

文章编号: 0258-7025(2004)07-0883-05

一种激光微细熔覆直写布线的新技术

祁小敬, 刘敬伟, 李祥友, 曾晓雁*

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要 激光直写技术因其不需要掩模就可以在绝缘基板表面直接制备各种高精度、复杂形状的导电层而受到广泛重视。但是, 布线速度过低和工艺复杂一直是阻碍该技术工业化应用的瓶颈。提出了一种以导电金属粒子、有机成膜物质构成的复合导电浆料为熔覆物质, 以有机环氧板为绝缘基板, 采用 CO₂ 激光加热直接制备线路板的新工艺、新方法。所布导线宽度为 350 μm, 布线速率为 2~20 mm/s, 所用的激光功率为 0~20 W, 光斑直径约为 100 μm。系统研究了激光直写导电层的组织结构特征、导线与基板的结合强度以及导线导电率的变化特征。结果表明, 激光微细熔覆直写布线层与基材结合牢固, 所布导线的电阻率与导电银颗粒的体积分数及激光功率的大小有关, 工艺参数与材料配比合适时, 导线电阻率可以达到 10⁻⁶ Ωcm 的数量级, 能够满足工业应用的要求。最后, 对普通环氧树脂板下激光微细熔覆金属导电浆料直写导线时导线的形成机理和导电机理进行了分析。

关键词 激光技术; 激光直写; 微细熔覆; 导电浆料; 导线

中图分类号 TN 249; TG 156.99 **文献标识码** A

A New Technology of Conductive Line Preparation by Laser Micro-Cladding Metal-Organic Pastes on PCB Board

QI Xiao-jing, LIU Jing-wei, LI Xiang-you, ZENG Xiao-yan

(State Key Laboratory of Laser Technology, National Engineering Research Center for Laser Processing,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Laser direct writing technique has attracted much attention in the past years, as it can fabricate the conductive lines on insulator board directly without mask and with high precisions. However, the direct writing speeds are very low for the current techniques, which restrict its industrial applications greatly. In this paper, a new technology named laser micro-cladding technique is introduced, in which the metal-organic conductive pastes are used as the cladding materials, and the organic insulator resin boards are used as the substrate. The CO₂ laser with the power of 0~20 W and the beam spot of 100 micron are used. The microstructure and the conductive properties as well as the bonding strength of the conductive lines with the substrate are studied. The results demonstrate that the conductive lines have excellent conductive properties and strong bonding strength with the substrate, which can satisfy the demands for industrial applications. Finally the mechanisms of the conductive line formation and conductivity are also analyzed.

Key words laser technique; laser direct writing; micro-cladding; conductive pastes; conductive lines

1 引 言

随着电子电器产品向超大规模集成化、数字化、

轻量化和小批量、多样化方向发展, 传统的印制电路板制作工艺方法包括光化学法和模板(或丝网)漏印法在小批量、高精度的场合, 已经越来越不能满足生

收稿日期: 2003-03-11; 收到修改稿日期: 2003-04-30

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: 祁小敬(1976—), 男, 华中科技大学激光科学与工程研究院硕士研究生, 主要从事激光柔性布线技术工艺与系统研究。E-mail: qxj321@163.com

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

产要求^[1,2]。

为解决这一难题,国内外研究人员一直不断努力开发各种柔性的直写布线技术。近年来人们利用激光能量密度高,光斑直径、方向和位置容易精确控制等特点提出了各种激光直写技术,按照制造过程与工艺原理的不同分为激光化学气相沉积(Laser Chemical Vapor Deposition, LCVD),激光诱导化学镀法(Laser Induced Electro-less Plating, LIEP),激光诱导固相沉积(Laser Induced Solid Deposition, LISD)等多种,并已成功制备出导电性能良好的 Al, Cu, Au 等导线^[3~14]。其中,LISD 法直接采用激光诱导固体膜发生作用,反应生成金属或合金沉积在基板上,形成导线。此法可以在无掩膜条件下较快速度地沉积线宽很窄的导线,对环境损害极小,并且同时具有工艺、设备简单,便于控制等优点。但其布线速度偏低,后续烧结温度高制约了它的广泛应用^[8~14]。另一方面,现有研究大多将注意力放在导电路径的修复方面,所以以新电路板激光柔性布线和修复为主要目标的研究工作要进入实用化阶段,尚需寻找新的突破口。

