

## 激光对 Si 单晶热敏电阻作用的实验研究

赵继然 江敏华 查贵根 王润文 韦凤辉 庄顺昌

(中国科学院上海光机所)

(中国科学院新疆物理所)

### Experimental study on interaction between laser light and uncrystalline silicon thermistors

Zhao Jiran, Jiang Minhua, Cha Guigen, Wang Runwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Wei Fenghui, Zhuang Shunchang

(Xinjiang Institute of Physics, Academia Sinica, Urumchi)

**提要:** 利用调 Q-YAG 激光对硅单晶热敏电阻的气化烧蚀效应,对硅单晶热敏电阻进行高精度激光调阻。用等效电路网络分析阻值变化情况,与实验结果相符。

**关键词:** 调 Q-YAG 激光,激光调阻,热敏电阻

### 一、前言

利用激光对物质的瞬态气化效应,在微电子工业中,已成功地对薄、厚膜电路和混合集成电路中电阻等元件进行参数或电路功能的修整。激光修整具有精度高、速度快、对材料应变和热影响非常小、容易受微机控制实现加工自动化等特点,成为微电子工业中一种重要技术而受到重视,应用范围日益扩大。Hencke<sup>[1]</sup>报道了用激光修整镍铁合金热敏电阻的结果。从实验方面研究了激光对 Si 单晶热敏电阻的作用。具有负温度特性的 Si 单晶热敏电阻已广泛用于高灵敏温度测量、温度控制和温度补偿技术中。目前要解决元件互换性问题,即要求硅单晶热敏电阻

有高的阻值精度,原有工艺中采用的牙钻磨削办法不易操作,且效率和精度不高。用高功率密度的微细激光束对硅单晶热敏电阻的表层电极和热敏高阻层的瞬态气化进行阻值的高精度修整可以解决元件互换性问题。

### 二、实验装置

调 Q 激光聚焦在硅单晶热敏电阻表面上,作为高通量密度的瞬态热源被表层电极和下面的硅掺杂层所吸收。极高的加热速率使材料按喷溅机理被气化烧蚀<sup>[2]</sup>,且使样品表面很快处于超蒸发温度的过热状态,材料的熔化过程可以忽略。实验装置如图 1 所示。修整激光器采用 Nd:YAG 脉冲激光器 4~8,用 BDN 薄膜 7 作调 Q 元件,由小孔光阑 6

收稿日期:1987年6月15日。

选出单横模。输出的调Q脉冲激光能量  $E$  为  $3\sim 50\text{ mJ}$ 、脉冲宽度  $\tau$  为  $30\text{ ns}$  (FWHM)、发散角  $\theta$  为  $2\text{ mrad}$ 、重复频率  $1\sim 3$  次/s。激光束经由双色全反镜 9~10, 进入扩束镜组 11、13, 再经非球面聚焦镜 14 和  $45^\circ$  转向镜 16 会聚成  $\phi 20\sim 100\ \mu\text{m}$  光斑, 照射在位于焦平面上的硅单晶热敏电阻样品 17 上。样品位移由  $x$ - $y$  工作台 18 控制, 其行程  $60\text{ mm}$ , 精度  $10\ \mu\text{m}$ 。采用氦-氖激光做调准光束, 与  $1.06\ \mu\text{m}$  的修整加工激光束同轴进入光学系统, 为了补偿色差, 光路中置入补偿镜 12、15, 使焦面上调准光束与加工光束重合在同一位置上。用实体显微镜 19 对光束会聚和气化烧蚀情况进行目视监测。

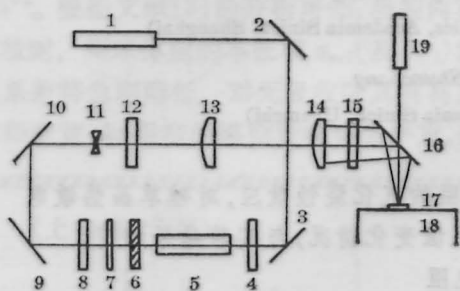


图1 实验装置

1—He-Ne 激光器; 2, 3—全反镜; 4, 8—腔镜;  
5—YAG 棒; 6—选膜孔; 7—BDN 调 Q 片; 9,  
10—双色全反镜; 11, 13—扩束镜; 12, 15—补  
偿镜; 16—转向镜; 17—样品; 18— $x$ - $y$  工作台;  
19—监视显微镜

