

文章编号 1674-2915(2010)05-0405-10

激光微熔覆技术的发展及应用

蔡志祥, 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: 基于激光的直写技术具有加工周期短、使用灵活、无需掩模、环境要求低等诸多优点, 其在微电子等领域应用广泛。本文引入了一种新的激光直写技术—激光微熔覆技术, 介绍了该技术的工艺过程及特点, 并在此基础上集成制造了激光微熔覆设备。通过激光与物质的相互作用原理, 理论分析了激光微熔覆电子浆料的成型机理。最后, 举例说明该技术在微电子、光电子以及传感器领域的应用, 并对该技术的发展趋势进行了初步预测, 认为该技术在混合集成电路基板的加工、微型传感器和加热器的制造、平面无源电子器件和分立无源电子器件的研制以及生物芯片、电子封装等领域有好的发展前景。

关键词: 激光微熔覆; 直写技术; 电子浆料

中图分类号: TG156.99 文献标识码: A

Development and applications of laser micro cladding

CAI Zhi-xiang, ZENG Xiao-yan

(Laser Division, Wuhan National Laboratory of Optoelectronics, School of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Laser-based direct-writing techniques have gained increased interests in the microelectronic industry, which have some outstanding advantages such as short processing cycles, strong flexibility, no mask, and low environmental requirements. A new technology called laser micro-cladding technology was presented in this paper and the principles and characteristics of the technology were described in detail. On the basis of above researches, the equipment for laser micro cladding was assembled, then by studying the principle of interaction between laser and matter, the formation mechanism of laser micro cladding electronic pastes was analyzed. Finally, the applications of the technology to micro-electronic, optoelectronic and sensor areas were illustrated. Moreover, the development of this technology was predicted, and it was pointed out that the technology will show good prospects in fields of hybrid integrated circuit substrates, micro-sensors, micro-heaters, plane passive electronic devices, discrete devices, biochip and electronic packages.

Key words: laser micro-cladding; direct-writing technology; electronic paste

收稿日期: 2010-03-11; 修订日期: 2010-05-13

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA030114)

1 引言

随着电子产品向微型化、集成化、短时效、小批量以及多功能化的方向发展,传统的制造工艺,如半导体工艺、丝网印刷技术和低解析度光刻技术,因存在着制造工序多、需制作掩模板、研发周期长、柔性化程度低等缺点,越来越不能满足低成本、高精度、小批量快速制造的要求^[1,2]。因此,近年来,人们在不断探索电子制造新技术、新工艺和新装备,以提高制造过程的柔性化程度,加快研发速度,扩大产品品种,降低生产成本。激光直写就是基于这一需求而逐渐发展起来的一门新技术。

激光直写^[3,4]是采用高能激光束完成功能材料或者结构直接制造的工艺过程,它包括减成法和加成法两种工艺,其主要特点是不需要掩模,利用机床的CAD/CAM功能可以完成复杂图形或者结构的直接制造,柔性化程度很高。

减成法^[5]主要是一些刻蚀技术,如激光直接刻蚀技术、激光诱导化学刻蚀技术等。该方法利用激光能量去除材料上不需要的部分以获得所需的图形结构,并不改变基体材料的组分。加成法可以根据需要在基板表面选区沉积不同成分的物质,因此制造过程的柔性化程度比减成法更高。常见的加成式激光直写技术,如激光诱导化学气相沉积技术(LCVD)^[6,7]、激光诱导化学镀(LEP)^[8,9]、激光薄膜转移法^[10]和激光微熔覆^[11~24]。

激光诱导化学气相沉积技术和激光诱导化学镀技术发展较早。激光诱导化学气相沉积制备技术是指在反应容器内利用激光束的高温、高效能诱导作为先驱体的气体物质发生化学反应,并使反应产物在激光辐照区域沉积而形成薄膜的过程。当激光束按一定轨迹在基板上扫描,即可沉积出所需要的导电图形,完成线路板制备任务。80年代初期以来,采用LCVD法在 SiO_xN_y 、TiN、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^[25~28],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^[29,30]。概括起

来,LCVD法的优点是所制备的导线纯度高、组织致密、线宽窄(最小可达 $2\ \mu\text{m}$),但其需要高真空系统,其成套设备昂贵、布线速度很低(典型速度为 $100\ \mu\text{m}/\text{s}$)和导线厚度偏低($1\ \mu\text{m}$ 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。此外,在LCVD法中,先驱体(气源)要求较高,对基板的种类也有一定的限制,还需要比较贵重的真空系统,工艺操作也比较困难。因此,LCVD技术的主要应用现在局限于超大规模集成电路芯片中线路的修复和微机电系统(MEMS)的制造等对质量要求比较高的领域。

激光诱导化学镀技术是最常见的激光诱导液相沉积技术之一,它是指由激光束直接辐照浸在液态化学介质中的基板,基板受热后局部温度升高,产生选择性反应沉积金属导线的技术。LEP工艺最早出现于1979年^[31],目前已在原有直接诱导化学镀的基础上,发展了激光预置晶种—化学镀复合法和激光直接照射选区活化基板—化学镀复合法(也称为两步法)两种工艺,先后在 Al_2O_3 、 ZrO_2 、金刚石、SiC、PPQ高分子表面制备出了Al、Cu、Pt、Pd、Ni-P合金等金属线,最小线宽也可达到 $2\ \mu\text{m}$ ^[32,33]。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、溶质浓度等)使导线的尺寸精度、重复性及质量稳定性不尽人意,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。