本文在总结以往同类研究的基础上,借助激光熔覆快速原型技术和激光熔覆金属陶瓷技术的思想,提出了激光微细熔覆直写布线技术的新思路。

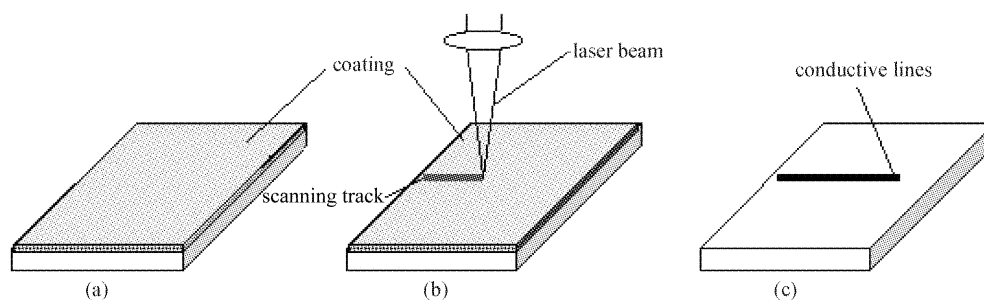


图 1 布线原理示意图

Fig. 1 Sketch map of laser direct writing

3 结果与分析

3.1 激光熔覆导电浆料直接布线时导线的形貌及性能分析

图 2 是激光直写布线后 PCB 板表面形成导线的宏观形貌。由图 2(a)可以看出,激光微细熔覆技术所布导线表面光滑平整,边缘整齐。从图 2(a)的局部放大形貌照片图 2(b)中可以看出,激光微细熔覆导线层中银粉颗粒分布均匀、致密。

采用剥离法测定激光熔覆导线与基板表面的结

2 材料与方方法

激光直写制备导线所用的导电浆料为自制的有机导电银浆。它采用片状银粉(平均粒径 $4\sim 10\ \mu\text{m}$)为主要导电相,固化型酚醛树脂为主要粘结相,松油醇为溶剂,以及其他少量添加剂,其中金属导电相的体积在 $50\%\sim 90\%$ 之间。实验时,首先通过旋转甩胶的方法将金属有机浆料均匀地预置在有机层压板上,如图 1(a)所示,干燥后用一定的激光工艺参数沿所需要的轨迹扫描预置涂层,如图 1(b)所示,使照射区域的树脂固化。此后,用酒精等有机溶剂清洗基板表面,激光照射区域因为被固化而对有机溶剂无反应,未照射区域将被清洗掉,留下所需要的导电图形,如图 1(c)所示。

实验中,采用 50 W 连续 CO_2 激光器,波长 $10.6\ \mu\text{m}$,通过焦距为 45 mm 的凸透镜聚焦于环氧树脂板的上表面。光斑直径固定为 $100\ \mu\text{m}$,飞行导光系统可沿 xy 平面运动,精度在 $20\ \mu\text{m}$ 以内,扫描速度为 $2\sim 20\ \text{mm/s}$ 。布线完成后,采用上述标准工艺清洗基板,获得所需要的导线。采用光学显微镜和 Nikon Epiphot 300 倒置式电子显微镜分析导线的宏观形貌,采用四点探针法测试所布导线的电阻率。采用常用的张力剥离法测定所布导线与基板的结合力。

合力,结果表明,导线撕裂点不是断在与基板的结合面上,而是导线的内部。这说明导线与基板的附着力良好。采用上述方法测试同样尺寸下敷铜板中铜层与基板的结合强度,结果表明两者附着强度相当。

采用四点探针测试激光直写导线的电阻,再根据导线长度和横截面积的大小,计算出导线的电阻率,所得到的结果见表 1 所示。由表 1 可见,激光熔覆布置的导线电阻率与敷铜板相比,处于同一数量级,达到了电路板对导线电阻率的技术指标要求 ($10^{-4}\ \Omega\text{cm}$ 以下)。

