

文章编号: 0258-7025(2005)02-0281-06

玻璃基板上激光微细熔覆直写 电阻技术的研究

李慧玲, 曾晓雁*, 李祥友

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 介绍了玻璃基板上激光微细熔覆柔性直写电阻的基本原理及其工艺, 系统地研究了各工艺参数的变化对电阻阻值的影响规律。通过热作用、激光与物质的相互作用原理理论分析了电阻膜的形成以及组织、结构、性能间的关系, 确立了制备电阻的最佳工艺参数和获得高精度、小误差电阻阻值测试的最佳方法。结果表明, 采用该技术可以在无掩膜下通过调节电阻的形状、大小、体积以及激光加工参数, 一步完成所需高精度、高质量、高性能电阻元件的制备和修复, 不需要电阻的微调, 工艺简单、灵活、速度快、成本低, 具有广阔的应用前景。

关键词 激光技术; 激光微细熔覆; 柔性直写; 电阻

中图分类号 TN 605 **文献标识码** A

Direct Fabrication of Resistor on Glass Board by Laser Micro-Fine Cladding

LI Hui-ling, ZENG Xiao-yan, LI Xiang-you

(State Key Lab of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Basic principle and technologies of direct fabrication of resistor on glass structure by micro-fine cladding were introduced in this paper. The effect of technologic parameters on resistance values was systemically studied. Based on the thermal analysis and interacting principle between laser and matters, formation of esistance films and relation between structure and properties were theoretically analyzed. The optimal technologic parameters about direct writing resistance and the optimal testing method of high-precision and small-error resistance values were obtained. The results demonstrated that laser micro-fine cladding method by one-step can realize fabrication and repair of high-quality, high-precision and high-property resistance components without mask in virtue of shape, size and volume of resistance and laser processing parameters adjusted, and need not to trim resistances. With the simple and flexible technology, rapid velocity and low cost, the technique is possessed of wide applied prospect.

Key words laser technique; laser micro-cladding; direct writing; resistor

1 引 言

厚膜电路制作中, 电阻的形成与阻值的精确控制一般采用两步法完成, 即先利用丝网印刷等方法在基板表面预制电阻, 经过烧结成型后, 再采用激光微调设备对电阻值进行微调, 直到获得所需要的阻

值。这种工艺过程在传统的厚膜电子技术中一直广为应用^[1], 但生产周期较长, 需要预先制作模板, 对于小批量电子元器件的生产而言, 成本相对较高。

本文报道了一种将传统的激光熔覆技术应用于电阻制作的新工艺^[2~4], 将制备电阻的浆料预置于基板表面, 然后采用高能激光束按照所设计的轨迹

收稿日期: 2003-06-30; 收到修改稿日期: 2004-06-03

基金项目: 国家 863 计划(2001AA421290)和国家自然科学基金(50075030)资助项目。

作者简介: 李慧玲(1972—), 女, 山西省人, 华中科技大学博士研究生, 主要从事激光微细熔覆直接制造厚膜混合微电路关键技术的基础研究。

* 通信联系人。E-mail: xyzeng@public.wh.hb.cn

直接照射基板,获得所需要的电阻。由于激光光斑的尺寸一般为 $10\ \mu\text{m}$ 到亚微米量级,因此也称为激光微细熔覆技术。

2 激光微细熔覆直写电阻工艺与设备

采用了波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 连续激光器,最大输出功率 $50\ \text{W}$ 。自行配制了用于激光微细熔覆直写的钎系电阻浆料。所用基板为普通钠钙玻璃,

厚度 $1\ \text{mm}$ 。先将浆料调到合适的粘度。选择不同的激光功率、扫描速度、搭接量、后续处理条件,主要工艺参数如表 1 所示。

激光微细熔覆直写电阻的工艺流程如图 1 所示。激光作用后,浆料的有机粘结相和低熔点玻璃相发生了复杂的化学反应,将电阻膜层和基板“焊接”在一起,而没有扫描处仍然保持原来的特性。随后采用适当清洗剂清洗,将未经激光辐照区域的物质清洗掉,从而形成了具有一定形状的电导图形。

