

砷注入硅的激光退火和热退火特性*

刘尚合 卢武星 姬成周 张通和

(北京师范大学低能核物理研究所)

一、引言

采用高功率的激光束辐照离子注入硅样品能够获得比热退火优越的电特性。利用离子束背散射分析技术,能够进行定量的非破坏性测量。一般说来,测量本身不会带来负效应^[1]。本工作采用离子束背散射技术和电特性测量,对注入砷离子的硅样品的退火行为进行了比较和分析。发现用大剂量($1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$)注入的样品在 1000°C 下,经20分钟退火后,能够获得一个接近于理想的突变结。而红宝石脉冲激光退火,无论从注入损伤的恢复还是从载流子浓度方面来看,都比热退火优越。

二、实验方法和实验条件的选择

实验样品选用P-型(111)硅单晶片,电阻率 $\rho = 7-15\Omega\cdot\text{cm}$ 。砷离子注入是在本所400 keV离子注入机上完成的。 As^+ 的能量选取50 keV, 100 keV, 150 keV。注入剂量是 10^{14} , 10^{15} , $10^{16}/\text{cm}^2$ 三种。在室温下偏离(111)晶向 7° 进行注入。

注入后,一部份样品在氮气保护下进行热退火。为了比较不同条件下的退火特性,在 500°C 至 1100°C 范围选取七个温度进行恒温等时退火,并且还采用了两步退火的方式。激光退火用红宝石脉冲激光器, $\lambda = 6943 \text{ \AA}$, $\tau = 20\text{ns}$ ($1.9-2.8\text{J}/\text{cm}^2$)。“高斯光斑”的直径是5.5 mm。退火后样品表面金属光泽得到恢复。在我们所选能量密度范围,激光退火区未发现明显的破坏,根据Péter Révész等人计算,在这种条

件下的激光退火,杂质损失少于5%,非晶层的蒸发不会超过 15 \AA 。所以,在以下的讨论中可以不考虑激光退火中杂质损失的问题。

背散射分析选用185 keV的 H^+ 束和2 MeV的 He^+ 束,分别对不同样品进行了测量。载流子浓度的测量采用微分电导法和Hall测量配合进行。

三、实验结果和讨论

图1是用185 keV H^+ 束背散射分析得到的样品损伤分布。根据Vook和Stein(1969)提出的非晶态模型,空位浓度达到硅原子密度的50%时,就可以认为是非晶状态^[2]。从图1可以看出样品非晶层足有 1000 \AA 厚,研究这类样品的退火特性是有意义的。

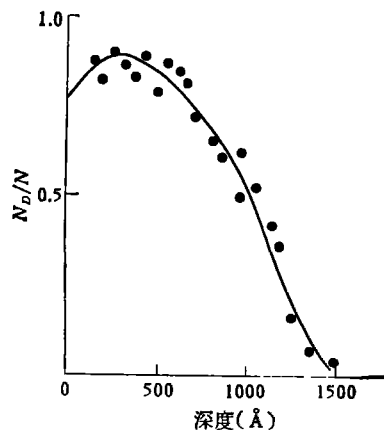


图1 注入层的损伤分布

注入: 150 keV, $1 \times 10^{16} \text{ As}^+/\text{cm}^2$;

分析: 185 keV, H^+

(N_D ——位移原子数/ cm^3 ;

N ——硅原子数/ cm^3)

*1979年8月27日收到。

1. 高温热退火样品的背散射分析

图 2 和图 3 是高温热退火样品的背散射谱。从实验结果可以看出经 500℃、600℃、20 分钟热退火非晶层逐渐减薄，但是未能完全消除。经 700℃、20 分钟热退火后，非晶层消失。可是在 40 道到 60 道区域中，产额仍然很高。这

