

硅基片材料激光热处理实验研究

程国义 程念贫 阚成侠 胡宗福

(合肥工业大学管理工程系, 合肥 230009)

提要 介绍硅片材料激光热处理技术, 分析报道了激光热处理和实验结果; 并把这一研究结果试用于晶体管生产线上。

关键词 热光热处理, 半导体器件, 基片, PN 结, 热特性

1 引言

集成技术的发展, 使 VLSI 芯片面积越来越大, 其线条尺寸已缩小到接近微缺陷的大小。因而微缺陷对器件性能、可靠性和成品率产生了不可忽视的影响。例如 Z56 KMOSDRAM, 若其单元器件合格率为 99.99%, 则电路成品率小于 1%, 要想达到值得投产的成品率, 则要求单个元器件合格率为 99.999%。由此可见, 防止、减少和消除材料上的杂质和微缺陷, 是有很大实用价值的^[1]。本文报道用激光热处理, 消除、减少半导体器件基片材料的杂质和微缺陷。

2 实验方法和结果

本实验所用的样品为 N 型硅单晶片, 取制造器件常用的 (100) 晶向, 电阻率为 60~70 $\Omega \cdot \text{cm}$, 硅片厚度为 300 μm , 硅片两面均经离子抛光成镜面。实验装置如图 1 所示。图中 1 为激光器, 2 为转向器, 3 为硅片样品台, 4 为样品台多维运动系统, 5 为真空系统, 6 为光功率抽测显示仪, 7 为光调节器。

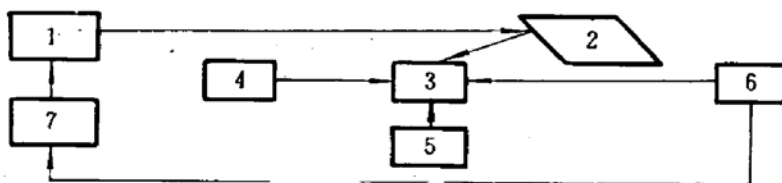


Fig. 1 Block diagram of the experimental apparatus

把硅片经过冷热去离子水煮沸, 超声清洗, 烘干, 放到如图 1 的热处理实验装置里。开启

激光器,同时启动样品台和真空系统,让硅片均匀受激光作用和避免硅片受污染。根据实验所需要的激光功率,可以不断地调节光调节器,以满足预定设计的实验参数,如表 1 所示。

Table 1 Laser parameters and experimental samples

No.	λ (nm)	Laser mode	Output power (W)	Mode of controlling	Sample preheating		Number of samples(ϕ 9mm)
					Temperature ($^{\circ}$ C)	Mode of heating	
1	10.6	transverse mode	500	continuous scanning	120	resistance	100
2	10.6	TEM ₀₀	100	discontinuous scanning	50	resistance	50
3	10.6	TEM ₀₀	50	manual control	50	resistance	50
4	10.6	TEM ₀₀	30	manual control	30	resistance	50

2.1 少子寿命的检测

影响材料少子寿命的主要原因是有害金属杂质与晶格缺陷,它们都在禁带中引入深能级,以复合中心的形式影响少子寿命。我们采用 MOS 结构脉冲 $c-t$ 曲线法测算了激光热处理的硅片样品,其结果列于表 2。

Table 2 The life times of minority carriers affected by laser-hot curing

Serial number of samples		1	2	3	4	5	6	7	8	9
LMC (s)	Before laser processing	8.6	8.0	6.5	2.4	3.8	7.5	4.3	8.8	7.8
	After laser processing	50	35	25	9	21	7.0	15	65	31

LMC: Lifetime of a minority carrier ($\times 10^{-6}$ s)

激光处理的硅片少子寿命平均比未受激光处理的少子寿命提高几十倍。少子寿命的提高意味着有害杂质和晶格缺陷的减少。我们把上述实验样品去除 MOS 结构,经 Secco 溶液腐蚀后,用显微镜观察样品表面,发现激光处理对缺陷的形成确有抑制作用。

2.2 中子活化实验

众所周知,硅中有害杂质的含量几乎在 ppb 以下的超痕量水平,能适用于这种硅材料杂质元素的分析方法是很少的。目前见于报道的只有中子活化分析(NAA)和固体质谱分析。为了进一步确证激光热处理的去杂效果,我们在核工业总公司原子能研究所的协助下,做了中子活化分析。有关中子活化分析方法的详细内容请查看参考文献[2]。

