

文章编号: 0258-7025(2005)07-1001-05

激光微细熔覆柔性直写厚膜导带 组织性能的研究

李慧玲¹, 曾晓雁^{1*}, 李祥友¹, 李惠芬², 戴智刚¹

(¹华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; ²香港理工大学工业及系统工程学系, 香港)

摘要 随着表面组装以及电子元器件的微型化和密集化程度增加, 对内部互连导线微细化以及高质量高性能程度的要求日渐严格, 而传统技术越来越不能满足这种快速发展的需求。采用激光微细熔覆柔性直写技术, 在玻璃基板上直接制备高质量高性能的微细导带。通过控制各工艺参数的变化所引起组织形貌的变化判定形成导带的性能的好坏和质量的优劣, 优化了工艺参数, 并采用该参数进行实际图形的制备。结果表明, 所制备的导带导电性好、结合强度高、焊接性好、表面平整度高, 适合于产品的智能化批量生产和精微细图形的制作与修复。

关键词 激光技术; 厚膜电路; 导带; 激光微细熔覆; 柔性直写; 玻璃基板

中图分类号 TN452 文献标识码 A

Research on Structure Property of Thick-Film Conductive Lines Fabricated by Laser Micro-Fine Cladding and Flexibly Direct Writing

LI Hui-ling¹, ZENG Xiao-yan¹, LI Xiang-you¹, LI Hui-fen², DAI Zhi-gang¹

(¹ State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Sciences and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)
² Department of Industrial and Systems Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

Abstract Nowadays, the electronic components are developing towards to high density compaction and miniaturization, which needs higher line densities and narrower line widths for interior interconnected conductive lines. However, the conventional technologies can not meet the rapidly growing need for their inherent limits. In this paper, based on the technique of laser micro-fine cladding and flexibly direct writing, micro-fine conductive lines of high quality and high property are fabricated on glass substrates. The properties and quality of conductive lines are adjusted by structure change with different processing parameters, so as to optimize parameters and make use of these parameters to fabricate the case patterns. The results showed that the conductive and welding properties of the conductive lines are high as well as bond strength and surface finish quality, therefore they are fit for fabrication and repair of products' intellectual large-lot production and fine or micro-fine patterns.

Key words laser technique; thick film circuit; conductive line; laser micro-fine cladding; flexibly direct writing; glass substrates

1 引 言

随着电子行业逐渐向高密度、高精度、高组装化等方向的发展, 传统的印刷电路板技术已经不能满足这种快速发展的需求, 因此出现了一些新兴技术: 激光诱导液相反应沉积、激光化学气相沉积、激光熔覆

布线技术等激光直写技术^[1,2], 但由于存在设备昂贵、控制条件苛刻、导线精度不足, 布线速度缓慢、对环境污染严重等缺陷, 上述技术应用受到了限制。而激光微细熔覆直写技术由于结合 CAD/CAM 功能, 在无掩模的基础上一步完成在各种绝缘基板上制备导电

收稿日期: 2004-05-25; 收到修改稿日期: 2004-10-15

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

作者简介: 李慧玲(1972—), 女, 山西人, 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。E-mail: scage_lhl@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: xyzeng@mail.hust.edu.cn

层,不仅制作工艺简单、精度高、灵活、速度快,而且可实现产品的智能化批量生产和精微细图形的制作与修复^[3~8]。

玻璃除了具有较低的导热系数外,其强度、绝缘电阻、介电常数和陶瓷相当,而成本仅为陶瓷基板的4%~5%^[9]。从成本角度考虑,在一些领域玻璃可取代陶瓷作为基板材料。但由于钠钙玻璃软化温度为650℃,存在着自身热膨胀系数较高,导热性差,易变形,特别是受热冷却后存在尺寸收缩效应等缺点,限制了玻璃在电子行业中的应用,但由于视听类电子产品的发展,玻璃作为基板材料的需求日益增长^[10]。本文采用目前发展的新兴技术——激光微细熔覆柔性布线技术在玻璃基板上制备导线,通过控制各工艺参数,可以得到最小线宽40 μm,最小线间距70 μm 高质量导线,同时研究了导线微观组织的变化,并采用优化的工艺参量进行实际图形的制备,结果表明,所制备的图形质量高,性能稳定可靠,再现性好。

