

文章编号: 1001-3806(2005)04-0373-04

## 激光柔性布线技术的现状和展望

李祥友, 曾晓雁\*

(华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 综述了激光柔性布线技术的国内外发展现状, 并与传统的制板工艺进行比较, 指出了该方法的特点和优势。最后对其发展趋势进行了预测, 并为其今后的发展提供了一些建议。

**关键词:** 印刷线路板; 激光柔性布线技术; 导线制备; 发展现状

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A

### Status and prospect of conductive line fabrication by laser technology

L I X i a n g - y o u , Z E N G X i a o - y a n

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The status and prospect in domestic and oversea area of conductive line fabrication by laser technology is reviewed. Compared with its conditional methods, the basic characteristics and advantages are presented. What's more, the development trend of this technology is predicted and some suggestions are put forward for its future development.

**Key words:** printed circuit board; laser technology; conductive line fabrication; development status

## 引 言

自从 1946 年美国炮弹引信上使用银浆印制陶瓷基印制板以来, 印制电路板 (printed circuit board, PCB) 制备技术日新月异。特别是 70 年代后期大规模集成电路的产生, 使电路密度大幅度提高, 并不断向高精度、高密度、细线、小孔、高可靠性、低成本和自动化连续生产方向发展。而近年来, 电子电器产品又向着超大规模集成化、数字化、轻量化、小批量和多样化方向迈进, 传统的印制电路板制作工艺方法 (如丝网漏印、光化学刻蚀等) 越来越不能满足这些要求, 其中制造工序多, 精度低, 误差大; 线宽和线间距受到严重限制; 由于腐蚀去除的导电材料多, 浪费大; 环境污染严重等弊端日益突出。除此之外, 传统工艺的最大弱点还在于柔性化程度很低, 具体包括: 线路板制作周期较长, 从完成设计到加工出成品一般需约 2d 至 1 周时间, 而且要交给专业制造车间来完成, 无法有效缩短新产品研究开发周期; 电路板一旦制作完工, 无法对所设计的导电线路进行必要修改; 对于单件或者小批量生产电路板来说, 制造成本较高。

为解决这一难题, 国内外研究人员一直不断努力开发各种 PCB 导线的制备方法。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而提出了线路板的激光柔性布线技术, 引起了越来越多学者和科研工作者的极大兴趣, 美国、日本、乃至欧洲投入大量的人力和物力进行了广泛的研究。同时也衍生了各种工艺和方法。本文将重点介绍线路板激光柔性布线技术的发展现状, 并对其发展趋势作出简要评述。

## 1 传统的线路板制备方法

常见的 PCB 制备方法通常都是减成法。意即先将整个基板金属化, 再利用图像转移技术, 在需要成线的地方预置抗蚀剂, 然后利用腐蚀剂去除其它部分金属, 就留下了金属图案。这种工序比较复杂, 例如仅单面刚性印制板就有如下工序: 单面覆铜板 → 下料 → (刷洗、干燥) → 钻孔或冲孔 → 网印线路抗蚀刻图形或使用干膜 → 固化检查修板 → 蚀刻铜 → 去抗蚀印料、干燥 → 刷洗、干燥 → 网印阻焊图形 (常用绿油)、UV 固化 → 网印字符标记图形、UV 固化 → 预热、冲孔及外形 → 电气开、短路测试 → 刷洗、干燥 → 预涂助焊防氧化剂 (干燥) 或喷锡热风整平 → 检验包装 → 成品出厂。

根据图案转移的方式不同, 最常用的方法有丝网印刷和光化学刻蚀法。

传统的丝网漏印法工艺简单, 它先将精细丝绢或不锈钢丝按照指定的电路图形制成丝网; 再将丝网覆

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50075030); 国家八六三计划资助项目 (2001AA421290)

作者简介: 李祥友 (1975-), 男, 博士研究生, 主要从事激光加工及应用方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: xyzeng@public.wh.hb.cn

