

# 激光修整厚膜铂热敏电阻的研究\*

王凤云 赵继然 江敏华

(中国科学院上海光机所, 201800)

陶文荃 许柏年

(上海石化总厂精细化工研究所, 201512)

**提要:** 本文报道用 Nd:YAG 声光调 Q 激光修整厚膜铂热敏电阻的实验研究结果, 分析了激光参数与电阻膜修整质量参数的关系, 讨论了激光修整热敏电阻膜应注意的一些问题。

**关键词:** 声光调 Q-YAG 激光, 激光修整, 厚膜铂热敏电阻

## Study on laser-trimmed thick-film platinum resistor

*Wang Fengyun, Zhao Jiran, Jiang Minhua*

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

*Tao Wenquan, Xu Bainian*

(Fine Chemical Institute, Shanghai Petrochemical Complex)

**Abstract:** We report a thick-film Pt resistor trimmed by an acousto-optic Q-switched Nd:YAG laser and analyse the laser parameters related with the trimming quality parameters of the film. Some problems with respect to laser-trimmed heat sensitive resistor are discussed.

**Key words:** laser-trim, platinum, thick-film resistor

### 一、前言

由于厚膜铂热敏电阻的线性好, 精度高, 寿命长, 测温范围宽等特性, 使得它在热电工程、化工仪表、航天及科学研究中, 需要高精度温度测控的场合, 得到广泛的应用, 我国铂电阻年需要量为几十万只。

开发国产厚膜铂热敏电阻产品的技术难点为: 诸多制备工艺的理化过程中, 保证电阻温度系数不变难以实现; 元件对激光调阻热加工的热敏感性, 给高精度、高合格率带来新的难题。制作厚膜铂热敏电阻的“陶许”工艺, 优质铂浆料保证了 TOR 值符合标准, 解决了前一问题。本文给出解决后一问题的实验结果。

### 二、理论分析

激光修整厚膜铂热敏电阻, 是利用高功率密度脉冲激光束对电阻膜材料的作用完成的, 瞬

态高功率密度激光使材料表层中, 液化、气化、产生激光等离子体等过程几乎同时发生, 过程产物快速向材料外面喷溅, 过程同时通过热传导向材料深层发展, 是一种非稳态蒸发过程<sup>[1, 2]</sup>。这种瞬态非稳态气化, 烧蚀掉铂电阻膜层的微小部分, 从而改变铂膜电阻线条的长度, 完成阻值的精密微调。

在理想情况下, 不考虑热传导的能量损耗, 把激光对铂电阻膜作用的复杂过程等效为简单的材料气化蒸发过程, 这时一个聚焦脉冲激光束, 辐照在铂厚膜电阻  $S$  表面积上, 为其吸收的激光能量, 等于气化烧蚀掉相应部分电阻膜层材料所需的能量, 平衡方程为

$$\hat{P} \cdot \tau \cdot \alpha = Q_{\text{eff}} \cdot \pi D^2 \cdot \delta \rho / 4 \quad (1)$$

式中  $\hat{P}$  为单个调  $Q$  激光脉冲的峰值功率,  $\tau$  为激光脉冲宽度,  $\alpha$  为铂电阻膜材料对  $1.06 \mu\text{m}$  波长激光的吸收系数,  $D$  为聚焦激光束直径,  $\delta$  为铂电阻膜层厚度,  $\rho$  为电阻膜层材料的密度,  $Q_{\text{eff}}$  为等效气化热。

实际上, 激光微调热敏电阻膜的过程中, 聚焦激光束和样品是以速度  $V$  相对运动的, 而且通常用调  $Q$  脉冲激光输出的平均功率  $\bar{P}$  表示调阻激光器的综合性能指标, 这时公式(1)可改写为

$$\bar{P} = \pi Q_{\text{eff}} \rho \delta D V K / 4 \alpha \quad (2)$$

其中  $K$  为气化烧蚀槽的烧斑重叠系数。

### 三、实验结果与讨论

厚膜铂热敏电阻的激光修整, 采用 LT-ILX 型多功能激光调阻机进行, 声光调  $Q$  的 Nd:YAG 激光脉冲频率为  $1 \sim 10 \text{kHz}$ , 脉宽  $\tau$  为  $250 \text{ns}$ , 激光波长  $1.06 \mu\text{m}$ , 聚焦激光束直径  $D$  为  $30 \sim 150 \mu\text{m}$  可调。