2 实验材料及设备

采用自行设计的 LMSII 型激光布线机(光纤激光器的最大功率 50 W,最小光斑直径为 20 μm,模式为基模),将自制的导电银浆预涂在厚度为 1.1 mm,面积为 20 mm×20 mm 的普通钠钙玻璃基板上,通过调整工艺参数对其进行微细激光加工,将加工后的片子进行后续热处理,观察其微观组织形貌随各参数的变化,对优化参数下制备的实例图形进行了导电性、润湿性、结合强度、表面光洁度的分析。实验中所使用的设备为 Nikon 光学显微镜、高温炉、热分析系统、表面轮廓仪、扫描电镜等。其中,成膜和后续热处理工艺参数匀胶速度 5~10 kr/min,匀胶时间 60 s;烘干温度 100℃,烘干时间 5 min,离焦量 0 mm,后续热处理温度 600℃,后续热处理时间 10 min,冷却方式 600~500℃保温,500℃以下急冷。激光加工参数如表 1 所示。

表 1 激光微细熔覆柔性直写导带激光加工参数

Sample	1	2	3
Power /W	10	—	10
Scanning velocity /(mm/s)	3	3	—
Conductive paste:organic solvent :film forming matter	—	—	100:7:4

—: varied parameters

3 实验结果与分析

3.1 成分比例对厚膜导带组织的影响

图 1 采用了表 1 中试样 1 的参数,通过改变成分比例进行微细导带的制备。图 1 表明,随着溶剂的增加,所需要成膜物质降低,达到相同线宽所需激光加工功率降低,但组织分布稀疏,单位体积内气孔数增加,导电颗粒彼此相连接性减弱。当溶剂含量降低到 100:6:4(导电银浆料:有机溶剂:成膜物质)时,导电颗粒分布不均匀,出现团聚,因此组织不均匀性将随着溶剂含量的逐渐降低而增加。当溶剂处于高含量时,即使在低匀胶速度下,得到导带膜的组织也很稀疏。造成上述结果的原因是,当导电银浆料含量高时,固体含量增加,有机成膜物质少,固体易于团聚,在激光处理时膜层内部收缩不一致,因此组织致密性和均匀性差。当导电银浆料含量降低时,有机成膜物质相对增加,固体颗粒均匀分散在膜内,激光扫描时,膜收缩一致,组织致密性和均匀性增加;对于导电银浆料含量低的浆料,由于有机溶剂含量增加,使得膜在激光扫描时,有机物质大量挥发,杂膜中留下了大量的孔洞,而且由于固体含量偏低导致了导电颗粒局部分离,组织致密性和均匀性极差。因此,为了得到优良的导带,成分比例应采用 100:7:4 配比的浆料进行导带的制备。

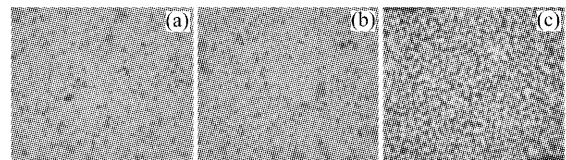


图 1 不同成分比例下导带的微观组织图(×500)

(a) 100:6:4, (b) 100:7:4, (c) 100:30:1

Fig.1 Microscopic structure of conductive line fabricated by different composition (×500). (a) Proportion of ingredient 100:6:4, (b) proportion of ingredient 100:7:4, (c) proportion of ingredient 100:30:1