收稿日期: 2004-06-17; 收到修改稿日期: 2004-07-19

盖在覆铜板上,用抗化学腐蚀油墨涂刷在表面,在压力作用下,使油墨漏印覆盖在覆铜板上;然后把未覆盖油墨的覆铜层腐蚀掉,最后清洗掉油墨,即得到电路图形。

传统的光化学法的思想与丝网漏印法十分相似,只是在图形的转换技术上更为精确。通常是先把覆铜板板面浸渍或涂覆一层光敏抗蚀剂,然后放在高速离心机上除去多余的抗蚀剂,从而得到一层薄薄的、均匀的光敏抗蚀剂层。板干燥后进行曝光,然后显影,使抗蚀剂形成的线路图形保留下来,而板面上的其余抗蚀剂都被清洗掉。其制造特点是周密合理的安排,全面优化与自动化的工艺方案和特别高的重复生产率。光化学法可以制得最小线宽为  $0.1\mu\text{m}$  的精密电路,是现代印制板制造中的主流技术。

## 2 激光柔性布线技术的优势

激光技术自上个世纪发明以来,已经在各个行业得到了广泛的应用,产生了巨大的经济和社会效益。之所以它能够产生如此大的影响,与它本身具有的特点和优势是密不可分的。在线路板的激光柔性布线技术中,它具有如下明显的特点:(1)制板精度高,激光束光斑小,易于控制,理论上可以使导线达到微米级;(2)灵活,适应于多样化和柔性化的场合,与计算机控制相结合,可以很方便地很复杂图案的生产;(3)对于小批量,可以大大降低生产成本。

正是这些特点,使得线路板的激光柔性布线技术蓬勃发展起来。其分类见图 1。

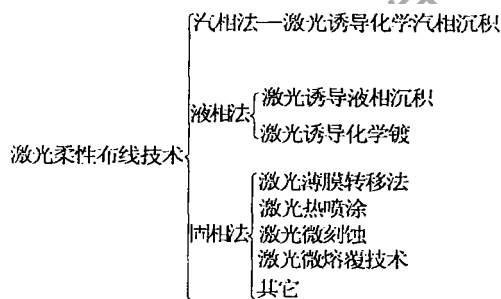


图 1 激光柔性布线技术分类

## 3 线路板激光柔性布线技术的国内外现状

### 3.1 国外概况

激光诱导化学汽相沉积 (laser-induced chemical vapor deposition, LCVD) 是发展最早、也是最成熟的方法之一。80年代初期以来,采用 LCVD 法在  $\text{SiO}_2/\text{N}_2$ , TN, GaAs, 多晶硅/二氧化硅/单晶硅复合基板等材料表面沉积了 Au, Al, Ag, Cu 等多种金属线<sup>[1,2]</sup>, 德国 STUKE 等人甚至利用该技术在氧化铝基材上制备微型马达和三维结构<sup>[3]</sup>。概括起来, LCVD 法的优点是导线纯度高、组织致密、线宽窄 (最小可达  $2\mu\text{m}$ ), 但其

主要缺点为成套设备昂贵、布线速度过低 (典型速度为  $100\mu\text{m/s}$ ) 和导线厚度过低 ( $1\mu\text{m}$  以下) 且难以控制, 为达到所要求的厚度往往要经过多次扫描。因此, 现在主要局限于超大规模集成电路芯片中线路的修复和微机械系统的制造。