除了上述激光诱导化学镀以外,激光诱导液相沉积技术还包括利用激光的光分解或者热分解作用,选区照射或扫描溶液,使溶液中的金属化合物或者金属络合物分解成金属单质,然后沉积在被扫描区域的基板上,形成导电图形的方法或技术。匈牙利的K. Kordás等人利用 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^[34,35]。T Sz rényi等人也利用该方法沉积出了氧化锡图案^[36],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(一般都需要进行多次扫描,典型扫描速度为 $50\sim$

100 $\mu\text{m/s}$), 以及污染环境等缺点, 因而要真正在工程上应用还有很大的难度。

LIFT (Laser Induced Forward Transfer) 和 MAPLE DW (Matrix Assisted Pulsed Laser Evaporation Direct Write)^[37] 是最近发展起来的两种激光薄膜转移方法。这两种方法都是先将薄膜预置于对激光透明的一个“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”的反面, 薄膜就会因激光的作用而脱落到基体上。这两种技术的差别在于: LIFT 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; 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。该技术的特点是布线速度快, 可以达到每秒数十毫米量级, 缺点是能够沉积的材料种类有限, 并且一般需要预先在“丝带”表面沉积膜层, 使得工序增多, 成本增大。美国的 D. B. Chrisey 利用这种方法制作电子设备和元件, 其尺寸精度在 10 μm 量级^[38]。日本的 T. Sano 等人也利用 LIFT 方法转移金属薄膜来制备金属导线图形^[39]。这些方法要求激光功率必须大于一定的阈值, 沉积的厚度一般在 1 μm 以下, 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。这些缺点限制了其应用和发展。

激光微熔覆技术是作者所在科研团队在国家自然科学基金和国家高技术发展研究计划(863计划)的资助下率先提出的。它是以电子浆料等功能材料作为熔覆材料, 采用连续或者脉冲激光辐照, 使熔覆材料内部、熔覆层与基材界面发生物理、化学作用, 形成所需要的导线、功能元器件或机械零部件的工艺流程。

与激光诱导化学气相沉积、激光诱导化学镀和激光薄膜转移法相比, 激光微熔覆技术具有一定的优点, 本文对该技术进行了详细的介绍。

2 激光微熔覆工艺过程及设备

2.1 工艺过程

激光微熔覆电子浆料工艺过程如图 1 所示。其具体步骤如下:

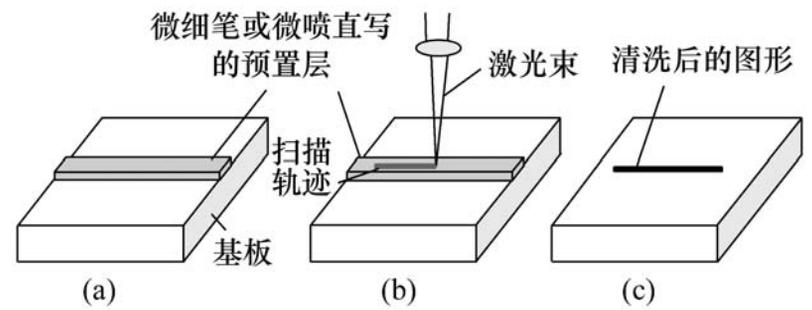


图 1 激光微熔覆工艺过程的示意图

Fig. 1 Principle of laser micro cladding

(1) 浆料预置

在早期, 涂层预置一般采用旋转匀胶法。该方法可以很方便地预置均匀膜层, 但存在如下问题: 第一, 激光直写后需去除多余的浆料, 清洗后的浆料不能回收利用, 贵金属材料浪费严重; 第二, 该方法无法在同一基板上预置不同材料; 第三, 不能在表面不平整的基板或三维基板上预置浆料。为了克服这些问题, 研究人员发明了微细笔和微喷装置用于浆料预置, 该方法不仅提高了材料的利用率, 而且用多支微细笔或微喷装置可在同一基板上预置不同材料。以一支微细笔或微喷为例, 具体操作方法是: 通过微细笔或微喷直写将一定黏度的电子浆料按预设的图形轨迹预置于基板表面, 然后将浆料在低温度下(150 左右)烘干, 得到均匀的预置层, 如图 1(a) 所示;

(2) 激光直写

利用激光按照微细笔或微喷直写的轨迹对预置膜层进行有选择性的扫描烧结, 获得所需要的图形, 如图 1(b) 所示;

(3) 后续清洗

激光扫描后用有机溶剂(如乙醇、丙酮等)清洗掉预置层中未处理的区域, 而激光处理过的部分因电子浆料内部组织结构的变化则不能被清洗掉, 这样留下来的部分就形成了所需要的电路图形, 如图 1(c) 所示。

2.2 设备

根据激光微熔覆直写的需求, 在机床 Z 轴上合理设计激光光路、微细笔和微喷装置的安装工位, 将激光加工与微细笔/微喷直写集成到同一台机床上, 实现多种加工手段的优势互补, 构建的设备系统框图如图 2 所示, 整个系统由激光直写系