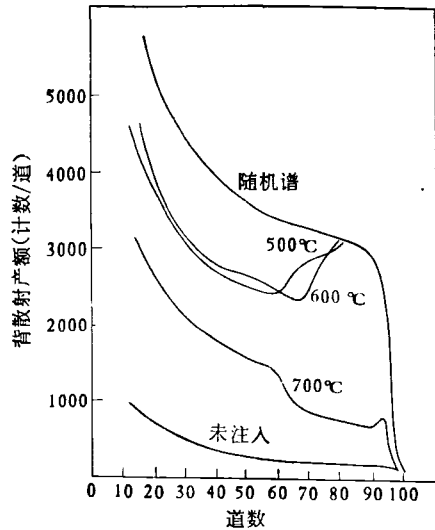


图 2 一步热退火样品的背散射谱
注入: 150 keV, 1×10^{16} As⁺/cm²;
分析: 185 keV, H⁺

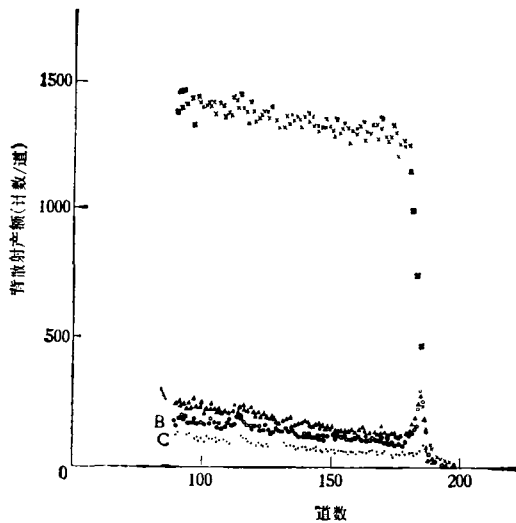


图 3 一步热退火(A)、二步热退火(B)和原始单晶(C)的背散射谱
注入: 150keV, 1×10^{16} As⁺/cm²;
分析: 2MeV, He⁺

种现象往往在高剂量注入时出现。这可能是衬底单晶和注入区交界的区域内存在损伤或者应力产生的大量位错使退道增加的结果。正如 Seidel 等人 1974 年曾提出再结晶状态的结构是强烈地依赖于注入的离子。图 2 可能表明在再结晶过程中，非晶层与晶体界面的移动包含有沉积的杂质和高浓度缺陷的迁移。而且在退火过程中高浓度的缺陷必然传播到再结晶的界面，影响再生长的结构。

图 3 是 900℃、30 分钟一步退火和 550℃、8 小时加 900℃、30 分钟两步退火样品的背散射谱。可见，经 900℃ 一步退火的样品的晶体恢复接近完美，其归一化定向产额 $\chi_{\min} = 7.6\%$ 。而两步退火的样品的 $\chi_{\min} = 5.7\%$ ，比一步退火更好。

2. 激光退火样品的背散射分析

样品是用 150 keV (能量), 1×10^{16} /cm² (剂量) 注入 As⁺ 杂质的硅片。注入后用红宝石脉冲激光束辐照。背散射谱如图 4 (E) 所示。激光束辐照的能量密度是 2.6 J/cm²。背散射分析表明归一化的定向产额 $\chi_{\min} = 3.2\%$ ，这个结果比两步热退火的效果更好。

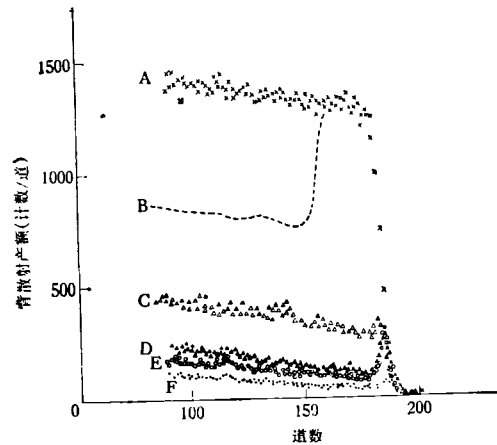


图 4 激光退火样品的背散射谱
注入: 150keV, 1×10^{16} As⁺/cm²;
分析: 185 keV, H⁺;
A: 随机谱, B: 未退火样品定向谱, C: “高斯光斑”边缘定向谱, D: 二步热退火结果 E: “高斯光斑”中心定向谱, F: 原始单晶