激光诱导化学镀 (laser-induced electro-less plating, LEP) 工艺最早出现于 1979 年, 目前已先后在  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , 金刚石, SiC, PPQ 高分子表面制备出 Al, Cu, Pt, Pd, Ni-P 合金等金属线, 最小线宽可也达到  $2\mu\text{m}$ <sup>[4]</sup>。LEP 法的优点是不需真空、设备投资比 LCVD 少、布线速度比 LCVD 快近一个数量级。但是, 由于基片必须浸入镀液中, 众多的影响因素 (如溶液温度、浓度等参数) 使导线的尺寸精度、重复性及质量稳定性欠佳, 加上布线速度仍然偏低、化学镀液对环境的严重污染等原因, 应用前景并不如早期预期的乐观。与激光诱导化学镀不同, 激光诱导化学液相沉积是指用激光照射或扫描溶液, 通过激光的光分解和热分解作用, 使溶液中的金属化合物或者金属络合物分解成金属单质, 在扫描的部分就有金属沉积在沉浸于该溶液的基板上, 从而形成导电图形的一种方法。匈牙利的 KORDAS 等人利用  $\text{Ar}^+$  激光分别在多孔硅上沉积了镍导线, 在聚酰亚胺基体上沉积出了铜和钯导线<sup>[5~8]</sup>。SZAR NYI 等人也利用该方法沉积出了氧化锡图案<sup>[9]</sup>。并且把这种方法和 LCVD 进行了对比。这种方法的优点在于设备简单, 投资小; 但同样存在着生产效率低的缺点 (一般都需要进行多次扫描, 典型扫描速度为  $50\mu\text{m/s} \sim 100\mu\text{m/s}$ ), 以及污染环境等缺点, 因而要真正应用起来还有一定的难度。

激光薄膜转移法包括 LIFT (laser induced forward transfer) 和 MAPLE DW (matrix assisted pulsed laser evaporation direct write), 是最近发展起来的两种薄膜处理方法。这两种方法都是先将薄膜预置对激光透明的一个“丝带” (ribbon) 上, 然后把该“丝带”涂层面和基体紧密地靠在一起, 用激光照射“丝带”, 薄膜就会转移到基体上 (见图 2)。这两种技术的差别在于: LIFT

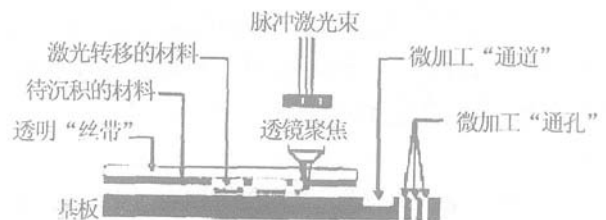


图 2 LIFT 和 MAPLE DW 原理示意图

利用激光溅射或蒸发致密涂层成原子、离子或小分子, 而后沉积到基体上; 然而 MAPLE DW 则将涂层溅射成微米尺寸的粉末、纳米粒子、化学先驱或者各种微小的添加物。美国的 CHR ISEY 利用这种方法制作电子设

备和元件,其尺寸精度在十微米量级<sup>[10,11]</sup>。日本的 SANO 等人也利用 LIFT 方法转移金属薄膜来制备金属导线图形<sup>[12]</sup>。这些方法要求激光功率必须大于一定的阈值,沉积的厚度一般小于  $1\mu\text{m}$ ,并且“丝带”要和基体紧密接触,一般不适合有机物和对激光吸收率比较低的金属,因而限制了其应用和发展。