我们将样品放入高纯铝罐封固,然后送到原子反应堆进行热中子轰击,热中子通量为 $10^{12}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$,作用时间约 40 h。取出样品后,采用 $\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ 溶液腐蚀样品,去除表面沾污部分和激光热处理损伤层,分析硅片体内有害金属杂质浓度的变化情况^[3]。腐蚀后的样品再用热 $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2$ 溶液多次清洗,进一步去除样品表面的化学吸附沾污,而后再将样品放入检测器,测试约 2 h,结果经微机数据处理,给出硅片内各种金属杂质浓度,如表 3 所示。

Table 3 Measured concentrations of impurity metals by activation analysis of neutron in Si wafers before and after laser heat processings

No.	Quantity of metal impurity (atoms/cm ³)							
	With laser heat processing				Without laser heat processing			
	Ir	Cu	Au	Na	Ir	Cu	Au	Na
1	3.0×10^{12}	9×10^{10}	2×10^{11}	5×10^{12}	2.5×10^{14}	2.1×10^{13}	3.0×10^{12}	1.6×10^{13}
2		1.5×10^{12}	2.1×10^{11}	2×10^9	2.7×10^{14}	2.8×10^{13}	3.8×10^{12}	2.5×10^{13}
3	5×10^{12}	3.5×10^{12}	1.5×10^{11}	4×10^{12}	3.5×10^{14}	3.2×10^{13}	4.7×10^{12}	2.0×10^{13}
4	8×10^{12}	1.2×10^{12}	1.8×10^{11}	9×10^{12}	4.8×10^{14}	4.0×10^{13}	5×10^{12}	3.4×10^{13}
5	6×10^{12}	6.5×10^{12}	1.7×10^{11}	7×10^{12}	5×10^{14}	3.5×10^{12}	4.5×10^{12}	1.8×10^{13}
6	9×10^{12}	7.5×10^{12}	2.0×10^{11}	8×10^{12}	6×10^{14}	5×10^{13}	3.5×10^{12}	2.7×10^{12}
7	7×10^{12}	8×10^{12}	1.9×10^{11}	5×10^{12}	8×10^{14}	3.7×10^{13}	4.0×10^{12}	3.3×10^{13}

3 激光热处理机理分析

在硅单晶的生产和其后的器件制造工艺中,引入了一些杂质并产生了某些晶格缺陷,要想在上述工艺过程中完全避免和消除,目前是不可能的。为此,人们从保留“动态缺陷”观念出发^[2],在非器件区控制和利用区域缺陷,防止、减少或消除器件有源区缺陷的产生,以提高器件性能。

当激光照射晶体时,晶体中少数载流子吸收激光能量,然后通过相互碰撞把能量转移到晶格中,其发生碰撞的平均时间在 10^{-12} s 数量级,激光照射的持续时间远大于此值^[1]。因此,在激光照射时间内,可以使晶体原子激发,能量相互转移,最终传递给晶体的能量转变为热能,使晶体温度升高。热量在晶体中传导遵守热传导方程

$$C \cdot D \frac{\partial T}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} - DF \quad (1)$$

式中 C, D 分别为单晶片的比热和密度, T 为单晶片中的温度分布, Q_{in} 和 Q_{out} 分别是样品吸收和损耗的功率密度, F 为热流矢量,其表达式为

$$F = k \nabla T + C \cdot D \mathbf{u} \quad (2)$$

式中 k 为单晶片的热传导率, \mathbf{u} 为载物台的运动速度,因为单晶片传导率 k 依附于温度 $k = k(T)$ ^[3],当温度 T 从室温上升到 1700 K 时,热传导率下降一个数量级左右,其近似分析表达式为

$$k(T) = \frac{A}{T - T_0} \quad (3)$$

式中 $A = 299 \text{ W/cm}^2$, $T_0 = 99 \text{ K}$ 。

为了使问题简化,我们考虑一维情况,当光束直径 $d \gg$ 单晶片厚度 l 时,方程(1)可简化为

$$C \cdot D \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] = Q_{in} - Q_{out} \quad (4)$$

方程(4) 是非线性齐次的偏微分方程, 不存在解。但是, 可以用数值计算得到实验晶片内温度 T 的空间分布和时间分布^[4], 继而求出 t 时刻单晶片的微缺陷层的结晶厚度^[5]

$$b = b_0 \int_0^t \exp\left[-\frac{E_a}{k_B T(t')}\right] dt' \tag{5}$$

式中 k_B 为 Boltzmann 常数, E_a 为硅单晶沿 $\langle 100 \rangle$ 方向的激活能, $E_a = 2.35 \text{ eV}$, $b = 3.2 \times 10^{13} \text{ nm/s}$, 于是“动态微缺陷”形成, 造成器件有源区杂质和缺陷转移。