为了研究光照强度的均匀性对退火效果的影响,选择“高斯光斑”中心部份和边缘区域分别进行背散射分析,其边缘区域的归一化定向产额 $\chi_{\min} = 18.8\%$ 。可见中心区域退火效果是比较好的,但是边缘区域还达不到最佳热退火效果。这也正说明选择均匀的激光束是很重要的。

3. 电特性的测量

我们对若干种在不同注入条件下,经不同退火方式的样品进行了电测量。发现 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 剂量而注入能量为 50 keV, 100keV 和 150 keV 的三种样品,经 900°C , 20 分钟热退火后,载流子浓度分布与 LSS 理论所预言的杂质分布形状很相似。低于 900°C 退火的样品,晶体的恢复是不够充分的,电激活率一般低于 80%,这和上述背散射测量结果相符合。样品高于 900°C 退火,杂质的再分布非常显著,载流子浓度分布变得平坦。图 5 给出了 50 keV, 1×10^{16} As^+/cm^2 注入的样品经 1000°C 、20 分钟恒温退火后测量的载流子浓度分布,这是一种典型的阶梯形分布。这种陡峭的尾部分布显示出增强扩散的特点。

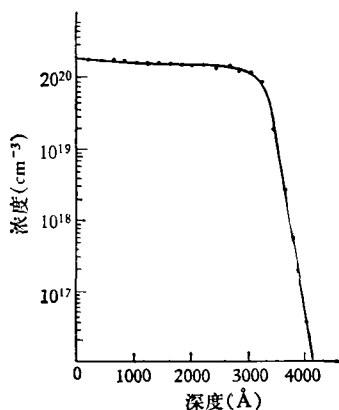


图 5 砷注入硅样品载流子浓度分布
注入: 50keV, 1×10^{16} As^+/cm^2 ;
退火: 1000°C , 20', N_2 保护

图 6 是砷注入硅样品经激光退火后的载流子浓度分布。激光的能量密度分别是曲线 1— $2.8 \text{ J}/\text{cm}^2$, 曲线 2— $2.6 \text{ J}/\text{cm}^2$ 和曲线 3—

$1.9 \text{ J}/\text{cm}^2$ 。可见随着能量密度的增加,载流子浓度分布的峰值位置向表面移动。载流子浓度最高可达 $2 \times 10^{21}/\text{cm}^3$, 已超过 As 在硅中的最高固溶度。据报道有人在研究 Sb 注入 Si 的激光退火时也发现了类似的现象^[3]。

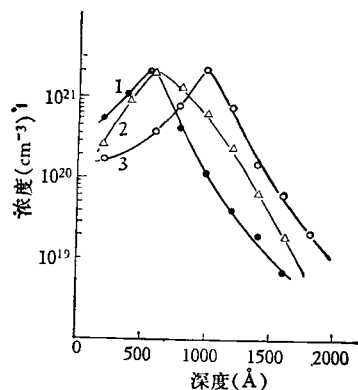


图 6 激光退火样品的载流子浓度分布
注入: 150keV, 1×10^{16} As^+/cm^2 ;
退火: 1— $2.8 \text{ J}/\text{cm}^2$, 2— $2.6 \text{ J}/\text{cm}^2$,
3— $1.9 \text{ J}/\text{cm}^2$

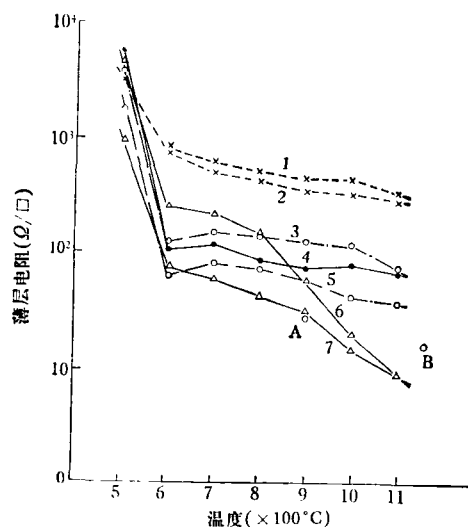


图 7 样品薄层电阻和退火条件的关系
1—50 keV, 1×10^{14} As^+/cm^2 , 2—150keV, 1×10^{14} As^+/cm^2 , 3—50keV, 1×10^{15} As^+/cm^2 ,
4—100 keV, 1×10^{15} As^+/cm^2 , 5—150 keV, 1×10^{15} As^+/cm^2 , 6—50keV, 1×10^{16} As^+/cm^2 ,
7—150keV, 1×10^{16} As^+/cm^2 ;
A—两步退火, B—激光退火