激光熔覆布线技术直接采用导电金属或其(有机)化合物的固体粒子与有机粘结相混合预置于基板表面,激光加热后将固态粒子沉积在基板上,因而可以较快速度地沉积导线。1979年,美国麻省理工学院的 SUH 等人将  $\text{CuO}$ ,  $\text{NiO}$  等金属氧化物与环氧树脂等有机物混合后预置于绝缘基材表面,利用  $\text{CO}_2$  激光辐照使金属氧化物还原,形成金属导线,开启了绝缘材料表面激光熔覆金属导线的先河。但该工艺需要较高的温度或较长反应时间才能使金属氧化物还原成金属微粒,因此易导致基片表面严重损伤。1987年, SOSZEK 等人首先在基板表面整体涂覆一层热激活粘性薄膜 (film of heat actuable adhesive),再使用辊压、刷涂等方法在薄膜表面均匀铺一层金属粉末,然后采用激光加热激活粘性薄膜,使金属粉末和基板粘结起来,用刷子或者清洗液将未辐照区的粉末去掉,形成所需要的导电图形,最后把粘有粉末的基板放入约  $900\text{C}$  的炉子内烧结,形成表面光滑的导线。该工艺的特点是避免了激光过度损伤基材表面。但其工序偏多,导线尺寸与精度难以保证,且最后工序需  $900\text{C}$  烧结,因此只能用于高熔点的陶瓷基板。1988年, BEESON 在硅片上激光沉积金,布线速度达  $2.5\text{mm/s}$ 。1991年,美国 AT&T 公司 KESTENBAUM 等人采用甩胶法在基片表面先预置一定厚度的金属有机化合物导电胶,激光辐照后使化合物分解出纯金属粒子。最小线宽可以达到  $1\mu\text{m}$  左右。但由于必须梯度增加激光功率才能控制金属有机化合物分解速度,因此,获得涂层的最大速度不超过  $5\mu\text{m/s}$ 。此外,由于激光诱导金属有机化合物分解反应速度较慢,容易在覆层中产生“毛刺”与“爆炸”现象,使覆层均匀性变差,因此,人们在后续的研究中逐渐采用其它材料体系来代替金属有机化合物。1995年,美国 CASTRO 等人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  $1\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ 、线间距为  $3\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$  的导线,但最大布线速度也只有  $100\mu\text{m/s}$ 。1996年, WEIGEL 等人利用激光选区照射过冷有机膜,使之变粘后刷上金属粉末(银、铜、钯等),形成导电图形,最后,在  $850\text{C}$  保温约  $10\text{min}$ ,得到表面光亮、导电层厚度可达  $30\mu\text{m}$  的电路板。1998年,日本日立公司的 SHIGENOBU 等人<sup>[13]</sup>用微型喷头将以超细金属粉末作为填料的导电浆涂覆在导线断路处,激光熔覆后使导线重新连接。但上述

两个报道中都未涉及所用的激光器、工艺参数、导电层的尺寸与精度以及布线速率等参数。2000年,美国 Naval 研究室 CHR ISEY 等人用微米、纳米粉末与化学先驱物混合后预置于基板上,用脉冲紫外激光烧结制得导线、电阻和电容等元件<sup>[11]</sup>;德国斯图加特大学的 KR IPESH 等人利用传统厚膜金导电胶预置于陶瓷基板上,利用 Nd :YAG 激光烧直接得到金导线,线宽为  $50\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ ,由于烧结温度过高,所以只适合耐高温的基板<sup>[14]</sup>。2001年,日本的 HDA I 等人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,但这种方法仍然对基体有损伤,并且导线的质量也不容乐观。近年来, YABE 等人采用激光直接扫描氮化铝基板,使其直接分解出铝线<sup>[15]</sup>。美国 SENGUPTA 等也利用激光扫描 SiC 后电阻会大幅度下降的现象,在半导体材料上布线<sup>[16]</sup>。2001年,美国 Optomec Design Company 的 MILLER 等人将激光热喷涂技术用于混合电路制作及线路板的激光直写布线,并获得了美国专利(专利号:6251488)。

### 3.2 国内概况

相对于国外热火朝天的境况,国内的研究显得十分缺乏活力。尽管如此,上世纪 90 年代初,郁祖湛教授等人利用激光诱导化学镀制备了金属铜线,华东理工大学的谢湘华以及华侨大学的黄妙良、天津大学张国庆等人亦进行了类似的研究<sup>[17~19]</sup>。

