

中子辐照单晶硅与激光退火制备 SOI 结构的研究

王 顺 李 琼

(华东师范大学)

林成鲁

(中国科学院上海冶金所离子束开放实验室)

Fabrication of SOI structure by means of laser annealed neutron-irradiated single crystal silicon

Wang Shen, Li Qiong

(East China Normal University, Shanghai)

Lin Chenglu

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: A semiconductor on semiinsulator (SOI) structure was obtained in which the insulator substrate is neutron-irradiated silicon, then annealed with CW Ar⁺ or Q switched Nd:YAG laser, semiconductor layer was obtained and the implanted impurities in it was activated. The experimental results proved it to be an ideal material for developing SOI devices by low-temperature process.

引 言

SOI 材料在制作高速、抗辐照电路、复合功能器件以及实现三维集成电路等方面有着重要的应用前景。实现 SOI 结构有多种途径:除蓝宝石外延(SOS)工艺外,还有多晶硅的激光或电子束熔化再结晶^[1]、石墨条加热再结晶^[2]和在单晶硅中大剂量深注入氧形成隔离层^[3]等方法。利用中子辐照使单晶硅损伤,得到了绝缘层衬底,然后以激光退火消除表面层损伤而获得 SOI 结构^[4]。与 SOS 等其他半导体工艺相比较,这是一种潜力较大的方式。但是相应的器件工艺要用低温,而不能用常规的高温工艺。本文研究了中子辐照单晶硅及激光退火工艺,以及所制成的 SOI 材料的特性。

实 验 方 法

原始材料为 P 型(111)Si 单晶,电阻率 1500 Ω·cm,在反应堆中进行热中子辐照,辐比率 30:1,辐照的实际剂量为 $5 \times 10^{15} \sim 1.11 \times 10^{16} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$,辐照后的材料电阻率在 $1 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上,然后将 Si 片进

行单面抛光。

在上述部分样品的抛光面注入能量为 100 keV,剂量为 10^{16} cm^{-2} 的 As 离子。分别用 CW Ar⁺ 激光和声光调 Q-Nd:YAG 激光进行退火试验,并以高频感应加热方法在 N₂ 保护下,对注入前后的样品进行热退火。

用高阻材料四探针测量仪测电阻率。用扩展电阻测试仪测量样品载流子浓度分布。用 2MeV He⁺ 对注入样品激光前后的杂质分布进行背散射(RBS)分析。

以西德 BRUKER 公司的 ER200D 型电子自旋共振(ESR)测试仪对不同温度热退火后的样品进行 ESR 测试。

结 果 和 讨 论

(1) 电阻率为 1500 Ω·cm、P 型 Si 单晶,经中子辐照的 Si 电阻率上升到 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上。这是中子与 Si 的同位素进行核反应产生众多的缺陷中心的结果。

为了研究中子辐照后材料中的缺陷及其在退火

中的行为,对未注入 As 离子的样品在退火前以及在 N_2 保护下分别进行 300°C、400°C、600°C 和 700°C, 30 分钟常规退火,然后分别用电子自旋共振测量,所得结果如图 1。测量在室温下进行,取磁场 $H \perp (111)$ 共振信号的 g 值可由下列关系式给出: $h\nu = g\beta H$ 。其中, ν 为微波频率, β 为玻尔磁子, H 为吸收峰处的磁场强度。从未退火到 300°C、400°C、600°C、700°C 常规退火,依次 ESR 谱的中心磁场分别为 3472.36 G、3472.40 G、3472.26 G、3472.42 G、3472.44 G,扫描范围 100 G,计算机积累三次。标准样品 DPPH ($g=2.0036$)是在与样品同条件下测得的。

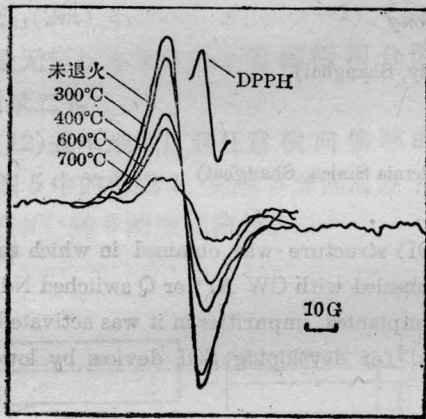


图 1 中子辐照 Si 样品中缺陷中心随退火温度的变化。 $H \perp (111)$, 微波功率 6.3 mW, 微波频率 9.75 GHz

上述分析所得出的 g 值为 2.008 或 2.007,这是一种五个空位结合成簇状的缺陷中心 (V_5)—Si— P_1 ^[5]。辐照样品内还会有其他缺陷中心,碍于分析灵敏度没有测出。基于上述实验,我们认为,在辐照过的样品中 P_1 缺陷中心浓度最大。从图中可以观察到,随退火温度的升高,该缺陷中心对应的 ESR 峰值高度逐渐下降,700°C 退火样品峰值高度下降为原来未退火的 20%。根据 ESR 分析,我们认为该 SOI 结构用于制作器件的后续工艺温度不宜超过 500°C。