3.2 激光加工参数对厚膜导带组织的影响

3.2.1 激光加工功率

采用表 1 中试样 2 的工艺参数进行微细导带的制备,其微观组织如图 2 所示,黑色为气孔。从图 2 可以看出,随着激光功率的增加,组织的致密性、均匀性、导电颗粒的均匀性以及含量先逐渐改善,后逐渐变差,气孔数量和尺寸先减少后增加。而且当成分一定时,随着匀胶速度的增加,也出现上述类似现象。但是,在相同加工条件下,随着匀胶速度的增加,膜的致密性、均匀性降低,气孔数量、尺寸增加,

因此导带的性能降低。造成上述结果的原因是,随着激光功率的增加,单位体积膜吸收的能量增加。有机物质收缩程度增强,因此膜组织致密性和均匀性增加,但当工艺增加到一定值时,由于单位体积内膜吸收的能量高出了有机物质承受的能量,有机物质大量挥发燃烧,因此在膜上留下了大量的孔洞,组织致密性和均匀性变差,再增加功率,由于超出了基板和膜承担的能量,基板和膜被烧穿或烧裂。而且随着匀胶速度的提高,膜的厚度减少,出现上述现象越明显,相同条件下,匀胶速度越高越易于产生缺陷。本研究在后续实验中采用激光加工功率 10 W,匀胶速度为 5 kr/min 进行其他参数的优化。

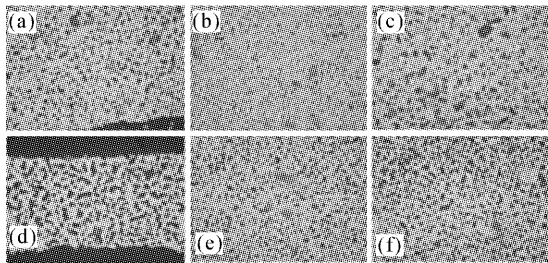


图 2 不同加工功率下导带的微观组织图($\times 500$)

(a),(b),(c)功率分别为 3 W, 10 W, 20 W, 匀胶速度 5 kr/min, (d),(e),(f)功率分别为 3 W, 10 W, 20 W, 匀胶速度 8 kr/min

Fig. 2 Microscopic structure of conductive line fabricated by different laser power ($\times 500$). Laser power of (a), (b), (c) is 3 W, 10 W, 20 W respectively; rotated speed of (a), (b), (c) is 5 kr/min, laser power of (d), (e), (f) is 3 W, 10 W, 20 W respectively, rotated speed of (d), (e), (f) is 8 kr/min

3.2.2 激光扫描速度

采用表 1 中试样 3 的工艺参数进行微细导线的制备,结果如图 3 所示。随着扫描速度的增加,组织的致密性、均匀性以及导电颗粒的均匀性也逐渐增加,单位体积内所含气孔数量,以及气孔和导电颗粒的尺寸逐渐减小。而且,当扫描速度增加到一定值

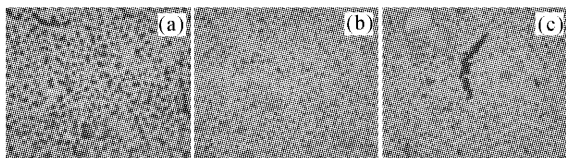


图 3 不同扫描速度下导带的微观组织图($\times 500$)

(a) 1 mm/s, (b) 3 mm/s, (c) 5 mm/s

Fig. 3 Microscopic structure of conductive line fabricated by different scan velocity ($\times 500$). Laser scanning velocity of (a), (b), (c) is 1 mm/s, 3 mm/s and 5 mm/s respectively

时,导带膜中出现了如图 3(c)中的波纹状孔洞。造成上述现象的原因是,随着扫描速度的增加,激光作用在膜上的时间减少,单位体积内吸收能量减少,瞬间有机物质挥发燃烧量减少,膜中气孔量降低,组织均匀性和致密性增加。但当扫描速度增加到一定值时,由于加工台精度不满足实际要求,产生了振动,激光作用在膜上呈现不连续,因此,膜收缩不一致,产生了应力集中,在随后冷却时,产生了裂纹。为了获得高质量的导带,应采用最佳的扫描速度 3 mm/s。