表 1 激光直写布线导电率和纯铜、敷铜板电阻率的比较

Table 1 Comparison of resistivity among pure copper, copper clad panel (CCP) and conductive lines by laser direct cladding

The resistivity of pure copper		$1.75 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$			
The resistivity of copper clad panel (CCP)		$1.80 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$			
The resistivity of conductive lines by laser direct cladding	Laser power (scanning speed: 2 mm/s)	4 W	6 W	8 W	10 W
		$8.5 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$	$4.5 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$	$3.6 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$	$3.2 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$

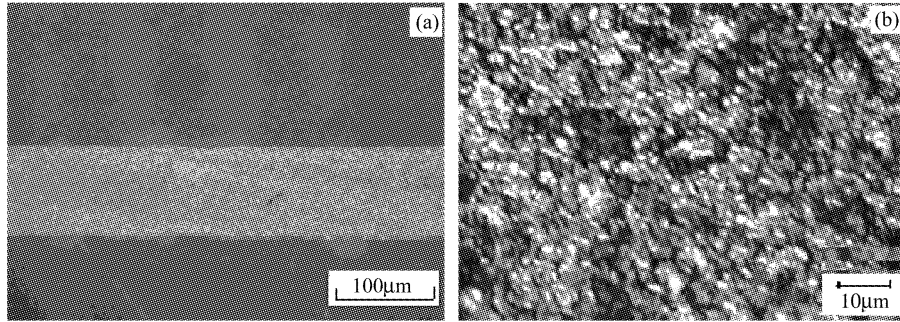


图 2 PCB 表面激光熔覆导电浆料直接布线的形貌

(a) 激光直写的导线外观形貌；(b) 图(a)的高倍放大形貌

Fig. 2 Morphologies of conductive lines on PCB board by laser direct micro-cladding conductive paste

(a) appearance of the conductive lines by laser direct micro-cladding;

(b) high magnification of (a)

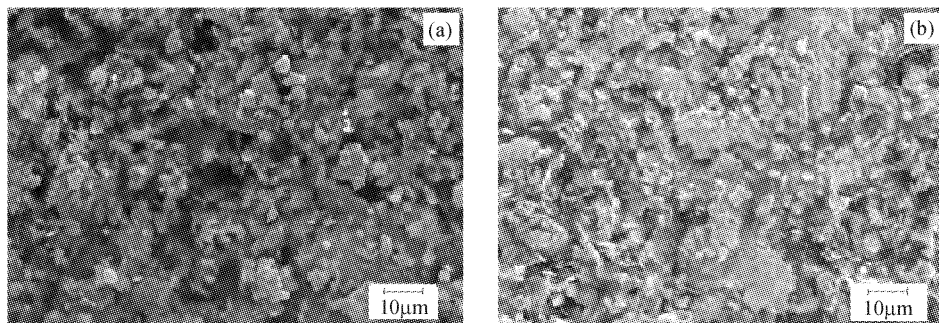


图 3 激光处理前(a)后(b)导电浆料层扫描电镜图片

Fig. 3 SEM images of the conductive lines before (a) and after (b) laser irradiating

3.2 激光熔覆直写导线的导电机理与附着机理分析

图 3 是用 JEOL JSM-35C 型扫描电子显微镜在激光布线前后获得的微观形貌图。从图 3 可以看出,导电银浆在激光扫描之前微粒之间是分立存在的,微观表面上存在有很多凹凸不平的团聚状颗粒群,导电的银粉颗粒彼此之间接触面积较小。在银粉与银粉之间充满了有机粘结相,几乎所有的银粉都处在酚醛树脂微粒的包围之中。采用四点探针法测试旋涂后的金属有机浆料薄膜的导电性,结果表明,未经激光处理或是高温热作用过的预置层电阻很大,比激光处理后的导电层电阻高出 1~2 个数量级。当激光扫描处理过后,被激光扫描过的表面膜

层平整度和致密度都大幅度提高,薄膜电阻降至表 1 所述范围。从图 3(b)的表面形貌来看,银膜导电的机理是具有一定粘合力的有机树脂粘结剂将大量松散的导电银颗粒拉附在一起。这是由于酚醛树脂属于热固性树脂,一般在 $130 \sim 180^\circ\text{C}$ 就发生交联反应形成三维高聚物。酚醛树脂受热逐渐形成网状立体结构,使得树脂相的体积不断缩小,促使金属颗粒之间充分接触,形成导电通路。