(2) 中子辐照后的硅样品,以连续波 Ar^+ 激光退火。选用功率为 12 W,样品预热温度 400°C,光斑直径 50 μm ,样品退火时 x 方向扫描速度 5 cm/s, y 方向步进为 20 μm /次。退火后样品进行 X 射线劳厄像分析,像片如图 2。像片上是一组很好的单晶衍射斑点,证明表面确实恢复了完整的单晶结构。

(3) 在室温(300K)下硅的禁带宽度为 1.11 eV。CW Ar^+ 激光光子能量(两条主要谱线 488.0 nm 和 514.5 nm 相对应的光子能量为 2.54 eV 和 2.41 eV)

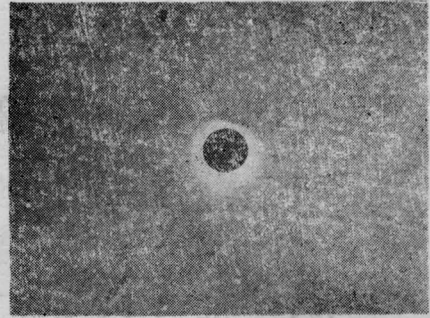


图 2 中子辐照 Si 样品 CW Ar^+ 激光退火(12 W)后的射线劳厄像照片

大于硅禁带宽度,当半导体材料受到这种激光辐照时,产生了带间吸收过程。调 Q-Nd:YAG 激光光子能量(1.17 eV)接近于结晶硅的吸收边,又由于晶格损伤,使导带底的状态密度向低能量一侧展宽,从而使吸收系数大大增加,同时,在实验中采用了把样品预热的办法,增加材料中的自由载流子浓度,提高了对激光能量的吸收。由于半导体吸收激光能量达到热平衡的弛豫时间与激光辐照的持续时间相比,一般要小好几个数量级。所以在激光辐照时间内,材料吸收光子的瞬间就立即转变为热。

另外,非晶硅对 CW Ar^+ 激光与调 Q-Nd:YAG 激光的吸收长度分别为 100 nm 和 1 μm 。因此,对于中子辐照后的硅,两种激光退火后,退火的深度以及杂质再分布的情况是不同的。

(4) 为了便于进行退火层电特性评估,对这些样品进行了 As 离子注入(100 keV, $1 \times 10^{16} cm^{-2}$),并分别用两种激光进行退火试验:

(a) CW Ar^+ 激光,功率 7~12 W,样品预热温度 400°C,光斑直径 50 μm ,退火时 x 方向扫描速度为 5 cm/s, y 方向步进 20 μm /次。

(b) 声光调 Q-Nd:YAG 激光退火,平均功率 1~4 W(脉冲功率 $5 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ W),重复频率 2 kHz,样品预热温度 350°C,退火时 x 方向扫描速度 2 cm/s, y 方向步进 20 μm /次。

以 2 MeV He^+ 对激光退火后的样品进行背散射分析,见图 3。结果表明,注入杂质在两种激光退火情况下,都发生了再分布,而调 Q-Nd:YAG 激光退火的样品杂质再分布比 CW Ar^+ 激光退火的严重得多,基本上是平均分布。

这就证实,本实验条件下 CW Ar^+ 激光对材料的主要作用是固相再结晶,而调 Q-Nd:YAG 激光对材料的主要作用则是液相再结晶。因只有液相时,巨大的扩散系数才能使杂质产生近似平均的分布^[6]。

以四探针对两种激光退火后以及热退火后的样

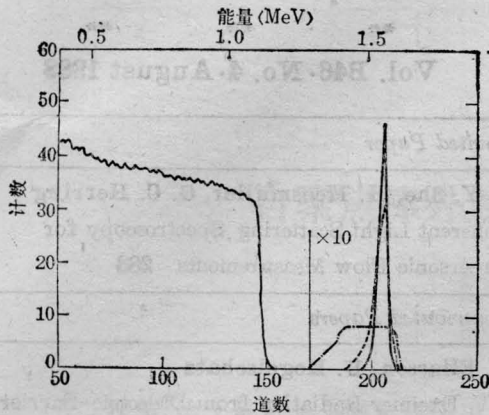


图3 中子辐照的Si注As⁺并经激光退火后, 2MeV He⁺ RBS分析所得到的能谱
实线—注入分布; 虚线—CW Ar⁺激光(7.1 W)退火; 点划线—调Q-Nd:YAG激光退火, 平均功率为3.7 W(脉冲功率1.9×10⁴W)