厚膜铂热敏电阻网络是采用“陶许”工艺制作的, 铂膜电阻线条宽  $170 \sim 200 \mu\text{m}$ , 厚  $15 \sim 20 \mu\text{m}$ , 网络中专门设计若干并联铂膜电阻线, 分别为阻值的粗、中、细调和微调区。

#### 3.1 激光气化烧蚀铂膜

实验表明, 用上述激光系统, 声光调制频率  $2 \text{kHz}$ , 聚焦激光束直径  $30 \mu\text{m}$ , 输出调  $Q$  激光平均功率为  $1 \text{W}$  时, 即可有效切断铂膜电阻线条, 切槽照片示于图 1, 图 1(a) 是厚膜铂热敏电阻三个粗调区的激光切槽照片, 图 1(b) 是其中一条切槽的剖面显微照片。切槽呈劈形, 铂层切断宽约  $30 \mu\text{m}$ , 切槽深  $60 \mu\text{m}$ , 其中深入到瓷质基片中  $40 \mu\text{m}$ 。这时气化烧蚀铂层的激光峰值功率密度为  $0.28 \times 10^9 \text{W/cm}^2$ 。由于铂是高原子序数金属, 在  $10^9 \text{W/cm}^2$  量级的激光作用下, 不可能产生各层电子全剥离的强电离激光等离子体, 只能产生部分电子剥离的弱电离等离子体, 激光烧蚀喷溅物是这种弱电离等离子体、环境中中性气体等离子体和铂气化液化产物的混合物。按高斯分布的激光束中心强度最大, 气化烧蚀过程向样品深层发展的深度最深, 混合物的快速膨胀, 导致向材料外面空间的喷溅, 从而形成切槽的劈状剖面。

公式(2)中铂层对  $1.06 \mu\text{m}$  激光吸收系数  $\alpha$ , 除与铂本身物理性质有关外, 还与烧结铂层表面粗糙程度以及包封玻璃釉引起的附加吸收反射有关, 铂层密度  $\rho$ , 除与铂金属密度有关外, 还与铂浆烧结后致密程度有关,  $Q_{\text{eff}}$  是烧蚀过程简化处理的等效气化热, 这些参数随样品工艺条件变化较大, 没必要测定其具体数值。激光调阻应用中, 对  $\pi Q_{\text{eff}} \rho \delta / 4 \alpha$ , 由实验给出经

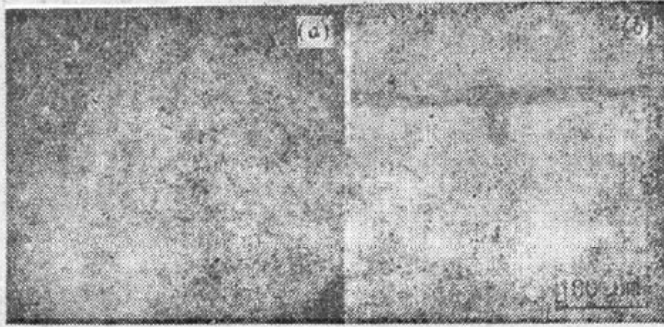


Fig. 1 Grooving photograph of laser-trimmed thick-film Pt resistor

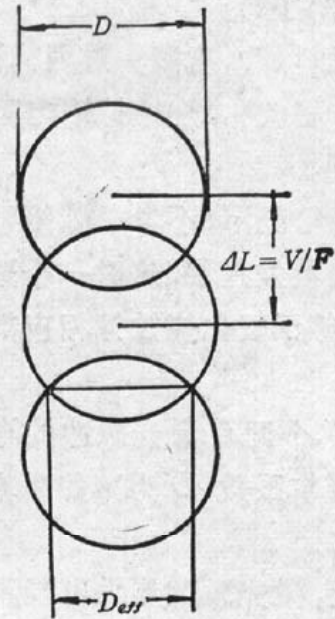


Fig. 2 Overlap of laser vaporization spots

验数据是有实际意义的。对于我们的实验有

$$\bar{P} = 55.5 \text{ J/cm}^2 \cdot DVK \quad (3)$$

激光气化烧蚀切槽宽度的大小, 可通过改变聚焦激光束焦斑直径  $D$  来实现, 应小于相邻铂膜电阻线条的间距, 实验中采用  $30 \sim 50 \mu\text{m}$  焦斑直径可满足现有样品的需要, 亦可满足样品进一步小型化的要求。