上述机理可以进一步借助图 4 来说明。在图 4 的示意模型中,图 4(a)是没有经过激光处理的预置层,图 4(b)则是经过激光扫描后的涂层,即导线。激光处理前,各银粉颗粒彼此接触并不紧密,银粉颗粒被绝缘树脂所包围,因而电阻率很高。激光处理

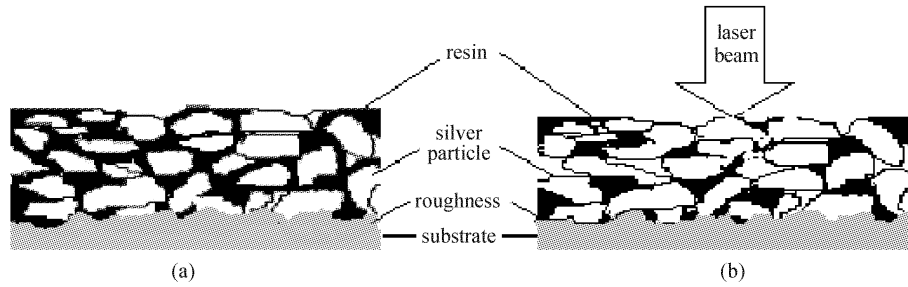


图 4 激光微细熔覆金属有机浆料直写布线物理模型

(a) 未经激光处理的预置层; (b) 经激光扫描后的涂层

Fig. 4 Physical model of conductive lines by laser direct micro-cladding conductive paste, before (a) and after (b) laser irradiation

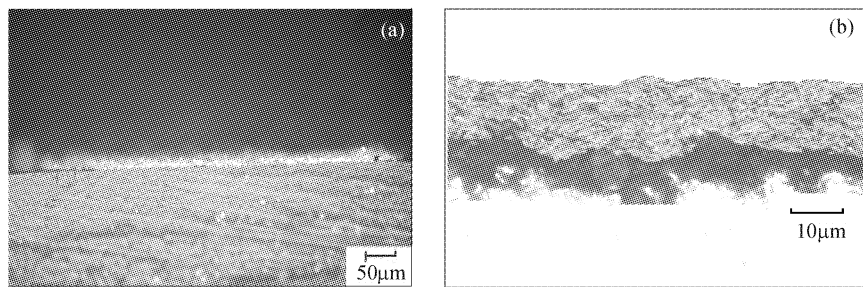


图 5 激光直写导线横截面形貌

(a) 低倍形貌; (b) (a) 的高倍形貌

Fig. 5 Cross-section images of the conductive lines by laser direct writing

(a) low magnification image; (b) high magnification image of (a)

后,树脂明显收缩,使得银粉颗粒彼此接触,形成一个三维空间的导电网络。

图 4 同时还揭示了激光熔覆直写导线与基板的结合与附着机理。前面提到,具有一定粘合力的有机树脂粘剂将大量松散的银粉颗粒拉附在一起。这正是固化的酚醛树脂三维高聚物,它形成了一种三维的空间网状连接,这种固化的网状连接体将银粉颗粒牢牢地固定在 PCB 基板上,使导线中各个导电颗粒之间有很强的结合力。图 5 给出了激光所布导线的横截面光学显微镜形貌。由图 5(b)可以看出,由于 PCB 环氧板表面存在一定的粗糙度(在高倍显微镜观察下呈锯齿状),使得银粉颗粒、树脂微粒与基底表面相互咬合、镶嵌在一起;加上酚醛树脂与环氧树脂基板有极大的亲和力,能够牢牢地粘结合在一起。正是这两种机理所产生的粘接力使得导线与基板很好地结合在一起。实验测得导线的附着力在 6.5 MPa 左右,能够满足电子工程中对导线与基材结合强度的要求。