4 激光热处理应用实例

按照上述激光热处理的认识和有关实验参数的选择原则, 我们在马鞍山晶体管厂协助下, 对硅二极管的基片进行了热处理实验, 取得了较理想的效果。

在生产线上, 随机取出 10 片硅片经过磨抛、洗、烘干等工艺过程, 又经过激光热处理后, 传到下道工序做成管芯片。检测其少子寿命和冷热击穿电压以及伏安特性, 分列如表 4、表 5 和图 2 所示。图 2 中 a 和 a' 为激光热处理后的芯片伏安特性曲线; b 和 b' 为未进行激光热处理芯片的伏安特性曲线。从曲线上可以看出冷测试时伏安特性变化不大〔图 2(a)〕。加温热测试时(即模拟器件工作状态), 伏安特性差异很大〔图 2(b)〕, 未经激光处理的器件伏安特性曲线 b' 明显变“软”, 器件工作电压下降; 激光处理的器件伏安特性曲线 a' , 明显变“硬”。在工程使用过程中, 这种二极管工作稳定性好; 寿命长, 因而增加了器件和装备仪器的可靠性。

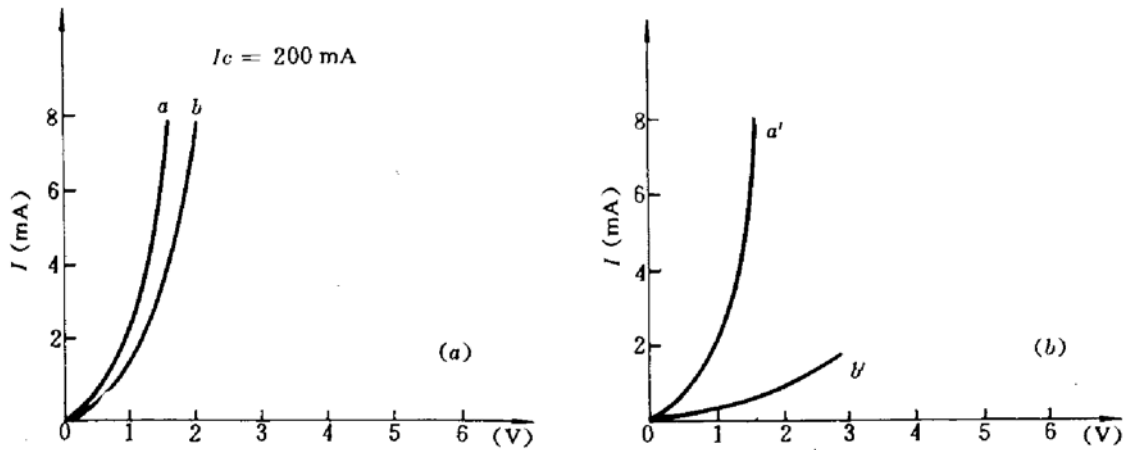


Fig. 2 The volt-ampere characteristics of transistor wafers
(a) cold-measured curves; (b) hot-measured curves

Table 4 Comparison of transistor wafer before and after laser heat processings

Serial number of samples	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LMC Before laser processing	15	18	11	8.5	14	10	12	9.6	10	11.5
LMC After laser processing	37	28	35	10	36	34	34.5	19	31	30.5

LMC; Lifetime of a minority carrier ($\times 10^{-6} \text{ s}$)

Table 5 Comparison of main wafer parameters before and after laser heat processings

Serial number of samples	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
BV	Before laser processing	61	65	58	57	57	64	56	63	64	66
	After laser processing	88	72	75	86	90	82	78	79	84	92

BV: Breakdown Voltage (V)

参 考 文 献

- 1 程国义. 硅片激光情况. 半导体技术, 1984, 5: 18~20
- 2 P. F. Schmidt, C. W. Pearce. *J. Electrochem. Soc.*, 1981, 128: 630
- 3 H. S. Canslaw, J. C. Jaeger. *Conduction Heat in Solids*, 1989. 18, 461
- 4 R. B. Gold *et al.*. *J. Appl. Phys.*, 1980, 51: 136
- 5 沈金萱. 离子注入硅的 CW CO₂ 激光退火. 复旦大学研究生论文集, 1981, 4: 5~21
- 6 陈军宁. 硅片背面激光损伤去杂. 合肥工业大学学报(研究生论文集), 1984, 4(4): 188
- 7 孙金增. 缺陷的控制和利用. 合肥工业大学学术交流论文集, 1990, 1: 58~88

Experimental Study of Hot Curing of Si-wafers by Laser

Cheng Guoyi Cheng Nianpin Kan Chengxia Hu Zongfu

(Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract In this paper laser gettering technique is introduced. Its principle is analysed and some experimental results are presented. This technique is now on trial in a transistor's production line.

Key words laser gettering, semiconductor device's base, *P-N* junction, thermal property