切槽是由一系列直径为  $D$  的圆形气化烧斑重叠而成, 相邻两烧斑间距为  $\Delta L = V/F$ , 如图 2 所示, 烧斑重叠越密, 切槽边缘越光滑, 定义烧斑重叠系数  $K$  为

$$K = D/\Delta L = Df/V \quad (4)$$

$K$  的取值范围  $1 - \infty$ ,  $K_{\min} = 1$  时, 对应相邻两个烧斑相切的情形。  $K_{\max} = \infty$  时, 对应烧斑全部重合的情形, 这时  $V = 0$ , 根据罗彼塔法则,  $VK = Df$ , 公式 (2), (3) 仍然成立。图 1 中切槽对应  $V = 330 \mu\text{m/s}$ , 此时  $K = 180$ , 在 30 倍显微镜下观察切槽边缘是十分光滑的直线。提高速度  $V$ ,  $K$  值将有所下降, 切槽有效宽度  $D_{\text{eff}} = \sqrt{K^2 - 1} \cdot D/K$ , 切槽边缘的相对起伏为

$$\frac{D - D_{\text{eff}}}{2D} = \frac{K - \sqrt{K^2 - 1}}{2K} \quad (5)$$

从 (5) 式可知, 取  $K = 5$  时, 槽宽起伏为 0.01,  $K = 15$  时, 槽宽起伏为 0.001, 所以实际选取  $K$  为 5~15, 切槽边缘已足够光滑。

### 3.2 激光微调电阻膜层的调阻精度与成品率

激光精密调阻过程中, 需对样品阻值实时测量, 与一般电阻激光微调不同, 铂电阻膜对调阻激光热灵敏, 必须采取措施减小这种热影响, 才能保证一定的调阻精度。为此我们采用热补偿非平衡电桥方法作动态测量, 标准阻值的厚膜铂电阻与待修整的厚膜铂电阻, 分别接在桥路的两臂, 作为测量的室温补偿。两者放在同一块热沉样品盘上, 作为传热平衡补偿。用 AC15/2 型直流复射式检流计和 FLUKE45/CH 多功能测试仪作非平衡指示。测量系统满度量程为  $110 \Omega$ , 用精密电桥作相对标定, 检流计测阻分辨率  $0.01 \Omega/\text{div}$ , 电压表测阻分辨率  $0.01 \Omega$

$/4\mu\text{V}$ , 测量相对精度  $0.01\ \Omega/100\ \Omega=10^{-4}$ 。

决定激光微调热敏电阻膜的阻值精度的因素有: (1) 电阻膜层激光切除的最小可控量所引起阻值的变化量, 优于  $10^{-4}$ ; (2) 由于铂膜电阻的热敏特性, 实时测量值中含有样品受热升温引起的阻值变化, 这个变化依调阻实时条件而异, 不是恒定的, 因而影响终值精度。虽然室温补偿、散热平衡、冷光照明等措施可有效减小热影响, 但不能根除。实验中调阻实时测量精度控制在  $3\times 10^{-4}$ , 相当  $0^\circ\text{C}$  时, 阻值  $100\ \Omega\pm 0.03\ \Omega$ , 同一批样品经产品质量监督检测中心做全性能检测, 结果列于表 1。精度为  $100\pm 0.06\ \Omega$  对应  $0^\circ\text{C}$  允差  $\pm 0.15^\circ\text{C}$ , 精度为  $100\pm 0.12\ \Omega$  对应  $0^\circ\text{C}$  允差  $\pm 0.30^\circ\text{C}$ , 从表中可见我们激光微调的厚膜铂热敏电阻样品, 阻值相对精度实际达到  $6\times 10^{-5}$ 。