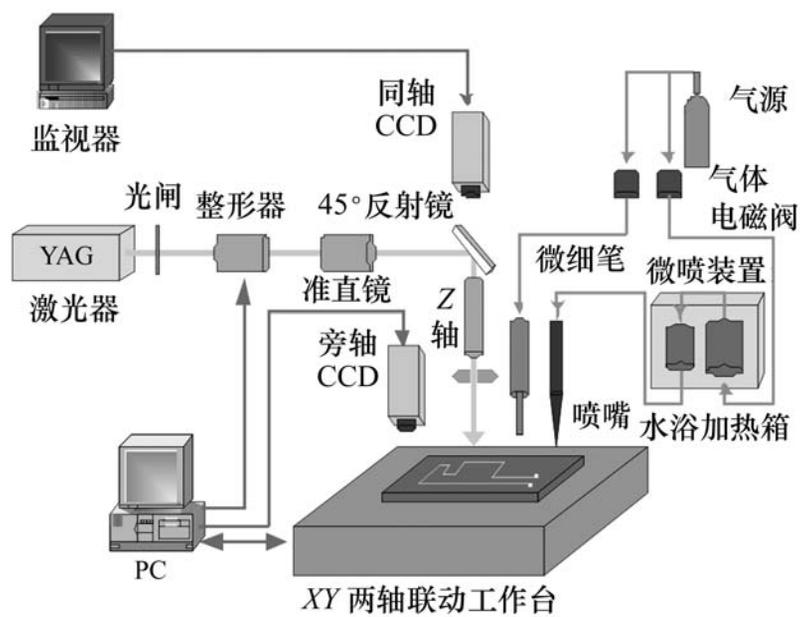


图2 激光微熔覆设备结构原理图

Fig.2 Processing system configuration for laser micro cladding

统、微细笔和微喷直写系统、XYZ 三维工作台、数控系统、CCD 同轴监视系统和 CCD 旁轴定位系统组成。自主开发的 LaserCAM 软件可根据用户提供的文件 (AutoCAD 或 Protel 格式), 方便、快捷地进行元器件的制造, 且与微细笔、微喷装置结合起来, 实现多层自动定位和不同种类功能涂层的制备。

图3 是最新研制的激光微熔覆直写设备实物照片, X、Y轴采用直写电机驱动, 加工幅面为 400 mm × 300 mm × 100 mm, 机床重复定位精度达 ±0.001 mm。



图3 激光微熔覆设备实物照片

Fig.3 Photo of laser micro cladding equipment

原理借鉴了注射成型的原理, 把浆料腔内的浆料挤压出微细笔头, 并以注射式涂覆的方式在系统控制单元的控制下将浆料直接沉积在基板上, 从而得到预先设计的图案。

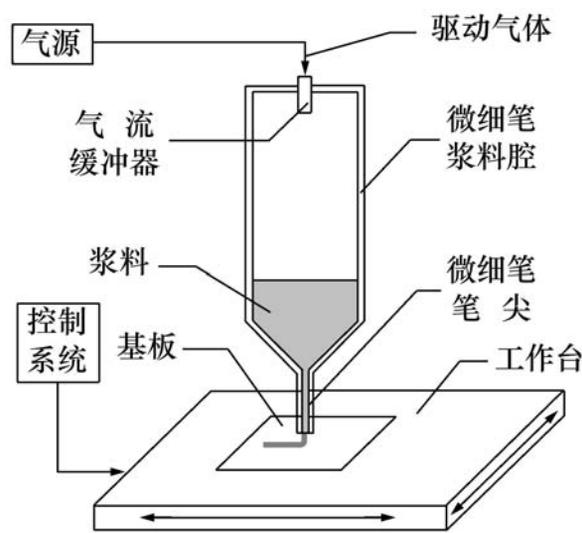


图4 微细笔的结构示意图

Fig.4 Structure of micropen

微细笔可以满足高黏度电子浆料的直写, 适合所有商用厚膜电子浆料的使用。影响微细笔直写线宽的因素有浆料黏度、直写速度、笔头内径、驱动气压和笔头端面到基板表面的垂直距离。目前, 微细笔直写电子浆料最小线宽不超过 60 μm。

与微细笔的浆料挤出式直接沉积工艺原理有所不同, 微喷直写系统首先利用负高压雾化装置 (图5所示) 将浆料雾化成细小颗粒以后, 用气体将其带出腔体, 经过泄压装置排除多余气体, 以适当的气流速度, 再通过微细喷嘴喷射到基片上成膜。该装置适合低黏度电子浆料的直写, 直写最小线宽可达 30 μm。

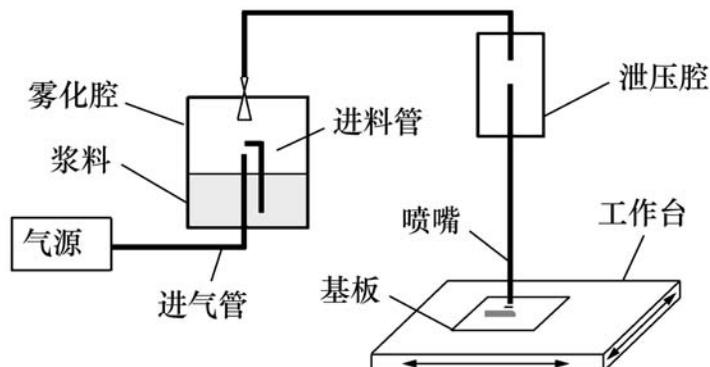


图5 微喷结构示意图

Fig.5 Structure of microjet

图4 为微细笔的结构示意图。微细笔的工艺

3 激光微熔覆电子浆料的机理

3.1 电子浆料与激光的热耦合

激光微熔覆电子浆料的过程实质上就是激光与电子浆料的热耦合过程,这个过程主要经历能量的吸收和反射、辐照加热热传递两个阶段。

(1) 能量的吸收和反射

当激光照射在干燥后的电子浆料膜层表面时,除了一部分激光能量被材料吸收外,还有一部分能量在激光作用区域发生反射,但在此过程中依然遵守能量守恒法则,即:

$$E_0 = E_{\text{reflection}} + E_{\text{Absorb}}, \quad (1)$$

式中, E_0 为入射到材料表面的激光束能量; $E_{\text{reflection}}$ 为被材料表面反射的能量份额; E_{Absorb} 为被材料表面吸收的能量份额。

