文章编号：0258-7025(2007)Supplement-0218-05

硅基板激光微熔覆电子浆料制备导体的研究

王小宝，李祥友*，李金洪，曾晓雁
（华中科技大学光电子科学与工程学院，武汉光电国家实验室(筹)激光部，湖北 武汉 430074）

摘要 激光微细熔覆电子浆料技术是一种新型的柔性布线技术，采用激光精密加工系统对电子浆料进行处理以制备导线，具有柔性化程度高、电路图形设计、修改简捷、适合小批量生产等优点。特别是可以制备最小线宽为 20 μm 左右的导体，突破了传统丝网印刷工艺制备导线宽度的极限。利用激光微细熔覆工艺在单晶硅基板上制备出了银导线。所制备导线的最小宽度在 30 μm 左右，其电阻率和块状银在同一个数量级，能够满足应用要求。利用悬挂法测定其与硅基板的结合强度在兆帕数量级，与传统丝网印刷工艺相当。相关的工艺实验还表明，导体线宽随激光功率密度的增加而增加，随激光扫描速度的增加而减小；对于特定厚度的浆料预置层，激光扫描参数存在一个最佳的范围。激光扫描之后的高温热处理工艺有利于导线导电性能及其与硅基板的结合强度的进一步提高。

关键词 光学设计与制造；激光微细熔覆；电子浆料；硅基板；导体制备
中图分类号 TN249 **文献标识码** A

Conductor Fabrication with Laser Micro-Cladding Electronic Pastes on Si Substrate

WANG Xiao-bao, LI Xiang-you, LI Jin-hong, ZENG Xiao-yan
(*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei* 430074, *China*)

Abstract Laser micro-cladding technology is a novel method for circuit fabrication. With this method, electronic paste was disposed and sintered by laser process system to fabricate conductor. With the advantages of highly flexibility , easy design and modification, high efficiency and short cycle time, It can fabricate the conductor with minimum line width of 20 μm , which exceeds the limitation of traditional method. In previous work, the circuit fabrication on ceramic, glass and epoxy resin substrates by laser micro-cladding technology was researched. In this article, the conductor was fabricated on semiconductor (Si) substrate. Its minimum line width was about 30 μm and resistivity was at the same level with block Ag ,which can satisfy the industrial requirements. The adhesion between conductor and Si substrate was at the order of MPa, which was equivalent with the traditional printing process. The experimental results also demonstrated that the conductor width increases with laser power density increasing, but decreases with the laser scanning speed. There is an optimal parameter range in laser processing. The heat treatment after laser scanning is benefit for conductor's electric performance and adhesion between conductor and Si substrate.

Key words optical design and fabrication; laser micro-cladding; electronic paste; Si substrate; conductor fabrication

1 引 言

高精度、高密度、大规模、多样化电路板的市场需求量增加，刺激了新的厚膜电路制备工艺的诞生。激光技术与电路板制备技术相结合产生的激光柔性布线工艺就是这类新兴工艺的典型代表。在 1991 年，美国 AT&T 公司的 Kestenbaum 等就已利用激

基金项目：国家自然科学基金(50575086)和国家“863”高技术发展计划(2005AA311030)资助项目。

作者简介：王小宝(1982—)，男，河南开封人，硕士研究生，主要从事利用激光微熔覆工艺制备厚膜电路方面的研究。E-mail：hnkfwxb@yahoo.com.cn

导师简介：曾晓雁(1962—)，男，教授，博士生导师，主要从事激光先进制造技术与设备方面的研究。E-mail：xyzeng@mail.hust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail：xyli@mail.hust.edu.cn

光微熔覆布线技术制备出最小线宽为 1 μm 左右的导线[1]，但布线速度在 5 μm/s 以下；在 1995 年，美国 Castro 等[2]将金属盐和氨基化合物混合后预置于基片表面，激光辐照后获得了线宽为 1～20 μm，线间距为 3～50 μm 的电路，最大布线速度也在 100 μm/s以下；2001 年，日本的 Hirofumi Hidai 等[3]利用氩离子激光在玻璃基体的反面照射其上放置的金属粉末，制备出了 Al 和 Cu 导线，这种方法对基体有损伤，并且导线的质量也不容乐观。