铂浆印刷到基片上, 烧结后铂层厚度有一定起伏, 导致元件初始阻值的散在性。将元件上所有调阻区都利用后阻值可调整到标称值 ( $100\ \Omega, 0^\circ\text{C}$ ) 的样品为可调样品, 其初值大于  $75\ \Omega$  ( $0^\circ\text{C}$ )。对于可调样品, 激光调阻的成品率可达 100%。

Table 1 Performance test result of Pt100 Samples

Item	Technical standard	Unit	Measurement result						Conclusion
			1	2	3	4	5	6	
Transport under basic environments	Temperature converted variations of $R(^\circ\text{C})$ not more than $\pm 0.30^\circ\text{C}$ after test	$^\circ\text{C}$	$\pm 0.07$	$\pm 0.08$	$\pm 0.10$	$\pm 0.04$	$\pm 0.06$	$\pm 0.05$	Up to standard
Assembly quality and appearance	Correct assemblage, reliable, no component shortage, circuit break, short circuit or crazing		good	good	good	good	good	good	Up to standard
Room temperature insulating resistance	$\geq 100\ \text{M}\Omega$	$\text{M}\Omega$	$>100$	$>100$	$>100$	$>100$	$>100$	$>100$	Up to standard
Self-heating effect		$^\circ\text{C}/\text{MW}$	0.10	0.21	0.0	0.10	0.09	0.14	Up to standard
Heating response time		s	5.5	5.4	5.4	5.2	5.6	5.8	Up to standard
Allowable error	$\pm 0.30^\circ\text{C}$ at $0^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	+0.07	+0.08	+0.10	+0.04	+0.06	+0.05	Up to standard
	$\pm 0.80^\circ\text{C}$ at $100^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	+0.17	+0.18	+0.22	+0.17	+0.13	+0.20	
	$\pm 2.40^\circ\text{C}$ at $410.527^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	-0.66	-0.60	-0.50	-0.49	-0.73	-0.48	
	$\pm 3.30^\circ\text{C}$ at $600^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	-1.19	-1.24	-0.97	-0.95	-1.38	-1.04	
	$\pm 0.69^\circ\text{C}$ at $-78.477^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	-0.07	+0.41	-0.03	-0.07	-0.17	-0.35	
Temperature cycle effect	$\leq 0.30^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	0.08	0.01	0.02	0.00	0.03	0.01	Up to standard
Limit temperature test	$\leq 0.30^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	0.11	0.02	0.01	0.15	0.17	0.19	Up to standard
Surface temperature insulating resistance	$\geq 2\ \text{M}\Omega$	$\text{M}\Omega$	10	$>10$	10	5	5	5	Up to standard

### 3.3 激光微调电阻速度的限制因素

激光束与待调样品的相对速度  $V$  是由切槽宽度  $D$ 、脉冲频率  $F$ 、烧斑重叠系数  $K$  决定的, 取  $D=30\ \mu\text{m}$ ,  $F=2\ \text{kHz}$ ,  $K=10$  时, 则  $V=6\ \text{mm/s}$ , 光束扫过元件需  $2.5\ \text{s}$ , 当  $K=180$  时, 需  $45\ \text{s}$ , 这是限制元件调阻速度的一种因素。另一因素是热影响下, 由于热敏样品固有的热响应时间, 增大了散热平衡时间(约  $2\sim 3\ \text{s}$ )。因此, 微调好一个样品需  $30$  至  $60\ \text{s}$ 。限制了厚膜铂热敏电阻的批量生产效率。