上式可以变形为:

$$\frac{E_{\text{reflection}}}{E_0} + \frac{E_{\text{Absorb}}}{E_0} = F + X, \quad (2)$$

式中, F 为反射系数, X 为吸收系数。

对于激光束而言,不同材料或同一材料的不同表面状态的反射率和吸收率是不同的。多年的研究表明,材料对激光的吸收率除取决于材料的特性外,还与激光的波长、材料的温度和表面状态等有关。激光波长越短,材料对其吸收率越高;材料温度越高,材料对激光的吸收率也越大。以 PTC 热敏电阻浆料为例,功能相颗粒为金属氧化物和其盐的混合物,它们能吸收 1.06 μm 的 YAG 激光,能量传递效率也很高,激光穿透深度一般在 10 nm 量级。黏结相—玻璃颗粒只能吸收一小部分的 YAG 激光能量,但由于玻璃导热性差,因而较易熔化,激光对其的穿透深度可达 1 cm 以上。

(2) 热量的传递过程

当已直写的电子浆料层表面吸收激光能量后,通过激光光子与电子浆料内部的物质发生作用,能量在极短的时间内转化为热能并向材料内部传播。随着加热过程的不断进行,材料温度不断升高,其吸收激光能量的比例也不断升高。

厚膜浆料内部的升温状态不仅取决于激光的

光束特性、能量和作用时间,而且取决于材料自身的物理特性,如熔点、沸点、比热容、热导率、密度等。一般而言,激光束加热材料时存在如下基本规律:

第一,激光作用时间相同时,吸收的实际能量越大,材料的升温速度越快;

第二,吸收的激光能量相同时,材料的比热容越小,温升越高;

第三,在相同的能量密度及作用时间的条件下,材料的热导率越小,激光束作用区与基体材料相邻部位之间的温度梯度越大。

激光辐照电子浆料,将使其发生非常复杂的热过程,涉及诸多彼此关联问题,如热量吸收和传递、微观结构的演变、流体问题、力学问题、化学问题等。其中,明确整个微熔覆工艺中能量的吸收以及传热过程引起的温度的分布和演变对于深入了解激光微熔覆电子浆料机理至关重要。

在整个激光微熔覆过程中一直伴随着热传导、热对流和热辐射 3 种传热方式。具体体现在激光对电子浆料膜层表面的热辐射、相互接触的颗粒之间的热传导、孔隙中的气相和固相颗粒之间的热传导、电子浆料膜层表面和外部气体之间的热辐射以及对流等,其中热传导占主要地位。激光辐射被转换为热量后,靠热传导迅速地传给整个膜层。注入能量的大小取决于激光的功率密度和扫描速度,也决定了激光微熔覆中的两个重要参数—膜层表面最高温度和穿透深度。假设激光光斑内能量呈均匀分布,把所作用的材料认为是半无限大固体,激光光斑远小于所作用材料的厚度,在物体内部发生一维瞬态热传导,表面最高温度和穿透深度可分别用式(3)、(4)表示:

$$T_{\text{max}} = \frac{2X}{k} \frac{ad}{v}, \quad (3)$$

$$z_{\text{max}} = 2 \sqrt{(ad\mathcal{N}) \ln(T_v/T_m)}, \quad (4)$$

式中, \mathcal{N} 为激光功率密度, X 为吸收系数, k 为导热系数, \mathcal{N} 为热扩散系数, d 为激光光斑直径, v 为激光扫描速度, T_v 为气化温度, T_m 为熔化温度。由式(3)、(4)可知,激光功率密度越高或者扫描速度越低,膜层表面温度就越高,穿透深度也越深。

3.2 激光微熔覆-瞬时烧结过程

激光微熔覆电子浆料过程如图 6 所示。激光

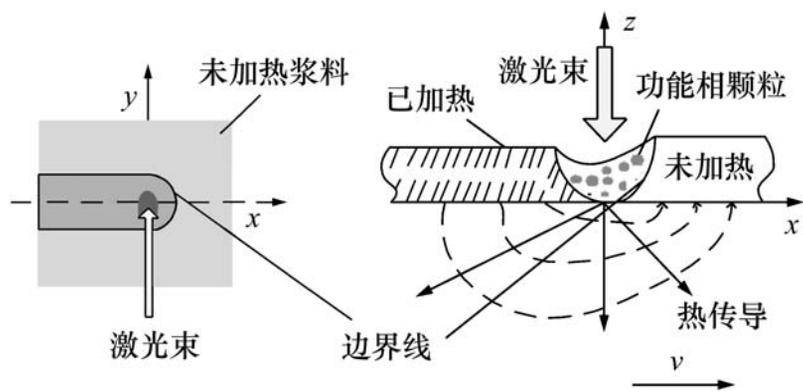


图6 激光微熔覆过程示意图

Fig. 6 Process of laser micro-cladding

功率达到一定值后,由于激光能量集中,激光光斑中心温度可高达千摄氏度,该温度高于浆料中玻璃黏结相的熔点(400~700℃),因此该相首先熔化,发生粘性和塑性流动的同时,润湿功能相颗粒,使颗粒重新分布,粘结在一起并形成致密结构。由于激光强度分布的不均匀性(高斯光束)以及向周围热扩散的不均匀性,光斑区的温度分布一般总是中心高,边缘低,光斑下的浆料膜层表面温度分布也是如此。由于流体的表面张力系数、粘性系数、体膨胀系数等都同温度有关,膜层表面的径向拉力分布是中心弱,边缘强,使玻璃溶液形成径向朝外的流动,从而带动了膜层内部的对流运动,膜层的表面往往是波状起伏的,边界高于中心熔体,出现了熔体的“落差”。由于激光是快速加热快速冷却,光斑边界的熔体还来不及在重力的驱动下从边界底部向中心流动,凝固后就形成了“碗”状形貌,如图7所示。