3.3 实例图形的制备和性能的检测

3.3.1 实例图形的制备

当导带组织的致密性高、均匀性越好;导电颗粒的数量越高、粒度越小、气孔的含量越少、尺寸越小,导电性能越高;表面光洁度越高,膜和基板的结合强度越高,焊接性越好。因此,为了制备高质量,高稳定性和可靠性的导带,采用成分比例 100:7:4,匀胶速度 5 kr/min,激光加工功率 10 W,激光扫描速度 3 mm/s 的优化参数进行实例图形(如图 4)的制备。

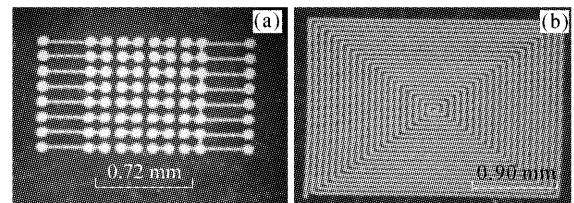


图 4 激光微细熔覆柔性直写实例图形

(a) 芯片焊盘,焊盘间距 120 μm ,焊盘直径 80 μm ;

(b) 图形导线,线宽 40 μm ,线间距 70 μm

Fig. 4 Case patterns fabricated by laser micro-fine cladding and flexibly direct writing. (a) Pad of chip; 120 μm space between pads, 80 μm pad diameter; (b) rectangular rotational conductive line; line width is 40 μm and space between lines is 70 μm

3.3.2 性能的检测

导电性是厚膜导体最重要的性能。除了特殊用途,均希望厚膜导体具有尽可能低的电阻率,这样可以减少寄生电阻,从而减少不必要的信号衰减和电能消耗。对于微细线条来说,由于膜厚度很小,厚度的精确测量有一定的难度。因此,一般都采用方阻来表示膜层电阻的大小。而由于 $R = \rho L / S$ (R 为电阻, ρ 为电阻率, L 为导带长度, S 为横截面积), $S = Wt$, t 为导带的厚度, W 为导带宽度;当 $l = W$ 时 (l 为单位长度带的宽度), $R_s = \rho_s$, $\rho_s = \rho / t$ 即 R_s 为方阻,它和面积无关,仅仅和电阻率、膜厚有关,而 $L = Nl$, 所以 $R = NR_s$ 。实验采用和图 4(b) 相同线宽的迷宫图形测定

方阻为 $4 \text{ m}\Omega/\text{sq}$ ，而通过表面轮廓仪测定的膜的厚度为 $6 \mu\text{m}$ 。因此，利用上述技术在陶瓷基板上制备的宽度为 $20 \mu\text{m}$ 导线的电阻率为 $0.24 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ，比目前采用其他厚膜技术得到的银导体的方阻 $5 \text{ m}\Omega/\text{sq}$ 小，导电性能提高，满足市场的要求。

浸润性能的优良不仅直接关系到焊接性能的高低，而且最终影响到电子元器件组装的高密化和高集成化。因此，采用了简易的回流焊设备，进行浸润性的检验。首先，在面积为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 焊盘上面涂敷一层 Sn62Pb36Ag2 焊膏，加热试样平台到 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ，将试样放在已经加热的平台上，在显微镜下对整个焊膏熔化过程进行摄像。如图 5 所示，从图 5(a) 焊膏开始熔化到图 5(b) 焊膏和导体中的银反应生成合金并在表面张力作用下收缩成椭球状，共经历了 10 s ，而采用常规厚膜技术得到的银焊盘的浸润时间一般为 $(10 \pm 2) \text{ s}$ ，可见利用该技术得到的焊盘浸润性高，满足商业电子行业的要求。