为了弥补上述不足，提出了一种制备厚膜电路的新工艺——激光微熔覆电子浆料柔性布线工艺，实现了陶瓷基板[4]、玻璃基板[5]以及环氧树脂基板[6]上银导体电路的制备。制备导体的最小宽度 20～30 μm，最大布线速度已达到 100 mm/s，大大突破了其他激光柔性布线工艺在制备精细电路时布线效率不高的瓶颈[7]。单晶硅基板由于其良好的导热性能以及比陶瓷基板更适合的细间距布线性能被誉为是陶瓷基板的替代物[8]。特别是当利用线焊技术实现厚膜电路与 IC 电路互连时，对芯片和厚膜电路基板的膨胀系数的一致性要求就更为苛刻。因此，选择在单晶硅基板上利用激光微熔覆电子浆料工艺来制备导体，并得到了一些基本规律。

2　实验方法与设备

利用匀胶的方法将电子浆料均匀地铺展在基体材料上形成预置层，经激光扫描、有机溶剂清洗初步形成所需电路，最后将形成的电路放于高温炉中烧结，固化。

实验用浆料的功能相 Ag 的质量分数为 75%左右，固体颗粒平均细度小于 7 μm；使用晶向为 100，P 型掺杂的单晶硅片作基体材料；激光器采用掺镱光纤激光器，波长为 1.07 μm，功率 0～50 W 可调；匀胶设备采用中国科学院微电子中心研究所所生产的 KW-4A 型台式匀胶机；导体宽度以及导体厚度的测量采用由美国维易科（Veeco）公司出品的 DEKTAK Ⅱ A 型探针轮廓仪测量；VC103 33/4 位智慧型 LCR 分选数字万用表测量导体电阻。

3　实验结果

3.1　影响预置层厚度的因素

实验发现，预置层厚度主要由浆料黏度以及匀胶速度两个因素决定。浆料黏度越大，最终得到的预置层厚度越大，反之越小；匀胶速度升高，预置层厚度变小，反之变大。

利用黏度为 2.5 Pa·s（室温 23 ℃）的浆料，匀胶速度 3000～8000 r/min，匀胶时间 40 s 进行匀胶实验。匀胶速度－预置层厚度的关系如图 1 所示。由图可知，随着匀胶速度的增加，预置层厚度逐渐减小最后趋于恒定。

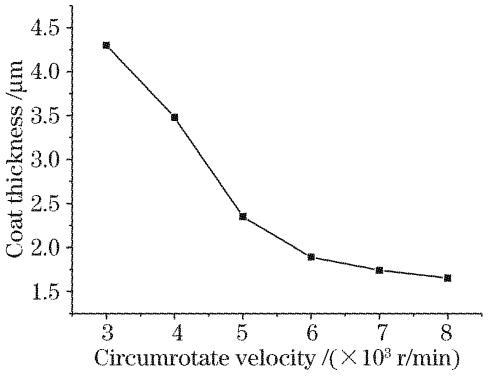

图 1　匀胶速度对预置层厚度的影响

Fig. 1　Effect of circumrotate velocity on coat thickness

预置层厚度应控制在一个合适的范围之内。预置层厚度太小，最终制备导体的厚度小，烧结后导体层容易留下孔洞，影响导体的电气性能；预置层厚度过大，如何调节激光功率密度以及扫描速度都不可能获得质量良好的导线。

3.2　激光扫描速度对导体宽度的影响

导线宽度与线间距是衡量线路板集成度的重要指标。图 2 显示了激光扫描速度对导体宽度的影响规律。在激光功率密度一定的条件下，随着激光扫描速度的增加制备导体的宽度并没有明显的变化。在功率密度一定的条件下，扫描速度存在一个上限，超过此上限值很难形成质量良好的导体。

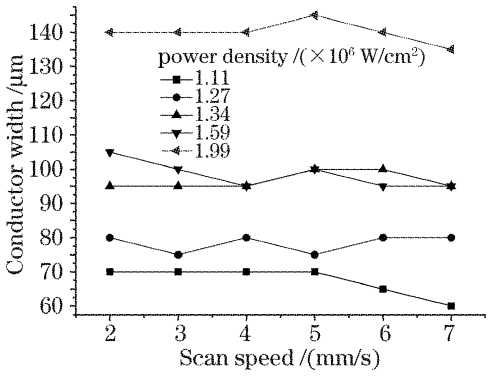

图 2　扫描速度对导体宽度的影响

Fig. 2　Effect of scanning speed on conductor width

从图 2 中还可以看出，恒定其他激光扫描参数，仅仅增加激光功率密度，形成导体的宽度就会有明显的增加，在一定程度上反应了激光功率密度对导体宽度的影响规律。

3.3 激光功率密度对导体宽度及导体电气性能的影响

图 3 反映了激光功率密度对导体宽度的影响规律：随着激光功率密度的增加，导体宽度也随之递增；激光功率密度低于某一值时（图中为 0.4×10^6 W/cm^2）便不能获得连续性好的导体；而激光功率密度高于某一值时（图中为 1.6×10^6 W/cm^2）扫描过程容易产生导体中部的“过烧”现象。