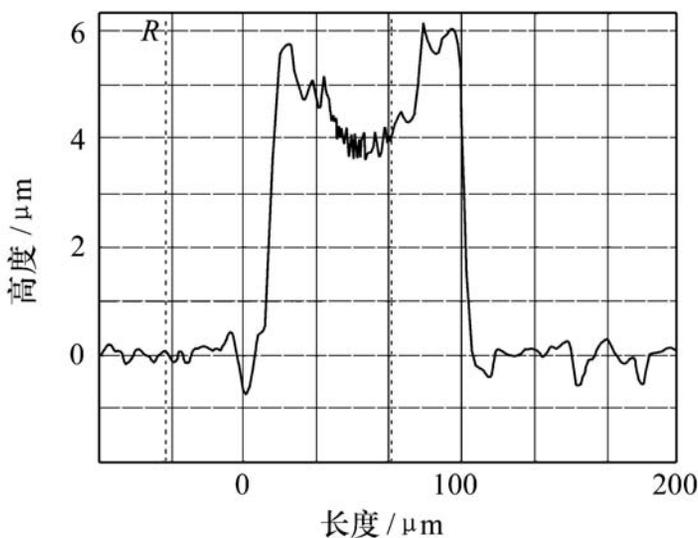


图7 激光微熔覆制备的电热电阻截面轮廓图

Fig. 7 Cross-section profile of heating resistor fabricated by laser micro cladding

在激光微熔覆电子浆料的过程中有液相的出现,又由于激光束与浆料作用的时间极短(一般为0.5~25 ms),液相存在的时间就更短,它的生成与凝固过程非常快,传统液相烧结中的某些阶段不能充分进行,也很难同步观察。因此,初步可认定激光微熔覆电子浆料的过程实质是瞬时液相烧结。

4 激光微熔覆技术的优势

作为一种新兴的激光直写制造技术,激光微熔覆主要技术优势如下:

(1) 能制备的元器件种类广泛: 固态或半固态熔覆材料体系的选择范围几乎不受限制,不但可用来制备电子元器件,亦可用于制备各种波导、光栅等光电子器件;

(2) 可适合的基材范围广泛: 与其它激光直写技术对基材的成分、特性要求很严不同,有机基板、陶瓷、玻璃、单晶硅片都适合作激光微熔覆的基板;

(3) 可非常方便地实现多种材料和多层材料的快速制造: 激光加热与微细笔或微喷装置相结合,可在同一基板上实现导线、电阻、电容等不同器件的制备,或实现多层布线和元器件的制备;

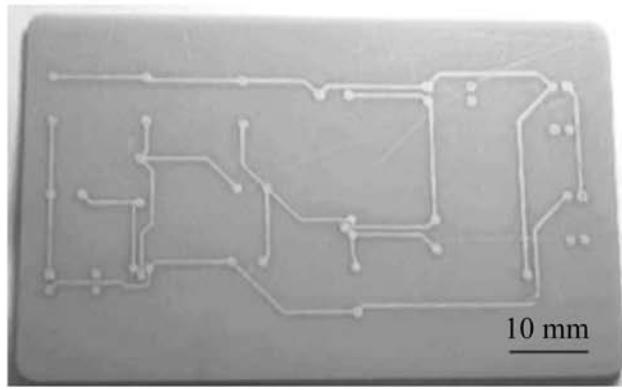
(4) 激光微熔覆设备性能可靠,性价比高: 激光微熔覆所能制备的电子元器件精度较高,可达10 μm左右,而设备造价比皮秒、飞秒激光加工系统便宜得多,且性能可靠,更加容易为用户接受。

经过多年的研究,不仅利用该技术制备出了导线、电阻、电容、电感等微电子器件,而且进入了光波导等光电子领域以及温度、气敏等传感器制造领域,并开发出了相应的设备。

5 激光微熔覆技术的典型应用

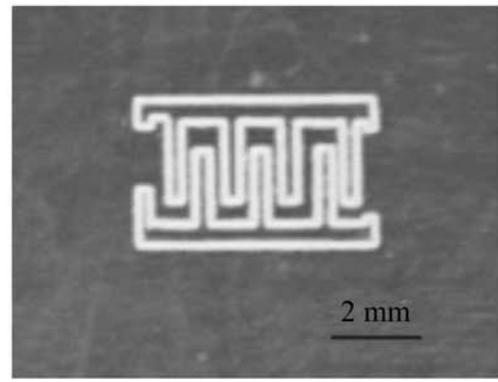
5.1 制备互连导线

目前,利用激光微熔覆技术已经成功地在树脂板、玻璃、陶瓷、硅以及柔性聚酰亚胺基板上制备出了金、银等导线,如图8所示。利用该技术可以方便地实现互连导线制备以及缺陷电路板的快速修复。