实验中 Si 单晶热敏电阻阻值的动态测量桥路如图 2 所示, 其中  $R_1$ 、 $R_2$  为电桥比例臂,  $R_x$  为待修整热敏电阻,  $R_c$  为标准热敏电阻。用比较法测量阻值可消除环境温度变化对测量的影响。桥路平衡指示用  $3400R$  数字电压表, 精度  $\pm 10\ \mu\text{V}$ 。若加在桥臂的电压为  $E_i$ , 取  $R_1=R_2$ ,  $R_c-R_x=\Delta R$ , 注意到

$$\Delta R/2R_c \ll 1$$

则有

$$\frac{\Delta R}{R_c} = -\frac{4}{E_i} V_{DC} \quad (1)$$

实验中测量出  $V_{DC}$  值, 便可知待调热敏电阻的相对精度值, 本实验中  $V_{DC}$  读数  $0.00010V$

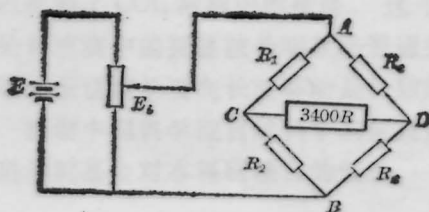


图2 热敏电阻测量桥路

对应阻值相对精度为  $0.1\%$ 。

### 三、实验结果与分析

1. 等效电阻元网络。实验采用的 Si 单晶热敏电阻是在电阻率为  $1\sim 5\ \Omega\cdot\text{cm}$  的重掺杂的 N 型硅单晶薄片上, 两面扩散掺金, 外表面化学涂镍电极, 再切割成  $1\times 1.5\text{ mm}^2$  厚  $0.3\text{ mm}$  的热敏电阻元件。结构如图 3 所示。扩散掺金过程主要是间隙扩散, 为替位扩散, 扩散后接近表面的薄层约  $10\ \mu\text{m}$ , 含金浓度较高为  $3\times 10^{15}\sim 5\times 10^{15}/\text{cm}^3$ , 形成表面高阻层, 电阻率  $\rho$  为  $5\sim 15\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ 。金在硅中形成两个复合中心, 即导带之下  $0.54\text{ eV}$  处的受主能级和价带顶之上  $0.35\text{ eV}$  处的施主能级。被陷在金能级的电子或空穴受热激发至导带或价带贡献电导而成热敏电阻, 具有负温度系数。

为了研究激光对 Si 单晶热敏电阻气化烧蚀调阻作用, 将 Si 单晶热敏电阻等效为电阻元网络, 就是把高阻热敏层的体电阻等效为若干个有集总参数电阻元的并联, 每个电阻元的阻值与激光气化烧蚀热敏层的体元电阻相当, 两面高阻热敏层间的低阻区, 可视为短路, 整个热敏电阻等效为电阻元的串联网络。如图 4(a) 所示。

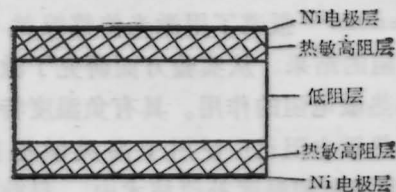


图3 硅单晶热敏电阻结构示意图

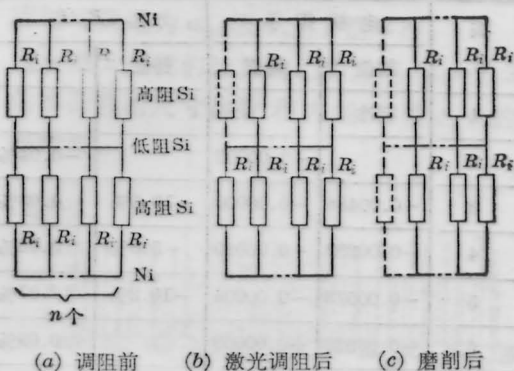


图4 Si单晶热敏电阻等效电阻元网络

设Si单晶热敏电阻表面电极面积为 $S$ ,每次激光气化烧蚀镍-热敏层面积为 $\Delta S$ ,且 $S/\Delta S=n$ ,对应面元 $\Delta S$ 的电阻 $R_i$ ,则调阻前热敏电阻阻值是

$$R_0 = R_i/n + R_i/n = 2R_i/n \quad (2)$$

激光调阻时,烧蚀 $\Delta S$ 处热敏层相当切掉一个电阻元,如图4(b)所示,这时热敏电阻值为

$$R_l = \frac{R_i}{n-1} + \frac{R_i}{n} = \frac{2R_i}{n-1} - \frac{R_i}{(n-1)n} \quad (3)$$