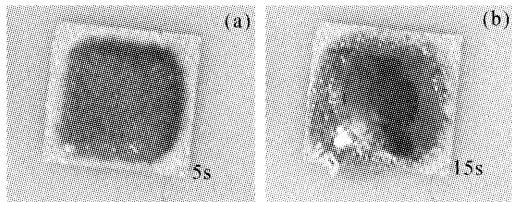


图 5 激光微细熔覆柔性直写焊盘回流焊图

(a) 焊膏开始熔化；(b) 焊膏收缩成焊球

Fig. 5 Reflow soldering patterns of pads fabricated by laser micro-fine cladding and flexibly direct writing

(a) begin with melting solder paster;
(b) begin with shrinking soldered ball

由于很多电路需要外贴元件，而厚膜导体的附着强度将影响焊接的质量，从而影响电路的可靠性。

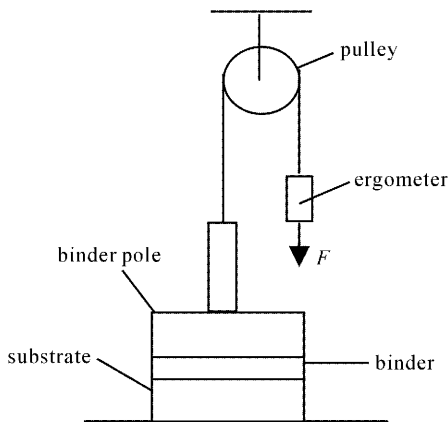


图 6 附着强度测试示意图

Fig. 6 Diagrammatic sketch of adhesive strength testing

因此，本研究采用了垂直拉伸法对所制备的厚膜导带图形进行测试，具体测试方法如图 6 所示，试样为采用上述优化参数下激光扫描的面积为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的导电图形，经过测试，拉伸力为 64 N 。由于附着强度 = 拉伸力 / 附着面积，因此，试样最终的附着强度为 16 MPa 。而采用传统的厚膜技术制备的银导带的附着强度范围大于 10 MPa 。因此，采用上述技术和工艺参数制备的导带附着强度高，满足实际电路的性能指标。

表面光洁度是各种表面微观质量与性能的评估指标，是由于零件在加工过程中由于加工工艺、材料特性等诸多因素综合作用，残留下来的各种不同形状和尺寸的微观几何形态的综合评估。它可以客观反映表面生成机制，并直接影响工程表面的功能特性。对于电子等精密元器件来说，导带表面光洁度的优良，直接影响其最终产品的可靠性和稳定性，特别影响模块或电路的集成度和高密化、微型化组装。因此，本研究采用表面轮廓仪测试了上述优化参数下制备的导带以及其他参数下制备的导带表面粗糙度，结果如图 7 所示。采用优化后参数制备的导带的表面粗糙度 $R_a = 171.6 \text{ nm}$ ，而采用其他参数下制备的导体表面粗糙度 $R_a = 230.5 \text{ nm}$ ，因此，采用上述优化参数得到的导带表面光洁度高。

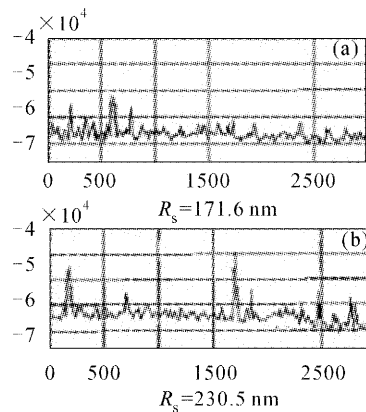


图 7 激光微细熔覆柔性直写导带表面粗糙度

(a) 优化参量制备的导带；(b) 非优化参量制备的导带

Fig. 7 Roughness of surface of conductive lines fabricated by laser micro-fine cladding and flexibly direct writing

(a) Conductive line fabricated by optimal parameters adopted;
(b) conductive line fabricated by no optimal parameters adopted

