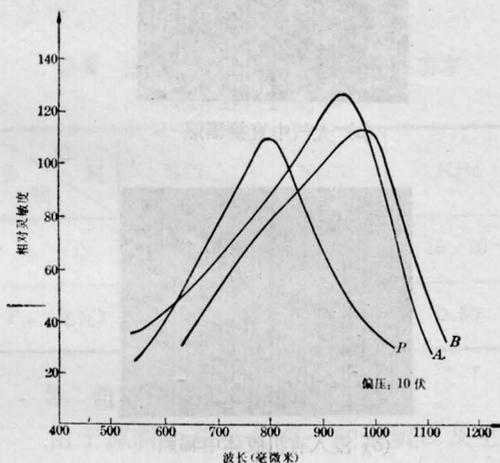


图 5 $P-N$ 结光谱灵敏度响应曲线

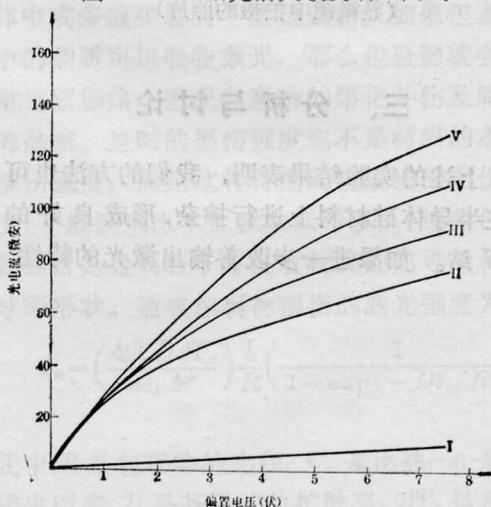
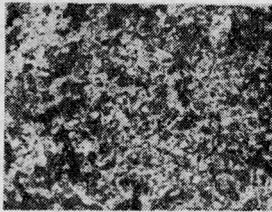
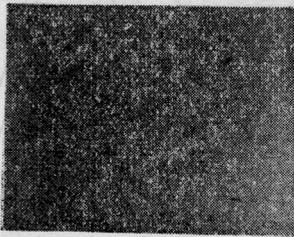


图 6 P 型 $\langle 111 \rangle$ 硅掺砷胶体中三次辐照 $P-N$ 结的光电特性曲线
I—暗电流; II~V—不同光照

用显微镜观察了硅片辐照后的表面, 看到有明显的伤痕。为了克服这个缺陷, 将硅片直接放于有机胶体中, 然后用激光辐照。在辐照区同样观察到 $P-N$ 结特性。图 6 是浸在含有砷的有机掺杂胶体中的 P 型 $\langle 111 \rangle$ 硅经三次辐照后测得的光电特性曲线。再观察硅片的表面, 基本上无伤痕, 图 7 是在显微镜下拍摄的在大气中和浸在有机胶体中进行激光辐照掺杂部位的照片。



(a) 大气中直接辐照



(b) 浸入有机胶体中辐照

图 7 激光辐照掺杂砷、硅表面情况
(显微镜中拍摄的照片)

三、分析与讨论

上述的实验结果表明, 我们的方法也可以在半导体硅材料上进行掺杂, 形成良好的 $P-N$ 结。如果进一步改善输出激光的特性,

提高功率, 再扩大照射光束, 预期可以获得大面积均匀扩散区; 适当增大脉冲宽度, 可以增加掺杂区的深度。

这种激光辐照掺杂的物理过程, 我们认为主要是热效应。测量所用的有机胶体的光谱吸收特性, 在整个可见区无吸收, 因此不存在光化学反应。用一台不经调 Q 的红宝石激光器进行辐照, 其输出能量达 1.5 焦耳, 但峰值功率仅几十千瓦, 对同样的样品都没有形成 $P-N$ 结。用一台输出波长为 9.6 微米、每个脉冲能量为 1.2 焦耳、脉冲宽度为 200 毫微秒的 TEA CO_2 激光进行辐照, 也没有形成 $P-N$ 结。在实验中发现, 激光辐照掺杂也存在一个阈值功率, 所以功率密度是一个重要的参量, 它直接影响样品表面温度上升速率。在硅表面的局部地区温度上升的速率极快, 迅速达到杂质能扩散进表面内的温度, 才能形成 $P-N$ 结。在这一过程中是否还存在其他效应, 如由于辐照功率密度很大, 硅单晶表面在强光场的作用下, 内部结构发生某种变化, 更有利于掺杂质原子的扩散, 还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] T. F. Deutsch *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**, 144.
- [2] R. Stuck *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**, 715.
- [3] T. F. Deutsch *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **39**, 957.
- [4] G.B. Turner *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **39**, 967.