表 1 激光微细熔覆直写电阻参数

Table 1 Resistor parameters of direct fabrication by laser micro-fine cladding

Sample (-changed parameter)	1	2	3	4
Laser power /W	—	3	3	3
Laser scanning velocity / (mm/s)	3	—	3	3
Overlap space /mm	0.015	0.02	—	0.015
Heat treated temperature / $^{\circ}\text{C}$	600	600	600	—

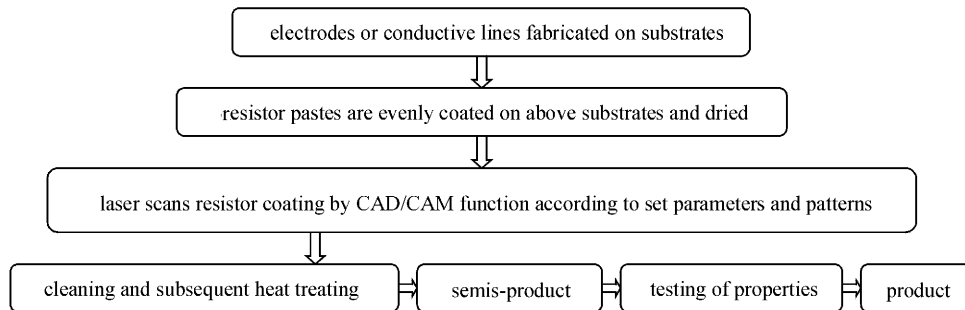


图 1 激光微细熔覆直写电阻工艺流程图

Fig. 1 Technological flow sheet of resistors directly fabricated by laser micro-fine cladding

3 电阻阻值的测定方法

对于成品的电路板或电子元器件来说,电阻的阻值为一既定的值,因此电阻阻值的大小直接决定电路或电子设备以及元件的稳定性或可靠性。而选择什么样的测定电阻阻值的方法直接影响电阻阻值的准确性,特别对于一步法直接制备成型电阻的激光微细熔覆直写技术尤其关键。为了消除测量误差和面积对电阻的影响,经过大量实验证明,采用如图 2 所示的方法可以得到准确的电阻阻值。即方阻 $R_s = \Sigma R_{ij} / E_{ij}$, 其中 i, j 分别取电极 A, B, C, D 的中心间距且 $i \neq j$, 而 E 为 i, j 间的距离,电阻带宽为 $1\ \text{mm}$ 。本文将该电阻测定方法定名为矩阵求和平均法。

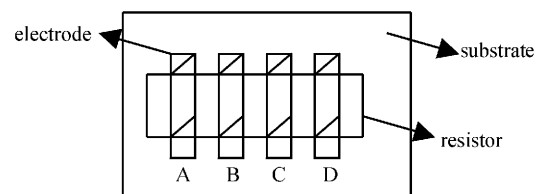


图 2 电阻阻值的测量原理

Fig. 2 Measuring principle of resistance value

4 主要实验结果

4.1 激光功率对电阻阻值的影响

图 3 所示为表 1 试样 1 所用参数下激光功率和电阻阻值的关系。随着激光功率的增加,电阻阻值降低。图 4 为不同功率下显微组织图。可以看出,随着激光功率的增加,激光处理后组织的致密性增