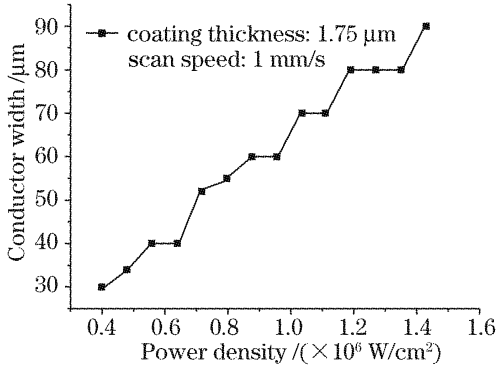

图 3 激光功率密度对导体宽度的影响

Fig. 3 Effect of power density on conductor width

在合理的预置层厚度和激光扫描速度下，仅通过改变激光功率密度就可实现不同宽度的导体的制备。激光功率密度的调节可通过改变激光器功率、在光路系统上添加孔径不同的光阑以及改变扫描时的离焦量等三种方式实现。图 4 为通过改变激光功率密度得到的宽度为 30 μm 和 250 μm 的导体照片。

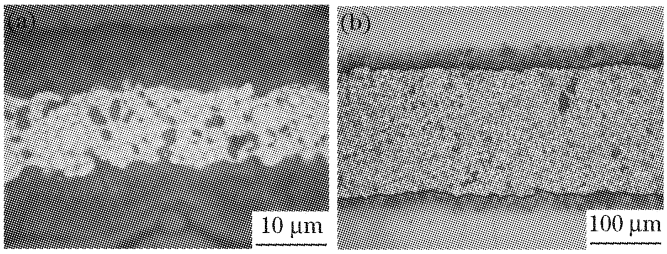

图 4 不同激光功率密度下制备的宽度不同的导体。(a)扫描速度 1 mm/s，激光功率 30 W，添加孔径为 2 mm 的光阑，导体宽度 30 μm，(b)扫描速度 1 mm/s，激光功率 40 W，正离焦 0.9 mm，导体宽度 250 μm

Fig. 4 Coneluctor width in different laser power density (a) scanning speed: 1 mm/s, laser power: 30 W, diaphragn aparture: 2mm, conductor width: 30 μm, (b) scanning speed: 1 mm/s, laser power: 40 W, far from focus: 0.9 mm conductor width: 250 μm

导体的电阻率是衡量导体导电性能好坏的核心指标，其计算公式为：

$$\rho = R\times W\times D/L, \tag{1}$$

其中 ρ 为电阻率，R 表示电阻值，W 为导体宽度，D 为导体厚度，L 是导体长度。针对制备的导体，只需测量其单位长度的电阻值、平均宽度以及平均厚度就可以依据(1) 式得到该导体的电阻率。

通过对不同激光功率密度扫描得到导体电阻的测量与计算，得到了图 5 所示的激光功率密度和导体的电阻率的关系曲线。可知，激光功率密度的改变对导体电阻率的影响并不是很大。这是因为，激光功率密度的增加改变的仅仅是制备导体的宽度，激光扫描形成导体时单位体积内的功能相含量并没有发生明显的增减。实验结果表明，制备导体的电阻率皆在 $10^{-5}\sim10^{-6}$ Ω·cm 量级，与采用传统方法在玻璃基板上制备的银导体的电阻率（12×10^{-6} Ω·cm）相当。

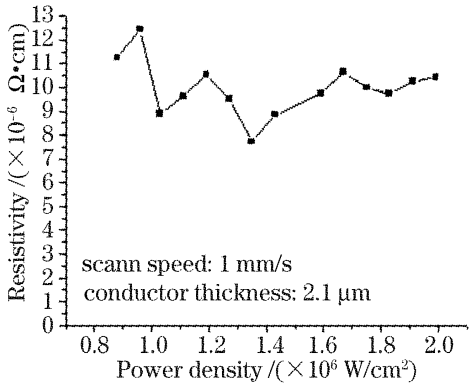

图 5 激光功率密度对导体电阻率的影响

Fig. 5 Effect of power density on conductor resistivity

3.4 后续热处理工艺对导体宽度及力学性能的影响

后续烧结工艺是一种使导线进一步致密化的过程。热处理温度下发生了玻璃相下沉，银颗粒上浮、长大、凝聚等变化。其中下沉的玻璃相起到了连接上层已经发生重排、长大的银颗粒以及单晶硅基板的作用，使导体通过玻璃相的黏连作用与单晶硅基板紧紧地结合在一起。