近几年来,作者所在的课题组在国际上首次提出了利用激光微熔覆导电浆料(LMCEP)的方法制备线路板<sup>[20]</sup>(见图 3)。该方法与 CAD/CAM 技术相结合,可以大大提高线路板制备的效率(最大速率可达到  $100\text{mm/s}$ ),同时明显降低生产成本。目前,已经能够在有机板、玻璃板和陶瓷板上分别制备  $80\mu\text{m}$ ,  $40\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m}$  的精密导线。更为重要的是,利用该方法可以直接制备厚膜电阻、电容和电感,就进一步简化了电路板的制备工艺。

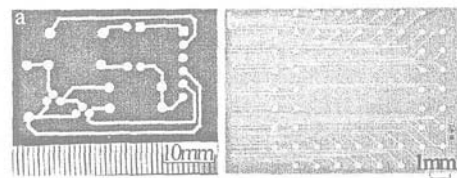


图 3 利用 LMCEP 技术制备的线路板 a—有机板 b—陶瓷板

## 4 发展趋势、结论及展望

纵观国内外的的发展趋势,不难发现,与国外相比,国内在激光柔性布线方面投入的人力和物力明显不足,从而导致了与国外在该技术上的巨大差距。同时,通过分析其研究热点,可以看出线路板激光柔性布线技术有着如下的发展趋势:(1)柔性化、多样化发展。

这也是激光柔性布线技术区别于传统技术的最大优势,同时也是现代电子技术发展的需求;(2)高效率、低成本方向发展。提高效率 and 降低成本是相辅相成的,同时也是一对矛盾,如何使之完美统一,是众多学者梦寐以求的目标;(3)高精度、高性能方向发展。传统的制备方法由于本身的缺点,很难进一步提高精度(线宽、线密度),激光柔性布线技术的引入,提供了解决这一难题的契机。