由公式(1)、(2)得到每经激光调阻一次后阻值相对变化量为

$$\frac{\Delta R_l}{R_0} = \frac{1}{2(n-1)} = \frac{\pi D^2}{8S - 2\pi D^2} \quad (4)$$

$D$ 为烧蚀坑平均直径,  $\Delta R_l = R_i/n(n-1)$ ,图5给出样品的激光气化烧蚀斑直径 $D$ 与调阻值相对变化量关系的曲线,表明要提高激光调阻精度就要尽量采用小的聚焦光束,而要提高调阻速度就要加大调阻激光束的直径。

磨削法修整热敏电阻阻值相当图4(c)情形,磨去 $\Delta S$ 样品等效切断两个 $R_i$ 阻元,这时热敏电阻值:

$$R_g = 2R_i/(n-1) \quad (5)$$

阻值变化量相对值

$$\frac{\Delta R_g}{R_0} = \frac{1}{n-1} \quad (6)$$

其中 $\Delta R_g = 2R_i/(n-1)n$ 。比较(4)式和(6)式,可以看出激光修整与磨削调阻两方法,当调整同样 $\Delta S$ 面积时,磨削法调阻变化量是

激光修整法的两倍,即使磨削法能准确削掉微小面元 $\Delta S$ ,调阻精度也仅为激光法的50%。

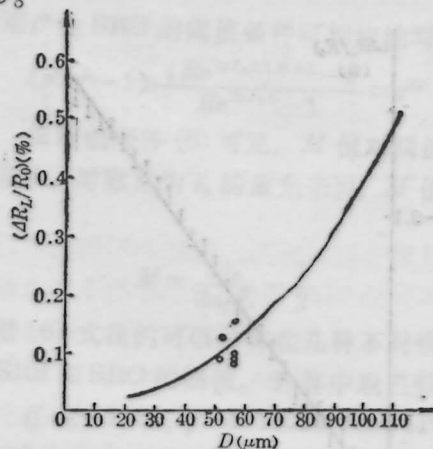


图5 激光气化烧蚀斑直径 $D$ 与阻值相对变化量的关系

曲线为计算值;“O”为实验测量值

## 2. 激光修整Si单晶热敏电阻的精度。

实验中充电电压在600~800V间变化,聚焦激光束每气化样品一次,样品移动100 $\mu\text{m}$ ,直至 $V_{DC}$ 达到要求的精度值为止。取20只Si单晶热敏电阻为一组进行激光调阻,调阻实验结果如表1所示。标准热敏电阻取 $R_0 = 10.9\text{k}\Omega$ ,待调热敏电阻 $R_x$ 与标准 $R_0$ 阻值相比较,阻值分散范围在10%以内。调阻后精度优于 $\pm 0.1\%$ ,每个激光脉冲修整阻值变化量在0.02~0.05%之间,足以满足元件互换性的要求。图6给出典型的激光修整Si单晶热敏电阻阻值变化曲线。实线是按公式(4)计算值,样品面积 $S = 1.00\text{mm} \times 1.17\text{mm}$ ;前两个调阻激光脉冲的电源电压600V,以后均为750V;烧蚀坑上面直径 $\phi = 80\mu\text{m}$ ;取锥形修整系数 $K = 0.8$ ,  $K\phi = D$ 。竖直短划线是实测值,与计算值相符。图7(a)给出电子显微镜拍摄的没有激光作用时Si掺杂层表面形貌;(b)是激光作用在样品上烧蚀坑的正视形貌( $\times 800$ );(c)是烧蚀坑的纵切面形貌,凹坑呈锥形,边缘斜率3:10。实验中烧蚀坑直径通常为20~100 $\mu\text{m}$ ,深约50~80 $\mu\text{m}$ ,