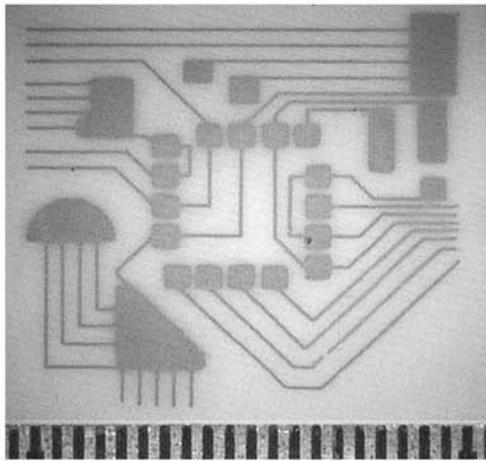
(a) 树脂基板银导线

(a) Silver conductive lines on resin substrate



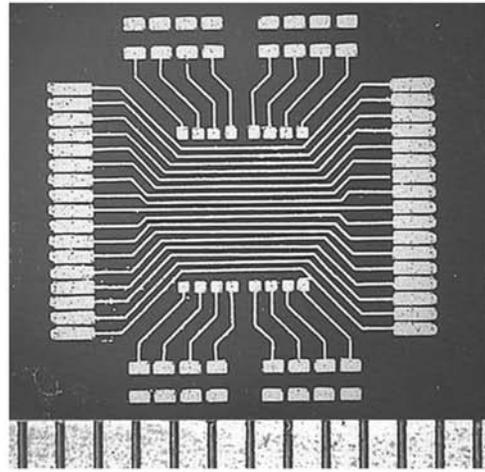
(b) 玻璃基板银导线

(b) Silver conductive lines on glass substrate



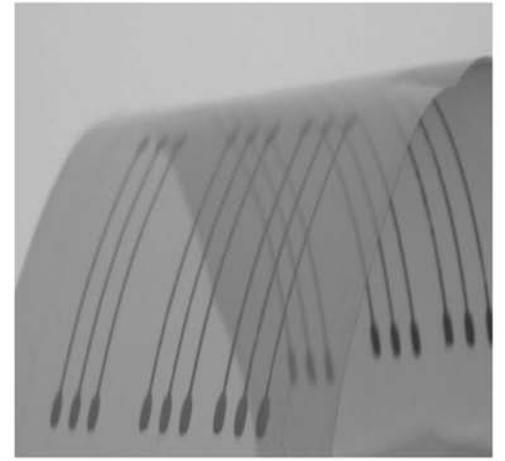
(c) 陶瓷基板金导线

(c) Gold conductive lines on ceramic substrate



(d) 硅基板银导线

(b) Silver conductive lines on Si substrate



(e) 柔性基板银导线

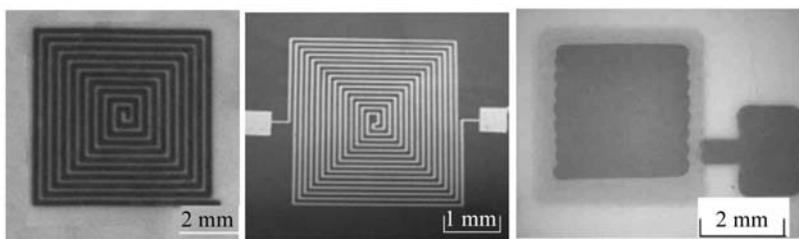
(c) Silver conductive lines on flexible substrate

图 8 激光微熔覆技术在各种基板上制备导线

Fig. 8 Conductive lines on different substrates by laser micro cladding

5.2 制备无源电子元器件

图 9 为利用激光微熔覆技术制备的电阻、电容和电感等电子元件。通过相关测试, 证明其性能和现有厚膜印刷技术相当, 其精确度甚至优于丝网印刷工艺。



(a) 电阻
(a) Resistance

(b) 电感
(b) Inductance

(c) 电容
(c) Capacity

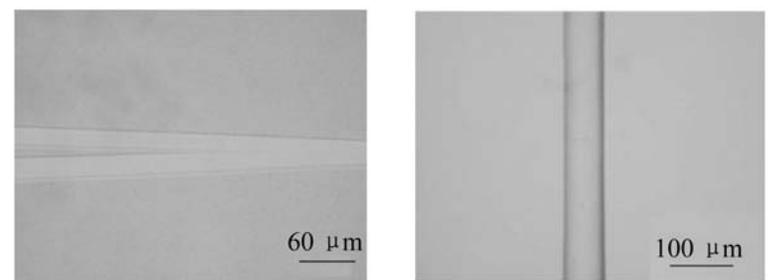
图 9 激光微熔覆技术制备电子元器件

Fig. 9 Electronic components fabricated by laser micro cladding

5.3 制备光电子器件

图 10 给出了利用激光微熔覆技术制备的光波导器件实物图。其中图 10(a) 为溶胶-凝胶法和激光微熔覆技术复合制备的“Y”型分支(线宽为 $20\ \mu\text{m}$, 夹角为 4°), 其最小损耗值达到

$1.77\ \text{dB/cm}$ 。图 10(b) 为所制备的 PI 聚合物光波导, 最小损耗可达 $0.11\ \text{dB/cm}$ 。



(a) 硅-钛体系 Y 分支波导器件
(a) Y branch waveguide device in Si-Ti system

(b) PI 聚合物光波导器件
(b) PI polymer waveguide device

图 10 激光微熔覆技术制备光波导器件

Fig. 10 Waveguide fabricated by laser micro cladding

5.4 制备传感器

利用激光微熔覆技术还可以制备厚膜传感器件, 如微加热器、微温度传感器和气敏传感器等。图 11 是封装后的气敏传感器, 基板选用 $5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 0.6\ \text{mm}$ 的 96% 氧化铝陶瓷基板, 正面是气敏膜及叉指电极, 背面是微加热器和温度传感