加,经过后续处理后带状组织增加,膜层再次发生致密化,但当功率增加到一定值时,膜层出现了微裂纹(如 4(c))。

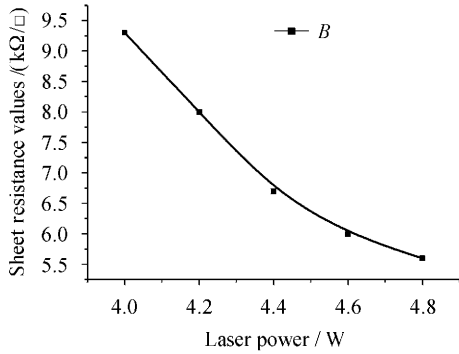


图 3 激光加工功率对电阻阻值的影响

Fig. 3 Effect of laser power on sheet resistance values

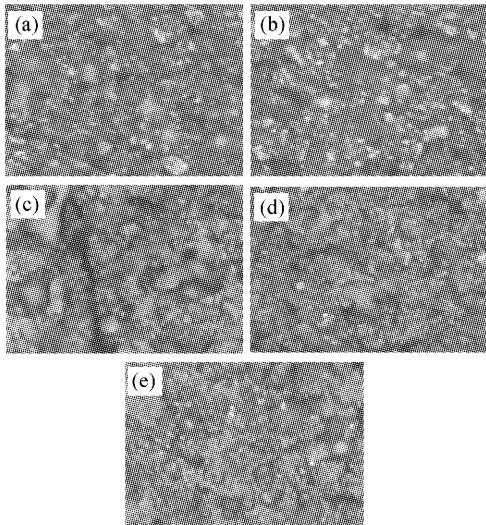


图 4 不同激光加工功率下获得的电阻涂层的显微组织(500×)

激光扫描后未经过热处理:功率(a) 4.0 W,(b) 4.8 W,(c) 5.0 W;激光扫描后经过热处理:功率(d) 4.0 W,(e) 4.8 W

Fig. 4 Microscopic structure of resistor coat obtained under different laser power (500×)

no heat treating after laser scan: power (a) 4.0 W, (b) 4.8 W, (c) 5.0 W; heat trating after laser scan: power (d) 4.0 W, (e) 4.8 W

4.2 激光扫描速度对电阻阻值的影响

图 5 所示为表 1 试样 2 所用参数下电阻阻值随扫描速度的变化规律。随着扫描速度的增加,电阻阻值在开始时急剧降低,当扫描速度超过 5 mm/s 时,电阻阻值不再改变。图 6 为不同扫描速度下的显微组织图,随着扫描速度的增加,激光处理后组织的致密性提高,经过后续处理后,带状组织致密程度和激光直接处理后的变化趋势相同。

4.3 扫描线间的搭接量对电阻阻值的影响

图 7 为表 1 试样 3 所用参数下电阻阻值随搭接

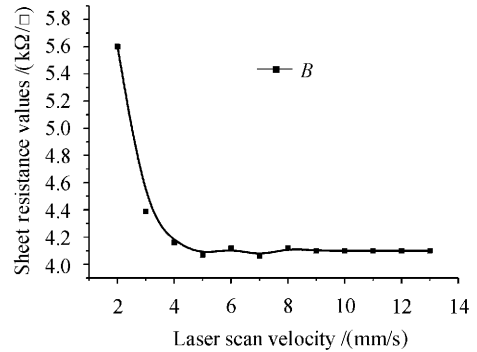


图 5 激光扫描速度对电阻阻值的影响

ig. 5 Effect of laser scan velocity on sheet resistance values

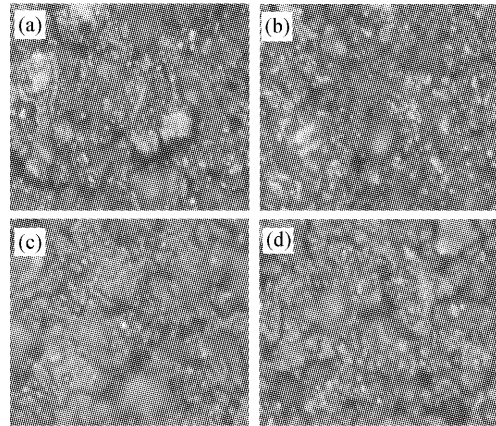


图 6 不同扫描速度下获得的涂层显微组织(500×)

激光扫描后未经过热处理:扫描速度(a) 2 mm/s,(b) 13 mm/s;激光扫描后经过热处理:扫描速度(c) 2 mm/s,(d) 13 mm/s

Fig. 6 Microscopic structure of resistor coat obtained under different laser scan velocity (500×)

no heat treating after laser scan: scan velocity (a) 2 mm/s, (b) 13 mm/s; heat trating after laser scan: scan velocity (c) 2 mm/s, (d) 13 mm/s