### 3.4 激光切割瓷质基片和电极引线焊接。

厚膜铂热敏电阻的基片, 采用高纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷片, 厚  $0.6\ \text{mm}$ , 用 CWYAG 声光调 Q 脉冲激光可以切划基片, 只要把铂热敏电阻膜的物理参数换成瓷片相应的参数, 公式(1)、(2)的分析同样适于划片。图 3 给出  $\bar{P}$  与  $\delta D^2 F$  关系的实验结果, 取  $\pi Q_{\text{eff}}\rho/\alpha=20.9\times 10^9\ [\text{J}/\text{M}^3]$  可弥合实验数据, 即  $\bar{P}=20.9\times 10^9\ [\text{J}/\text{M}^3]\cdot\delta D V t$ 。图 4 给出切割瓷片切槽的显微照片, (a) 为激光划片槽宽  $31\ \mu\text{m}$ , (b) 中,  $\bar{P}=10\ \text{W}$ , 划槽深度  $332\ \mu\text{m}$ , 约为片厚二分之一。容易分离。

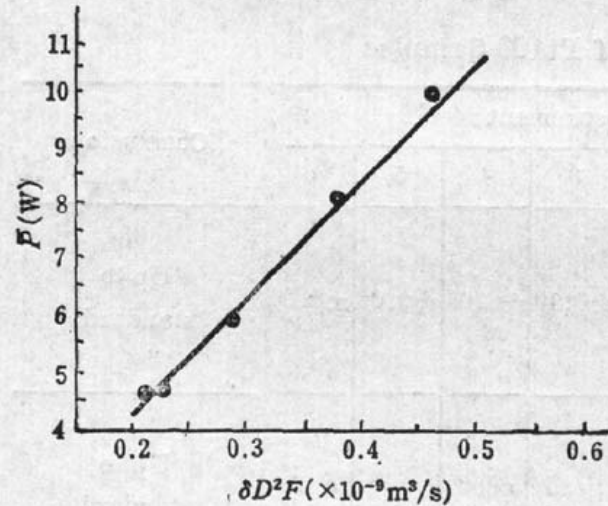


Fig. 3  $\bar{P}$  as a function of  $\delta D^2 F$  during laser-scribing of porcelain

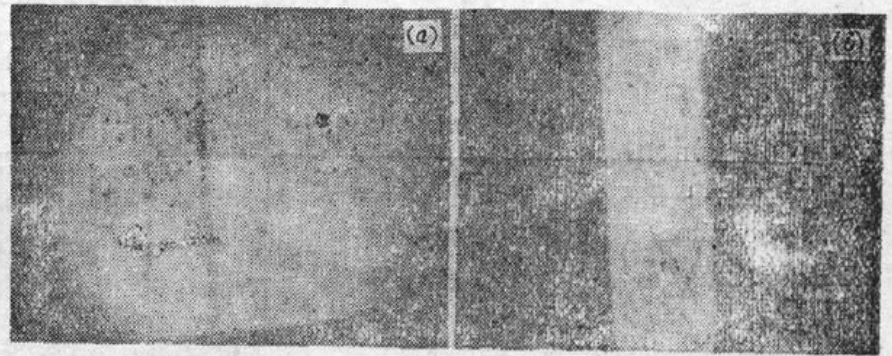


Fig. 4 (a) Grooving photograph of laser-scribing of porcelain; (b) Grooving cross section photograph of laser-scribing of porcelain ( $\bar{P}=10\ \text{W}$ , slot depth  $332\ \mu\text{m}$ )

厚膜铂热敏电阻的电极引线直径  $0.2\ \text{mm}$  的铂丝与  $20\ \mu\text{m}$  厚铂膜焊接, 用连续激光的聚焦光束, 在一定能量密度下, 使铂材料熔化, 熔区含有的铂膜与铂丝的再凝固即完成焊接。连续激光功率  $P_{\text{cw}}=23\ \text{W}$  时, 焊接效果好,  $30\ \text{W}$  时, 铂膜易烧穿。焊接的电极引线经包封处理后有足够的强度。

感谢徐至展研究员对激光作用铂电阻产生激光等离子体属性的有益讨论。江森华、陈韬略、王树达同志也参加了本实验所用激光调阻机的研制工作。

### 参 考 文 献

- 1 F. T. Arecchi *et al.*, Laser Handbook, Vol. 1, Amsterdam, North-Holland, Pub. Co. 1972, 1027
- 2 Zhao Jiran, Jiang Minhua *et al.*, Chinese Physics, 9(4), 1086~1091 (1989)