器。激光微熔覆制得的气敏传感器性能与传统烧结工艺制得的传感器相当。

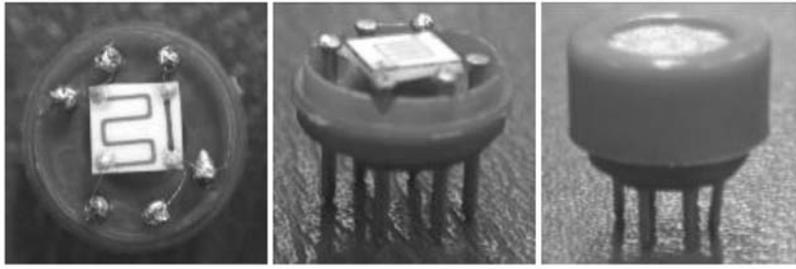


图 11 封装后的气敏传感器

Fig. 11 Gas sensor after package

5.5 制备生物芯片

图 12 是利用激光微熔覆技术集成制造的多电极阵列 (MEA), 可用于细胞培养时选区刺激细胞生长。

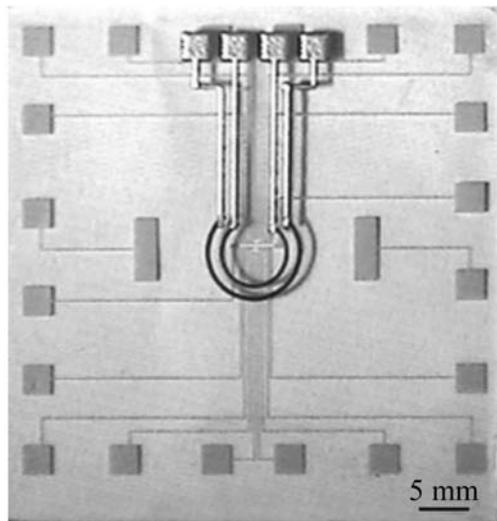


图 12 激光微熔覆技术制备多电极阵列

Fig. 12 MEA prepared by laser micro cladding

5.6 制备微机电系统 (MEMS) 微结构

图 13 是以聚酰亚胺为牺牲层, 商业金导体浆料为结构层制造的悬空微桥结构, 桥长约 200 μm , 桥高 5 ~ 10 μm 。

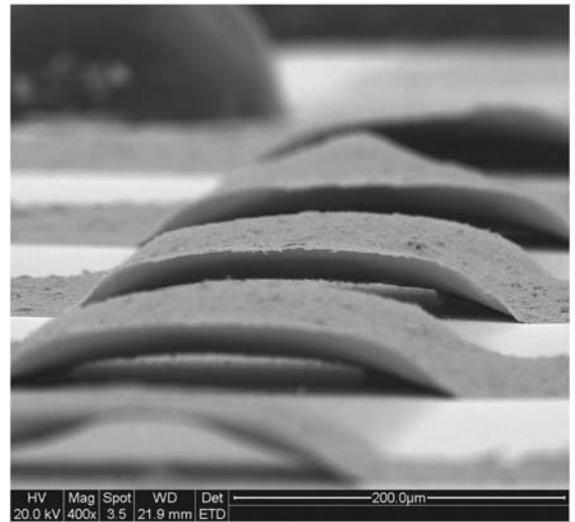


图 13 微桥阵列

Fig. 13 Micro-bridge array

6 结束语

作为一项新兴的激光直写制造技术, 激光微熔覆技术有望在混合集成电路基板制造、微型传感器和加热器的集成制造、平面无源电子器件 (电感、电容、电阻) 和分立无源电子器件的制造、生物芯片、电子封装、低损耗条形光波导的高精度、高质量制造等领域中发挥不可替代的作用, 并成为小批量厚膜制造中的主流技术之一。该技术将带动我国电子制造业装备水平的提高, 并产生巨大的直接经济效益。

参考文献:

- [1] 张立鼎. 先进电子制造技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
ZHANG D. Advanced Electron Technique of Manufacture [M]. Beijing: Defence Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 刘敬伟, 曾晓雁. 激光直写技术的现状和展望 [J]. 激光杂志, 2001, 22(6): 15-18.
LIU J W, ZENG X Y. Status and prospect of laser direct writing [J]. *Laser J.*, 2001, 22(6): 15-18. (in Chinese)
- [3] HON K K B, LI L, HUTCHINGS I M. Direct writing technology-advances and developments [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technol.*, 2008, 57(2): 601-620.
- [4] VENUVINOD P K, MA W Y. *Rapid Prototyping: Laser-Based and Other Technologies* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [5] DANFORTH S C, DIMOS D, PRINZ F. Materials development for direct-write technologies [C]. In Materials Research Society Spring 2000 Meeting, Proceedings of Symposium V, San Francisco, 23-27, April, 2000.
- [6] ROHMUND F, MORJAN R E, LEDOUX G, et al. Carbon nanotube films grown by laser-assisted chemical vapor deposition [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, 20: 802-804.