拉伸法是一种定量的测量结合强度的方法，该法通过缓慢而垂直地增加结合面处的拉伸力，直到将结合面拉脱，记下此时的拉伸力并将其除以结合面积（通常采用 2 mm×2 mm 的标准结合面），即得结合强度。实验发现，由于硅基板的脆性大，拉伸结果往往是硅基板本身发生碎裂而导体层仍没被拉脱。将相同条件下制备的拉伸试样按 1,2,3 进行编号，其拉伸结果如表 1 所示。由该表可知，利用激光微熔覆电子浆料工艺制备的导体与单晶硅基板的结合强度皆在兆帕量级，与传统的丝网印刷工艺相当。

后续热处理不仅可以提高导体的力学性能，它同时也影响着导体的宏观形貌。图 6 为高温烧结对导体宽度的影响曲线，可以看出，经过高温处理的导体宽度有了明显的减小。

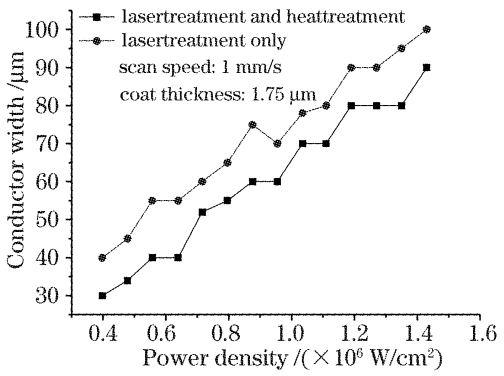

图 6　后续热处理对导体宽度的影响

Fig. 6　Effect of heattreatment on conductor width

表 1　拉伸实验结果

Table 1　Results of tensile testing

No.	1	2	3
Results /MPa	3.25	8	4.75

4　分析与讨论

4.1　预置层厚度

浆料黏度越大，浆料各成分之间相互制约的能力越强，浆料流动性差，导致浆料匀胶过程中铺展困难，预置层厚度大；增大匀胶速度，匀胶机传给浆料的离心力增大，离心力迫使浆料在基板上充分铺展开来，导致最终得到的预置层厚度变小。

4.2　激光扫描速度和激光功率密度

激光微熔覆电子浆料制备导体的机制就是利用激光的热作用使得电子浆料受热发生相变化。经过激光扫描，电子浆料中的有机物首先挥发出去，软化温度低的玻璃则受热下沉，功能相长大、铺展形成导电通路。所以，单位时间内激光束传输给电子浆料能量的多少直接决定了浆料的受热程度。很明显，在激光功率密度一定的前提下，扫描速度越高，单位时间内传给浆料的热量越少，导体宽度就会接近激光光斑直径。扫描速度过大，单位时间内传给浆料的热量不足以使其发生充分相变，难以形成连续导线；另一方面，扫描速度过低，也容易出现“过烧”现象，导致导体的宽度、阻值增大。

理论上，通过激光扫描的方式进行布线的最小线宽可以达到激光有效光斑直径的大小。但是，激光在实际扫描的过程中，由于热量的传导和扩散作用，在扫描过的区域就不可避免地存在热影响区，导致导体宽度大于激光的有效光斑直径。同样的原因，在能够得到质量良好的导线的前提下，随着激光功率密度的增大，热扩散的区域也随之增大，导体宽度变大。扫描过程中，如果激光功率密度不足，激光束能量不能将激光扫描过的浆料完全固化到硅基板上，经过后续清洗后，固化不充分的浆料就会被清洗掉从而不能形成边缘质量良好的导线；相反，如果激光功率密度过大，过高能量的激光束则会将预置层浆料加热到高于其高温烧结的温度，使得浆料中的有机物、玻璃相甚至银颗粒挥发出去形成“过烧”。