毋庸置疑,线路板的激光柔性布线技术的发展潜力和空间是巨大的。尽管和国外差距是明显的,但是只要我们迎头赶上,甚至超过他们也是完全可能的。

### 参 考 文 献

- [1] MO LANEN H, REMES J, LEPPÄVUORI S *et al* Low resistivity LCVD directwrite Cu conductor lines for IC customization [J]. *Physica Scripta*, 1997, 69: 237~241.
- [2] TERRILL R E, CHURCH K H, MOON M. Laser chemical vapor deposition for microelectronics production [J]. *IEEE Aerospace Applications Conference Proceedings*, 1998, 1: 377~382.
- [3] LEHMANN O, STUKE M. Laser-driven movement of three-dimensional microstructures generated by laser rapid prototyping [J]. *Science*, 1995, 270 (5242): 1644~1646.
- [4] SATO Y, YOSHIDA M, NISHIYAMA T *et al* Laser-enhanced palladium electroless plating [J]. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1997, 75 (1): 4~6.
- [5] KORDÁS K, BALIK, LEPPÄVUORI S *et al* Laser direct writing of palladium on polyimide surfaces from solution [J]. *Applied Surface Science*, 1999, 152 (3): 149~155.
- [6] KORDÁS K, REMES J, LEPPÄVUORI S *et al* Laser-assisted selective deposition of nickel patterns on porous silicon substrates [J]. *Applied Surface Science*, 2001, 178 (1~4): 93~97.
- [7] KORDÁS K, NÁNAIL GALBÁCS G *et al* Reaction dynamics of CW Ar<sup>+</sup> laser induced copper direct writing from liquid electrolyte on polyimide substrates [J]. *Applied Surface Science*, 2000, 158 (1): 127~133.
- [8] KORDÁS K, BALIK, LEPPÄVUORI S *et al* Laser direct writing of copper on polyimide surfaces from solution [J]. *Applied Surface Science*, 2000, 154~155: 399~404.
- [9] SZÖR NYIT, GERETOVSZKY Z, TÖTH J *et al* Laser direct writing of tin oxide patterns [J]. *Vacuum*, 1998, 50 (3~4): 327~329.
- [10] CHR ISEY D B, PQUE A, MODIR *et al* Direct writing of conformal mesoscopic electronic devices by MAPLE DW [J]. *Applied Surface Science*, 2000, 168 (1~4): 345~352.
- [11] CHR ISEY D B, PQUE A, FITZ-GERALD J *et al* New approach to laser direct writing active and passive mesoscopic circuit elements [J]. *Applied Surface Science*, 2000, 154~155: 593~600.
- [12] SANO T, YAMADA H, NAKAYAMA T *et al* Experimental investigation of laser induced forward transfer process of metal thin films [J]. *Applied Surface Science*, 2002, 186 (1~4): 221~226.
- [13] SHIGENOBUM, MIKID H, HARUHISA S *et al* Method of modifying conductive lines of electronic circuit board and its apparatus [P]. *US Patent*: 5832595, 1998-11-10.
- [14] KRIPESH V, GUSTW, BHATNAGAR S K *et al* Effect of Nd:YAG laser micromachining on gold conductor printed over ceramic substrates [J]. *Materials Letters*, 2000, 44 (6): 347~351.
- [15] YABE H, TAKAHASHI A, SUMIYOSHI T *et al* Direct writing of conductive aluminum line on aluminum nitride ceramics by transversely excited atmospheric CO<sub>2</sub> laser [J]. *APL*, 1997, 71 (19): 2758~2760.
- [16] SENGUPTA D K, QUICK N R, KAR A *et al* Laser direct write of conducting and insulating tracks in silicon carbide [J]. *Materials Research Society Symposium-Proceedings*, 2000, 624: 127~133.
- [17] 谢湘华, 张谊华, 方尔梯 *et al* 激光诱导醋酸铜乙醇溶液反应直写金属铜线 [J]. *应用激光*, 1996, 16 (6): 252~260.
- [18] 黄妙良, 林建明, 林煜 *et al* 激光诱导化学沉积(铜)的实验研究 [J]. *激光杂志*, 1996, 17 (5): 249~251.
- [19] 张国庆, 姚素薇, 刘冰 *et al* 半导体硅上激光诱导选择性电镀铜 [J]. *应用化学*, 1997, 1 (14): 33~36.
- [20] LIX Y, LIHL, LIU J W *et al* Conductive line preparation on resin surfaces by laser micro-cladding conductive pastes [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 233 (1~4): 51~57.

(上接第 360 页)

### 参 考 文 献

- [1] BARTY C P J, KORN G, RAKSIF *et al* Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses [J]. *Opt Lett*, 1996, 21 (3): 219~221.
- [2] LeBLANC C, CURLEY P, SALNF. Gain-narrowing and gain-shifting of ultra-short pulses in Ti:sapphire amplifiers [J]. *Opt Commun*, 1996, 131: 391~398.
- [3] CHAMBARET J P, LeBLANC C, CH&IAUX G *et al* Generation of 25TW, 32fs pulses at 10Hz [J]. *Opt Lett*, 1996, 21 (23): 1921~1923.
- [4] 曹东茂, 魏志义, 滕浩 *et al* 整形种子脉冲克服放大过程中的增益窄化效应的研究 [J]. *物理学报*, 2000, 49 (6): 1202~1205.
- [5] 贺晓旭, 白晋涛, 侯洵. 高斯型光谱设计在飞秒激光放大器中消除增益窄化效应的研究 [J]. *光子学报*, 2001, 30 (8): 957~960.
- [6] 赵尚弘, 王屹山, 陈国夫 *et al* 钛宝石超短脉冲放大过程中的增益窄化效应 [J]. *光子学报*, 1997, 26 (3): 197~200.
- [7] 崔宏滨, 刘文汉. 多层膜闪耀光栅衍射的运动学研究 [J]. *光学技术*, 2001, 27 (3): 272~277.
- [8] MACLEOD H A. *Thin-film optical filters* [M]. Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001. 53~85.
- [9] 唐晋发, 郑权. *应用薄膜光学* [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 30~56.
- [10] SIEGMAN A E. *Lasers* [M]. California: University Science Books, 1986. 221~279.