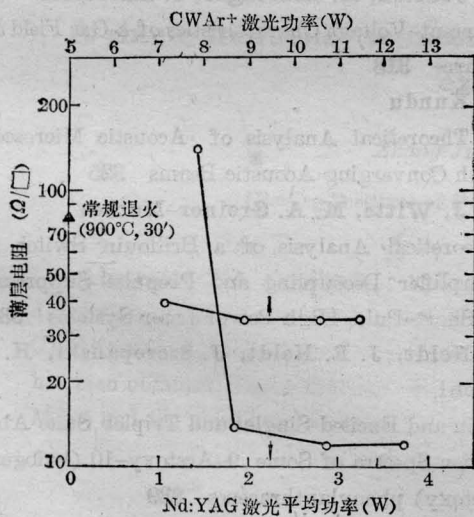


图4, 100 keV, 1×10¹⁶As⁺cm⁻²注入中子辐照Si, 薄层电阻与激光退火以及常规退火条件的关系

品的薄层电阻作了分析。结果见图4。图中, 在CW Ar⁺激光功率大于9W, 表面薄层电阻趋于34Ω/□, 调Q-Nd:YAG平均功率大于2.5W(脉冲功率1.3×10⁴W), 表面薄层电阻趋于12Ω/□, 而900°C、30分钟常规退火后表面薄层电阻为80Ω/□。显然, 从载流子激活率角度看, 对激光退火来讲, 用调Q-Nd:YAG激光退火后单晶的完整性更好, 晶格损伤少, 注入杂质的激活率更高, 所以薄层电阻最低。

图5为扩展电阻测试仪分析得到的CW Ar⁺激光退火与调Q-Nd:YAG激光退火样品载流子浓度的深度分布。可以看到, 与CW Ar⁺激光退火后的杂质分布不同, Q-Nd:YAG激光退火层载流子分布较

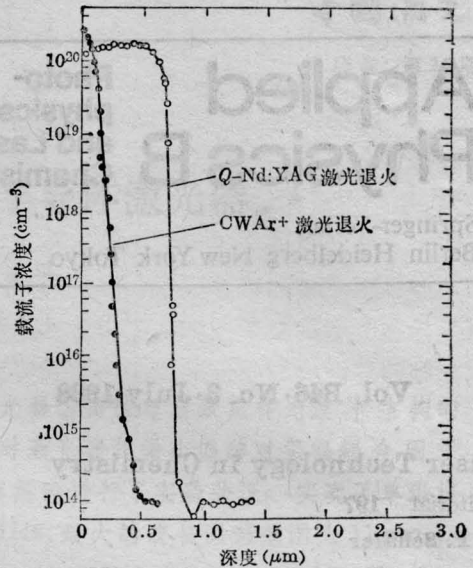


图5 100 keV, 1×10¹⁶As⁺cm⁻²注入中子辐照Si, 扩展电阻测试仪测得的CW Ar⁺激光(7.1 W)和调Q-Nd:YAG激光(平均功率2.8 W, 脉冲功率1.4×10⁴W)退火样品的载流子浓度分布

均匀, 两种激光退火后的结深分别为0.5 μm和0.9 μm。也即熔化深度分别约为0.5 μm和0.9 μm。

根据四探针与扩展电阻的测试结果, 注入As⁺(100 keV, 1×10¹⁶cm⁻²)样品经CW Ar⁺激光与调Q-Nd:YAG激光退火后的主要结果列表如下:

	退火条件	载流子峰值浓度	薄层电阻	再结晶层厚度	退火机制
CW Ar ⁺ 激光	7.1 W x: 5 cm/s y: 20 μm/次	2.7×10 ²⁰ cm ⁻³	40 Ω/□	0.5 μm	固相再结晶
YAG激光	平均功率 2.8 W x: 2 cm/s y: 20 μm/次	1.8×10 ²⁰ cm ⁻³	12 Ω/□	0.9 μm	液相再结晶

参考文献

- 1 林成鲁 *et al.* 中国激光, **12**, 922(1985)
- 2 Fan J C C *et al.* *Phys. Lett.*, **38**, 365 (1981)
- 3 Lam H W *et al.* *J. Crystal Growth*, **63**, 554 (1983)
- 4 Vu Quoc Ho, Takuo Sugano. *IEEE Trans. on Electron Devices*, **ED-29**, 487 (1992)
- 5 Lee Y H *et al.* *Phys. Rev. B*, **8**, 2810 (1973)
- 6 林成鲁 *et al.* 微电子学与计算机, (1), 26 (1985)

(收稿日期: 1987年6月22日)