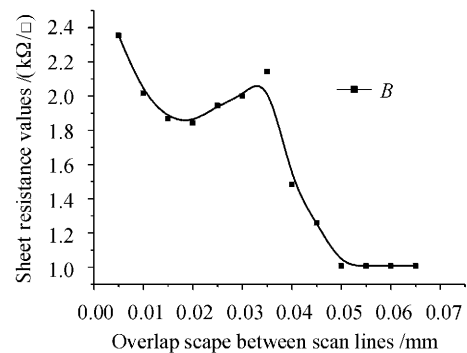


图 7 扫描线间的搭接量对电阻阻值的影响

Fig. 7 Effect of overlap space between scan lines on sheet resistance values

量的变化规律。随着两搭接线中心距离的增加,电阻阻值呈现驼峰状变化趋势。图 8 为不同搭接量下制备电阻的显微组织图,从图中可以看出,随着搭接量的增加,带状组织致密性也呈现如图 7 所示结果。

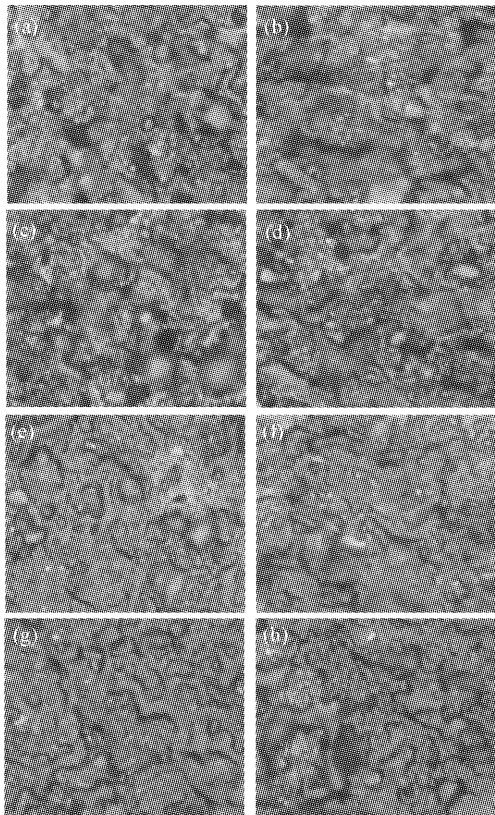


图 8 不同搭接量下获得的电阻涂层的显微组织(500×)

激光扫描后未经过热处理:搭接量(a) 0.01 mm,(b) 0.02 mm,(c) 0.03 mm,(d) 0.05 mm;激光扫描后经过热处理:搭接量(e) 0.01 mm,(f) 0.02 mm,(g) 0.03 mm,(h) 0.05 mm

Fig. 8 Microscopic structure of resistor coat obtained under different overlap scope between scan line (500×) no heat treating after laser scan: overlap scope (a) 0.01 mm, (b) 0.02 mm, (c) 0.03 mm, (d) 0.05 mm; heat trating after laser scan: overlap scope (e) 0.01 mm, (f) 0.02 mm, (g) 0.03 mm, (h) 0.05 mm

4.4 热处理温度对电阻阻值的影响

图 9 为表 1 试样 4 所用参数下电阻阻值随后热处理温度的变化规律。随着热处理温度的升高,电阻阻值变化趋势为先急剧降低,后趋于缓慢下降,最后将保持在某一稳定的值。图 10 为热处理温度变化制备的电阻显微组织图。当电阻膜经过激光扫描后,带状组织含量较少,且图貌不清晰;当经过低温处理时,随着温度的升高,带状组织大量增加,表面形貌清晰度提高;当经过较高温度处理时,带状组

织彼此紧密连接成网状结构,均匀性提高,表面平整度和清晰度再次增高。

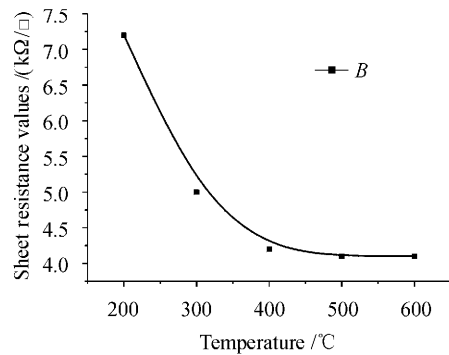


图 9 热处理温度对电阻阻值的影响

Fig. 9 Effect of heat treated temperature on sheet resistance values

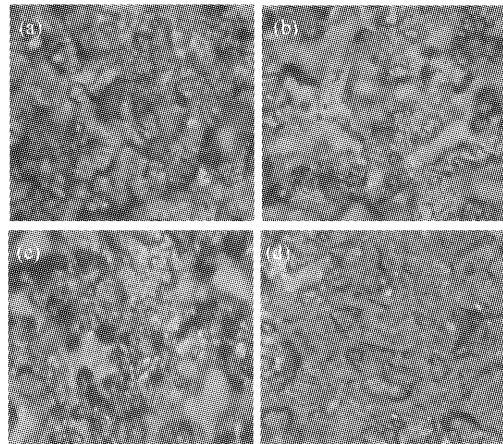


图 10 不同热处理温度下获得的电阻涂层的显微组织(500×)