4 结 论

1) 激光微细熔覆柔性直写技术制备导带，不仅工艺简单、灵活，而且通过结合 CAD/CAM 功能，实现无掩膜下在绝缘基板一次性制备高精度、高分辨

率、高密度微细导带图形以及产品的智能化批量生产和各种精微细图形的制作与修复;

2) 激光微细熔覆柔性直写导带时,随着成分比例和激光加工功率的增加,导带组织致密性和均匀性先增加后降低,而随着扫描速度的增加,导带组织致密性和均匀性增加,但当扫描速度增加到一定值时,导带膜出现波纹状裂纹;

3) 激光微细熔覆柔性直写导带的最小极限值:线宽为 $40\ \mu\text{m}$,线间距为 $70\ \mu\text{m}$ 。最佳工艺参数为:导电银浆料:有机溶剂:成膜物质为 $100:7:4$,激光加工功率 $10\ \text{W}$,激光扫描速度 $3\ \text{mm/s}$;

4) 采用优化后的工艺参数制备的实例图形,线条清晰均匀、平滑光亮,且导线边界清晰,边界锐度好,电阻率为 $0.24 \times 10^{-5}\ \Omega \cdot \text{cm}$,浸润性高,结合强度为 $16\ \text{MPa}$,表面粗糙度为 $171.6\ \text{nm}$,所有性能指标都满足采用传统厚膜导带制备技术的电路和电子元器件性能指标的要求。

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和展望 [J]. *激光杂志*, 2001, **22**(6): 15~18
- Douglas B. Chrisey. The power of direct writing [J]. *Materials Science Electronics Industry*, 2000, **289**(5481): 879~881
- Chen Yiqun, Li Xiangyou, Li Huiling *et al.*. Study of thick-film conductor direct preparation by laser micro-cladding technique [J]. *Electronic Compaction & Materials*, 2004, **23**(8): 4~6
陈铁群,李祥友,李慧玲等. 制备厚膜导体激光直写技术研究 [J]. *电子元件与材料*, 2004, **23**(8): 4~6
- Xiangyou Li, Huiling Li, Jingwei Liu *et al.*. Conductive line preparation on resin surfaces by laser micro-cladding conductive pastes [J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2004, **233**(1~4): 51~57
- Huiling Li, Xiaoyan Zeng, Huifen Li *et al.*. Research on film thickness of conductive line formed the laser micro-fine cladding and flexibly direct writing technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(11): 654~657
- Li Huiling, Zeng Xiaoyan, Li Xiangyou. Direct fabrication of resistor on glass board by laser micro-fine cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 281~286
李慧玲,曾晓雁,李祥友. 玻璃基板上激光微细熔覆直写电阻技术的研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 281~286
- Qi Xiaojing, Liu Jingwei, Li Xiangyou *et al.*. A new technology of conductive line preparation by laser micro-cladding metal-organic pastes on PCB board [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 883~887
祁小敬,刘敬伟,李祥友等. 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
- Zeng Xiaoyan, Liu Jingwei, Qi Xiaojing *et al.*. A processing about fabrication and repair of circuit board [P]. China Patent. Application Number: 02115937.8, Public Number: 1395462
曾晓雁,刘敬伟,祁小敬等. 一种电路板制作和修复工艺 [P]. 中国专利: 02115937.8, 公开号: 1395462
- Wei Qunyan, Yu Shougeng. Microscopic analysis about sintering process of silver film on the glass substrate [J]. *Precious Metals*, 2001, **22**(2): 5~8
韦群燕,俞守耕. 银膜在玻璃基体上烧结过程的微观结构分析 [J]. *贵金属*, 2001, **22**(2): 5~8
- Gao Guanming. The effect of oxidation of AlN substrates on printing adhesion strength [J]. *Electronic Components & Materials*, 2000, **19**(2): 3~4
高官明. 玻璃基板用电子浆料 [J]. *电子元件与材料*, 2000, **19**(2): 3~4