这一深度表明足以将样品的上热敏层气化掉。相应的样品表面激光功率密度约为  $7.8 \text{ GW/cm}^2$ 。

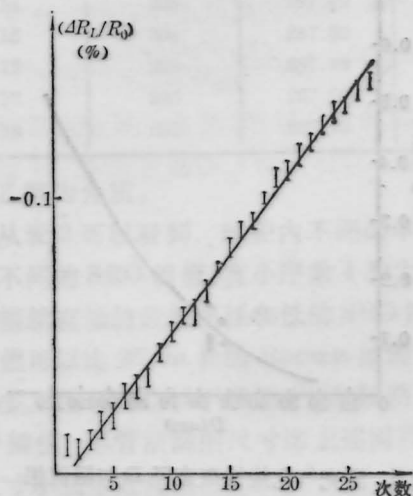


图6 激光修整热敏电阻阻值变化曲线

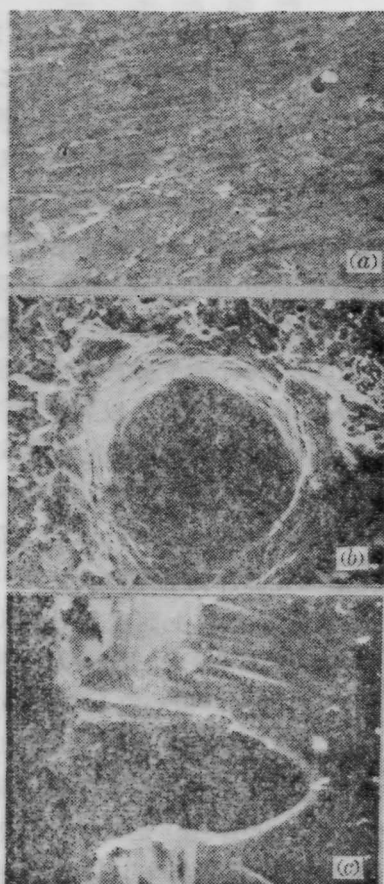


图7 样品形貌电镜照片

表 1

编号	电桥指示		$R_x - R_c / R_c$	
	初值	终值	初值	终值
1	标准			
2		-0.00002		-0.04%
3	-0.00486	-0.00000	-10.0%	0.03%
4	-0.00263	-0.00000	-5.6%	0.02%
5	-0.00573	-0.00004	-10.2%	-0.07%
6	-0.00578	+0.00003		0.09%
7	-0.00543	+0.00001	-12.2%	0.07%
8	-0.01470	-0.00000	-39.4%	0.02%
9	-0.00645	-0.00001	-12.4%	-0.05%
10	-0.00692	-0.00002	-16.1%	-0.06%
11	-0.00123	-0.00002	-2.65%	-0.06%
12	-0.00626	+0.00005	-13.7%	0.04%
13	-0.00552	+0.00003	-12.7%	0.02%
14	-0.00367	+0.00001	-8.0%	-0.06%
15	-0.00138	-0.00002	-2.9%	-0.04%
16	-0.00412	-0.00003	-9.1%	-0.08%
17	-0.00101	+0.00002		-0.01%
18	-0.00105	+0.00001		0.03%
19	-0.00460	-0.00002	-9.8%	-0.09%
20	-0.00465	-0.00002		-0.06%
21	-0.00429	-0.00002	-10.0%	-0.09%
22	-0.00265	+0.00001	-5.6%	0.03%
23	-0.00400	-0.00003	-9.1%	-0.08%
24	-0.00462	-0.00002	-10.0%	-0.09%
$(\Delta R/R)$				0.057%

3. 激光作用后硅单晶热敏电阻的伏安特性和温阻特性。取激光调阻作用后的热敏电阻样品和未经激光作用的标准样品，分别测量其伏安特性和温阻特性，结果示于图8和图9。图8中样品阻值相对误差小于0.1%，测试温度为  $20^\circ\text{C}$ ，从图中曲线可见两者伏安特性完全相同。图9中两样品的阻温特性曲线形状是相同的。经测量，激光作用