激光扫描后未经过热处理:(a); 激光扫描后经过热处理:(b) 200°C,(c) 500°C,(d) 600°C

Fig. 10 Microscopic structure of resistor coat obtained under different heat treated temperature (500×) no heat treating after laser scan: (a); heat trating after laser scan: (b) 200°C, (c) 500°C, (d) 600°C

5 分析与讨论

由于 $R = \rho \cdot L/S$ (R 为电阻, ρ 为电阻率, L 为扫描长度, S 为横截面积), $S = W \cdot t$ (t 为最终电阻膜的厚度),当 $L = W$ 时,方阻 $R_s = \rho_s$ ($\rho_s = \rho/t$),它和面积无关,仅仅和电阻率、膜厚有关。一般来说,此处的 ρ 对于确定的材料而言为一常数,它仅仅由材料本身决定,但对于制备电阻的浆料来说,是由一定的有机物质和固体相组成的,在制备中将发生烘干过程、激光处理过程和后续热处理过程,这将引起材料

的组织、结构、性能等发生很大的变化。因而，材料的电阻率和膜的厚度在加工过程中发生了改变。

5.1 烘干过程

当湿膜烘干后，大量的低熔点有机溶剂挥发，膜发生收缩严重，膜的致密性提高，电阻率降低，厚度减薄。但此时由于电阻率改变控制整个电阻阻值的大小，因此方阻降低。

5.2 激光处理过程

当烘干膜经过激光扫描后，残余的少量低熔点有机溶剂以及高熔点有机溶剂受热挥发，而有机粘结剂发生了固化反应，形成具有一定附着性能的有机高聚物将固体物质粘结在基板上，部分固体氧化物和周围的物质发生反应形成新的物质。因此，膜层物质受到一定的挤压力收缩，组织发生了致密化，电阻率减小，而膜的厚度减薄程度较小，所以方阻再次降低。

1) 激光加工功率：随着激光加工功率的增加，激光作用过程中膜发生上述物理化学反应过程更加彻底，膜收缩程度进一步提高，致密性增加，杂质含量降低，电阻率减低，方阻减少；

2) 扫描速度：当扫描速度增加时，激光作用在膜上的时间缩短，激光对物质间物理反应的影响较小，影响导电相紧密程度的因素减少，因此，方阻降低；当激光扫描速度小于 9 mm/s 时，方阻同时受激光和膜的相互作用以及热处理所控制，但最终决定阻值的变化趋势则主要取决于激光作用时间的长短，因此，基板和膜进行成分扩散对电阻阻值的影响超过有机物固化和热处理作用的结果，时间越短，这种作用越明显，成分扩散越充分，导电带紧密性越低，膜的致密性越差，电阻率提高，阻值越大；当激光扫描速度达到 9 mm/s 时，激光对膜和基板间相互作用的影响几乎趋于零，因此电阻率不变，阻值仅仅受热处理的影响，所以，即使再增加扫描速度，方阻保持不变；

3) 搭接量：当两搭接线中心距离低于 0.02 mm 时，由于重复烧结面积跨越了前一条扫描线中心处，使得两搭接线中心距离减小，作用在单位面积上的平均能量增加，搭接处再烧次数增加，激光对膜和基板的作用时间增加，此时整个反应主要由基板和膜扩散所控制。因此，基板和膜间的扩散性提高，杂质相增加，导电相紧密性降低，方阻增加；当两搭接线中心距离在 0.02~0.035 mm 时，由于两搭接线中心距离处于光斑半径范围，整个反应主要由部分玻璃相和其他氧化物的物理化学反应所控制，单位面