事实上,图 4 给出的激光微细熔覆金属有机浆料直写布线物理模型与我们早期发表的激光熔覆金属陶瓷复合层的物理模型非常类似,都是采用激光

束照射,利用预置复合涂层中颗粒功能相与粘接相物理、化学性能的差别,使其中的粘接相发生熔化或者相变,而保持颗粒功能相的物理、化学性质基本不变^[15,16]。所不同的是,在本实验条件下,所采用的基板、熔覆材料、激光器等参数全然不同。特别是激光熔覆层的宽度只有百微米量级,厚度只有十微米量级。这就是称所采用的工艺方法为激光微细熔覆技术的理由。

3.3 激光熔覆直写实例演示

图 6 所示为采用本实验方法制备的一个电路板样品实例。实际布线时,所采用的布线速度为 4 mm/s。所制备的导线宽度为 350 μm。制备这样一块电路板约需 20 min 左右。实验结果表明,采用本实验方案,调整工艺参数,最高布线速度可以达到 50mm/s,远远大于前面所提到的激光诱导化学气相沉积方法、激光诱导液相沉积方法和激光诱导固体膜反应法的报道结果。

4 结 论

事实上,上述方法不仅可以在 PCB 板上制备金



图 6 激光熔覆直写布线技术所制备的金属导线图形
Fig. 6 Pattern of the conductive lines by laser direct cladding

属导线,还可以在陶瓷基板、玻璃基板表面制备金属导线,甚至能将电阻、电容等元件集成制作到同一线路板上,使得激光直写的优势得到最大的发挥。该技术可望在电子线路板,微电子电路的布线、修复,元器件的制作,三维结构和微机电系统的制备等方面有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 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与展望[J]. *激光杂志*, 2001, **22**(6):15~18
- Liu Jingwei. Parameters and mechanisms of laser direct writing conductive lines on PCB by organic paste [D]. *Ph. M. Dissertation HUST*, 2002. 1~12
刘敬伟. 基于有机导电浆料的激光直写技术与技术工艺和机理研究[D]. 华中科技大学硕士学位论文, 2002. 1~12
- S. Boughaba, G. Auvert. Laser direct writing of micron-size silicon lines from trisilane [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(11):6791~6796
- M. Meunier, R. Izquierdo, P. Desjardins *et al.*. Laser direct writing of tungsten from WF₆. [J]. *Thin Solid Films*, 1992, **218**:137~143
- Yuici Sato, Masahiko Yoshida. Laser enhanced palladium electroless plating [J]. *Transation of Institute of Metal Fishing*, 1997, **75**(1):4~10
- S. M. Piomenov, G. A. Shafeev, V. A. Laptev *et al.*. Laser activation of diamond surface for electroless metal plating [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(15):1935~1937
- Maeda Shigo, Minami Kazuyuki, *et al.*. KrF excimer laser induce selective non-planar metalization [J]. *Proceeding of the IEEE Microelectronic Mechanical Systems*, 1994, (2):75~80
- Suh Nam P.. Method for forming electrically conductive paths [P]. U. S. Patent, No. 4159414, 1979
- Soszek, Peter. Method for manufacturing a circuit board [P]. U. S. Patent, No. 4710254, 1987
- A. Kestenbaum, Ami, Serafino *et al.*. Electrical conductor deposition method [P]. U. S. Patent, No. 5064685, 1991
- Castro, Anthony J., Van Duyne *et al.*. Laser direct writing [P]. U. S. Patent, No. 5378508, 1995
- Weigel, David C., Morgan *et al.*. Laser direct process for making a conductive metal circuit [P]. U. S. Patent, No. 5576074, 1996
- S. Maruyama, M. Hongo, H. Sakamoto *et al.*. Method of modifying conductive lines of an electronic circuit board and its apparatus [P]. U. S. Patent, No. 5832595, 1998
- Sharma, Sunity, Annavajjula *et al.*. Deposition of substance on a surface [P]. U. S. Patent, No. 59800998, 1999
- Xiaoyan Zeng, Zengyi Tao, Beidi Zhu *et al.*. Investigation of laser cladding ceramic-metal composite coatings; processing modes and mechanisms [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1996, **79**:209~217
- Xiaoyan Zeng, Zengyi Tao, Beidi Zhu *et al.*. Analysis of energy conditions for laser cladding ceramic-metal composite coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1996, **79**:162~169