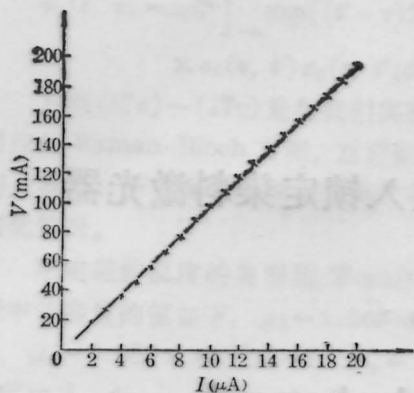


图8 Si单晶热敏电阻伏安特性(20°C)  
—○— 未经激光修整样品的伏安特性(4211#)  
—×— 经激光修整后样品的伏安特性(4212#)  
(两样品阻值相对误差小于1%)

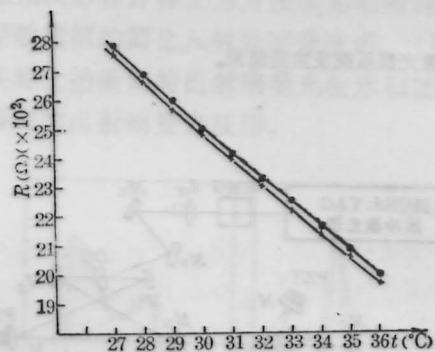


图9 Si单晶热敏电阻的温度特性  
—○— 未经激光修整的样品(4213#)  
—×— 经激光修整后的样品(4214#)

硅单晶热敏电阻后,其 $B$ 参数无明显变化,说明经过激光照射作用后,硅单晶热敏电阻特性不变。

#### 4. 实验中发现的两个有趣现象。

正常的激光烧蚀调阻是阻值越调越大,实验中发现在用能量器件,激光束散焦照在样品表面时(激光脉冲宽度约 $100\mu\text{s}$ ,单脉冲能量 $60\text{mJ}$ ,光斑直径 $300\mu\text{m}$ ),低能量密度的激光对硅单晶热敏电阻的作用,使阻值降低的反常现象。这可能是由于激光作用的瞬态热源使样品中局部杂质再分布,从而改变了载流子浓度造成的,也可能是由于局部电极和热敏层未完全气化,引起相应电阻元的

阻值变小造成的,有待测定杂质分布后予以判断。

实验中还发现在用调 $Q$ 激光修整样品时,如果将孔洞打穿,或是激光束照射在样品边缘上,也出现热敏电阻值的下降现象,对正常调阻样品气化烧蚀洞作切面分析,同时对比激光束照射在样品边缘上的烧蚀洞,在其附近做电子显微镜元素分布分析,结果示于图10(a)、(b),可以看出,后者增加了相当大比例的铜、锌元素,显然是由于调阻时激光束照射到样品下面的黄铜电极板,引起溅射到样品上,使局部短路造成的。因此在使用激光修整硅单晶热敏电阻时,要特别注意这一点。另外,如果热敏电阻元件采用列阵式做在大的硅片上再进行激光修整,将有助于提高激光修整热敏电阻的速度。

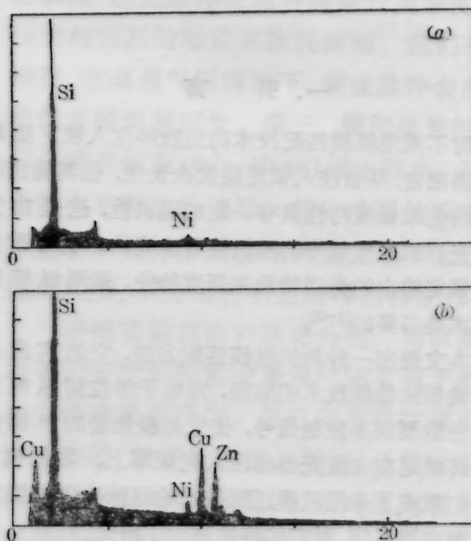


图10

(a) 正常调阻样品烧蚀洞切面元素面分布的电子显微镜分析结果;  
(b) 激光照射样品边缘烧蚀洞附近元素面分布的电子显微镜分析结果

#### 参考文献

- 1 H. Hencke, *Elektronik Industrie*, (5), 54 (1985)
- 2 E. T. Arcchi, E. Q. Schulz-DuBois, *Laser Handbook* (North-Holland, 1972)