积的导电带减少，在热处理时剩余玻璃相粘流作用降低，有机物挥发留下的孔洞没有全部填充，因此电阻率增加，阻值提高；当两搭接线中心距离高于 0.035 mm 时，由于两搭接线中心距离大于光斑半径，激光对搭接处的再烧性随着两搭接线中心距离增加而减弱，此时整个反应主要由热处理决定，而两搭接线中心距离越大，这种影响越大，热处理后导电带均匀和紧密性提高，方阻降低。当两搭接线中心距离达到 0.055 mm 时，由于两搭接线中心距离超过光斑直径，两线成为虚搭或没有搭接，激光和膜的相互作用对方阻的影响仅仅表现为一条线对电阻的影响，而由于其他参数不变，因此阻值仅仅为一条单独的微带电阻的叠加，和搭接量无关，所以阻值保持不变。

5.3 后续热处理过程

激光扫描后的电阻锥形，仅仅通过有机高聚物的固化反应连接，附着性差，因此需要进行后续处理。在处理过程中，随着后处理时间和温度的延长，有机高聚物挥发燃烧，而固体粘结相发生了融化，液态玻璃在毛细管力的作用下沿着功能相的边缘发生了粘流、填充、渗透、浸润和下沉等物理反应，功能相在液态粘结物质中发生了重排和氧化反应，形成了彼此相连的导电带。因此，经过后续处理后膜的致密性进一步提高，电阻率降低，但膜的厚度几乎保持不变，方阻降低。

实验中出现图 9 和图 10 的结果是由于当热处理温度低时，上述物理化学反应不完全，玻璃相和其他氧化物以及有机物含量高，单位体积内导带量降低，电阻率提高，阻值增大。但随着热处理温度的提高，上述作用完全，组织发生了致密化，成分分布逐渐均匀化，导带数量增加，致密性提高，电阻大大降低，当热处理温度达到 500℃ 时，再增加热处理温度，由于反应已经完成，不再形成新的物质，电阻率和组织致密性不再改变，因此，电阻阻值不变；当温度超过 650℃ 时，基板软化变形，电阻被玻璃包覆，图形变形并浸透到基板中。

6 结 论

采用了新颖的激光微细熔覆直写技术通过改变主要的工艺参数在玻璃基板上进行了厚膜电阻的制备，与传统的厚膜电路工艺相比，激光微细熔覆方法通过激光头的灵活切换，不需要预先制造掩模，只要根据电阻的形状、尺寸设计图，利用数控工作台的

CAD/CAM 功能,就可在基板表面一步完成电阻的制备和微调^[5~7],具有广阔的工业应用前景。

参 考 文 献

- 1 Li Yaoling. Thick Film Electronic Component [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1991
李耀霖. 厚膜电子元件[M]. 广州:华南理工大学出版社,1991
- 2 Liu Jingwei, Zeng Xiaoyan. Status and prospect of laser direct writing [J]. *Laser Journal*, 2001, **22**(6):15~18
刘敬伟,曾晓雁. 激光直写布线技术的现状和展望[J]. 激光杂志, 2001, **22**(6):15~18
- 3 R. Modi, H. D. Wu, R. C. Y. Auyeung. Direct writing of polymer thick film resistors using a novel laser transfer [J]. *Journal of Materials Research*, 2001, **16**(11):3214~3222
- 4 Douglas B. Chrisey. The power of direct writing [J]. *Science*, 2000, **289**(5481):879~881
- 5 He Zhongwei, Zhou Donglian. Thick-film direct writing processing [J]. *Electronic Components and Materials*, 1999, **18**(5):3~6
何中伟,周冬莲. 厚膜直接描绘工艺[J]. 电子元件与材料, 1999, **18**(5):3~6
- 6 Qi Xiaojing, Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan *et al.*. A new technology of conductive line preparation by laser micro-cladding metal-organic pastes of PCB board [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):883~887
祁小敬,李祥友,曾晓雁等. 一种激光微细熔覆直写布线的新技术[J]. 中国激光, 2004, **31**(7):883~887
- 7 Huiling Li, Xiaoyan Zeng, Huifen Li *et al.*. Research on film thickness of conductive line formed by laser micro-fine cladding and flexibly direct writing technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(11):654~657