4.3　后续高温热处理

后续高温热处理就是对扫描得到的导体的进一步处理，以降低导体电阻和提高导体-基板的结合强度。高温处理的烧结温度一般在 650 ℃以上，也就是说，高温处理可使浆料中的玻璃相充分软化、熔融，这有利于玻璃相充分润湿功能相固体颗粒，发挥良好的黏结作用。厚度大的导体中单位面积的低熔点物质、玻璃相的含量相对较多，二者的挥发、软化、熔融需要更多的能量。所以，厚度大的导体的后续热处理需要更高的烧结温度或更长的保温时间。烧结温度不易过高，那样将造成晶粒大小悬殊，使得最终获得的导体结构不均匀，影响导体性能；烧结温度过低，导体结构不稳定，电阻率较大。我们所用浆料的烧结温度应在 650～850 ℃。保温时间的选择也需谨慎，时间太短不利于以上反应的充分进行；时间过长反而又会出现玻璃相重新“上浮”的现象，导致高温处理后导体的电阻率变大[9]，所以，后续高温热处理的保温时间维持在 10～15 min 为佳。

5　应　　用

激光微熔覆电子浆料柔性布线工艺可以利用各种已商品化的电子浆料在所需基板类型上制备厚膜电路，几乎抛开了浆料类型的限制，应用范围广。图 7为作者在单晶硅基板成功制备的金导体和银导体的电路图样。

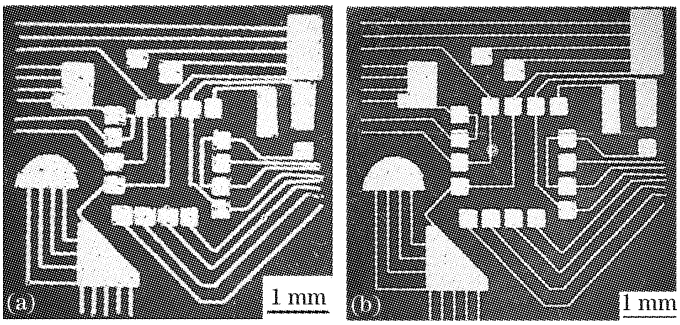

图 7　硅基板上制备的银导体电路图样(a)和金导体电路图样(b)

Fig. 7　Silver (a) and gold (b) pattern on Si subserate

6 结 论

采用激光微熔覆工艺，可以在单晶硅基板表面制备金属银导线，导线均匀连续，与基板结合牢固。

浆料黏度一定，匀胶速度与匀胶得到的预置层厚度成反比；匀胶参数一定，浆料黏度与匀胶得到的预置层厚度成正比。

厚度一定的预置层，导体宽度随激光功率密度的增加而增加，直至“过烧”；激光功率密度的变化对制备导体的电阻率并没有太大的影响。

后续热处理工艺不仅提高了导体一基板的结合强度，同时也使导体宽度发生了明显的减小。

参 考 文 献

1 Kestenbaum Ami, Serafino Anthony J. Electrical conductor deposition method [P]. U. S. Patent, 5064685, 1991

2 A. J. Castro, R. P. van Duyne, K. C. Sheng *et al*.. Laser direct writing [P]. U. S. Patent, 5378508, 1995.

3 Hirofumi Hidai, Hitoshi Tokura. Drect laser writing of aluminum and copper on glass surfaces from metal powder [J]. *Applied Surface Science*, 2001, **174**(2): 118～124

4 X. Li, H. Li, Y. Chen *et al*.. Silver conductor fabrication by laser direct writing on Al_2O_3 substrate [J]. *Appl. Phys. A*, 2004, **79**(8): 1861～1863

5 Xiangyou Li, Xiaoyan Zeng, Huiling Li *et al*.. Laser direct fabrication of silver conductors on glass substrate[J]. *Thin Solid Films*, 2005, **483**(1～2): 270～275

6 Xiangyou Li, Huiling Li, Jingwei Liu *et al*.. Conductive line preparation on resin surfaces by laser micro-cladding conductive pastes [J]. *Applied Surface Science*, 2004, **233**(1～4): 51～57

7 Li Xiangyou. Research of Arts, Mechanisms and System in Conductor Fabrication by Laser Micro Cladding Electronic Pastes [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2003. 3
李祥友. 激光微细熔覆柔性布线工艺、机理及系统研究 [D]. 武汉：华中科技大学，2003. 3

8 Hao Yu, Zhang Jianjun. The package process develop trend of little consume electronic production [C]. The sixth SMT/SMD conference papers of Chinese electronic association, 288～298
郝 宇，张建军. 小型消费类电子产品封装工艺的发展趋势 [C]. 中国电子学会全国第六届 SMT/SMD 学术讨论会论文集. 288～298

9 Li Yaolin. Thick-Film Electronic Components [M]. Guangzhou: Huanan University of Science & Technology Publishing Company, 1991. 28～34
李耀霖. 厚膜电子元件 [M]. 广州：华南理工大学出版社，1991. 28～34