为了比较在不同退火方式下样品电阻率变化的规律,测量了不同退火温度的热退火样品

和激光退火样品的电阻率,结果如图 7 所示。从这些曲线可以看出,不同注入条件的样品退火行为不尽相同。注入剂量为 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 的样品在 $600-700^\circ\text{C}$ 范围似乎有逆退火特性。这在硼注入硅及热靶情况下磷注入硅时是非常明显的,根据 Watkins 提出的机理已有不少论文作过解释。 $150 \text{ keV}, 1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 注入 As^+ 的激光退火样品方块电阻是 $15.9 \Omega/\square$, 相当于 1000°C , 20 分钟的热退火效果^[4], 比两步热退火 (550°C , 8 小时 + 900°C , 30 分钟) 的方块电阻还小。

4. 讨论

由背散射分析和电测量表明,在本实验条件下,采用一步热退火方式, 900°C 的热处理可以保持杂质原子的注入剖面不发生大的再分布,而激活率又比较高。但晶体恢复的完美程度不及二步退火好。激光退火是三种退火方式中较好的一种,它既可以获得高的电激活率,又可使注入层晶体结构恢复到接近完美的程度。

图 6 中浓度分布曲线宽度的普遍增大,正是由于退火中注入层吸收激光能量处于熔化状

态,而 As 在液相硅中进行快速扩散的结果^[5]。

另外,如果激光辐照的能量密度远远超过注入层熔化所需要的能量阈值,液相硅膜将要延伸到硅衬底中。因为冷却凝固是从衬底向表面外延再生长,所以杂质分凝的结果必然把浓度分布推向表面。这就是图 6 中曲线 1 和 2 的情况。类似的现象也曾有人报道过^[5]。

工作中曾得到中国科学院上海冶金所、北京物理所和复旦大学的大力协助。北京半导体器件研究所卢因诚同志和我们进行了有益的讨论。中国科学院半导体所许振嘉同志审阅了此稿并提了宝贵意见。在此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] W. F. Van der Weg et al., *Acta Electronica*, 19-1(1976), 47—52
- [2] L. C. Kimerling and J. M. Poate, *Lattice Defects in Semiconductors*, (1974), 126—148.
- [3] Péter Révész et al., *Appl. Phys. Lett.*, 33-5(1978), 431—433.
- [4] A. Gat and J. F. Gibbons, *Appl. Phys. Lett.*, 32-4(1978), 278
- [5] A. V. Dvurechensky, G. A. Kachurin and A. K. Antonenko, *Radiation Effects*, 37-3,4(1978), 179—181.

室 温 CO 激 光 器 寿 命 研 究*

邵立金 张金祥 李晓菊 杨新元

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

一、引 言

作为激光的发展方向之一是要寻找简便、长寿命、高效率、大功率的实用激光器。最近我们对具有重要应用价值的 CO 分子激光器进行了研究,研制成功结构紧凑的铜阴极密封型 CO 激光器,有效放电长度 1 米,总长 1.15 米,室温下连续工作,直接用自来水冷却,水温最高 34.5°C ,最高输出功率 13 瓦,电转换效率达 11.5%。该器件始终保持单横模输出,寿命超

过 2000 小时,仍在正常运转。通过镍阴极和铜阴极两种 CO 器件的性能比较和实验分析表明:选用合适的电极材料及阻止 CO 工作气体的损耗是提高 CO 激光器输出功率和获得长寿命运转的关键;铜是一种比镍更为优良的 CO 激光器阴极材料。

二、实验比较

实验采用的镍阴极和铜阴极器件的结构和

* 1979 年 12 月 10 日收到。