- [7] KWOK K, CHIU W K S. Growth of carbon nanotubes by open-air laser-induced chemical vapor deposition[J]. *Carbon*, 2005, 43: 437-439.
- [8] WEE L M, LI L. Multiple-layer laser direct writing metal deposition in electrolyte solution[J]. *App. Surf. Sci.*, 2005, 247: 285-293.
- [9] SHACHAM Y, DUBIN V, ANGYAL M. Electroless copper deposition for ULSI[J]. *Thin Solid Films*, 1995, 262: 93-103.
- [10] CHRISEY D B, PIQUE A, GERALD J F. New approach to laser direct writing active and passive mesoscopic circuit elements[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2000, 154-155: 593-600.
- [11] ZENG X Y, LI X Y, LIU J W, *et al.*. Direct fabrication of electric components on insulated boards by laser micro cladding electronic pastes[J]. *IEEE Transactions on advanced packaging*, 2006, 29(2) : 291-293.
- [12] LI X Y, LI H L, CHEN Y Q, *et al.*. Silver conductor fabrication by laser direct writing on Al_2O_3 substrate[J]. *Appl. Phys. A*, 2004, 79(8) : 1861-1863.
- [13] CAI Z X, LI X Y, HU Q W, *et al.*. Fabrication of microheater by laser micro cladding electronic paste[J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2009, 157(1) : 15-19.
- [14] CAI Z X, LI X Y, HU Q W, *et al.*. Laser sintering of thick-film PTC thermistor paste deposited by micro-pen direct writing[J]. *Microelectronics Eng.*, 2009, 86(1) : 10-15.
- [15] CAI Z X, LI X Y, ZENG X Y. Direct fabrication of SnO_2 -based thick film gas sensor using micropen direct writing and laser micro cladding[J]. *Sensor Actuator B Chem*, 2009, 137(1) : 340-344.
- [16] LI X Y, LI H L, LIU J W, *et al.*. Conductive line preparation on resin surfaces by laser micro-cladding conductive pastes [J]. *Appl. Surface Sci.*, 2004, 233(1-4) : 51-57.
- [17] LI X Y, ZENG X Y. Parameters and quality control by pulsed Nd: YAG laser cutting[C]. ICALEO 2003, the 22nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics, Jacksonville, Florida, 13-16 Oct, 2003.
- [18] LI H L, ZENG X Y, LI H F, *et al.*. Research on film thickness of micro-fine conductive line from the laser cladding and flexibly direct writing technique[J]. *Chinese Opt. Lett.*, 2004, 2(11) : 654-657.
- [19] 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.
LI H L, ZENG X Y, LI X Y. Direct fabrication of resistor on glass board by laser micro-fine cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, 32(2) : 281-286. (in Chinese)
- [20] 李慧玲, 曾晓雁, 李祥友, 等. 激光微细熔覆柔性直写厚膜导带组织性能的研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(7) : 1001-1005.
LI H L, ZENG X Y, LI X Y, *et al.*. Research on structure property of thick-film conductive lines fabricated by laser micro-fine cladding and flexibly direct writing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, 32(7) : 1001-1005. (in Chinese)
- [21] 李慧玲, 曾晓雁. 搭接量对激光微细熔覆柔性直写厚膜电阻组织性能的影响[J]. *中国激光*, 2005, 32(11) : 1554-1560.
LI H L, ZENG X Y. Effect of overlapped spaces on structure property of thick-film resistors flexibly and directly fabricated by laser micro-cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, 32(11) : 1554-1560. (in Chinese)
- [22] CAO Y, LI X Y, ZENG X Y. Frequency characteristics of the MIM thick film capacitors fabricated by laser micro-cladding electronic pastes[J]. *Mat. Sci. Eng. B-SOLID*, 2008, 150(3) : 157-162.
- [23] 王少飞, 曹宇, 王小宝, 等. 激光微细熔覆快速制造微加热器阵列[J]. *中国激光*, 2007, 34(11) : 1567-1570.
WANG SH F, CAO Y, WANG X B, *et al.*. Microheater array fabrication by laser micro-cladding method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(11) : 1567-1570. (in Chinese)
- [24] 李祥友, 蔡志祥, 曹宇, 等. 基于微细笔和激光微熔覆的设备研制[J]. *应用激光*, 2007, 27(2) : 81-84.
LI X Y, CAI ZH X, CAI Y, *et al.*. Equipment manufacture based on laser micro-cladding & micropen[J]. *Appl. Laser*, 2007, 27(2) : 81-84. (in Chinese)
- [25] MEUNIER M, IZQUIERDO R, DESJARDINS P, *et al.*. Laser direct writing of tungsten from WF6[J]. *Thin Solid Films*, 1992, 218(1-2) : 137-143.
- [26] MOILANEN H, REMES J, LEPPAVUORI S, *et al.*. Low resistivity LCVD direct write Cu conductor lines for IC customi-

- zation[J] . *Phys. Scripta T*, 1997, T69: 237-241.
- [27] TERRILL R E, CHURCH K H, MOON M. Laser chemical vapor deposition for microelectronics production[C] . IEEE Aerospace Applications Conference Proceedings, 1998, 1: 377-382.
- [28] POPOV C, IVANOV B, SHANOV V. Laser-induced chemical vapor deposition of aluminum from trimethylamine alane [J] . *J. Appl. Phys.*, 1994, 75(7) : 3687-3689.
- [29] LEHMANN O, STUKE M. Laser-driven movement of three-dimensional microstructures generated by laser rapid prototyping[J] . *Science*, 1995, 270(5242) : 1644-1646.
- [30] LEHMANN O, STUKE M. Three-dimensional laser direct writing of electrically conducting and isolating microstructures [J] . *Mater. Lett.*, 1994, 21(2) : 131-136.
- [31] Von GUTFELD R J, TYNAN E E, MELCHER R L, *et al.* . Laser enhanced electroplating and maskless pattern generation [J] . *Appl. Phys. Lett.*, 1979, 35(9) : 651-653.
- [32] KRIPESH V, GUST W, BHATNAGAR S K, *et al.* Effect of Nd: YAG laser micromachining on gold conductor printed over ceramic substrates[J] . *Mater. Lett.*, 2000, 44(6) : 347-351.
- [33] CHEN Q J, IMEN K, ALLEN S D. Laser enhanced electroless plating of micron-scale copper wires[J] . *J. Electrochem. Society*, 2000, 147(4) : 1418-1422.
- [34] KORD S K, N NAI L, GALB C S G, *et al.* . Reaction dynamics of CW Ar⁺ laser induced copper direct writing from liquid electrolyte on polyimide substrates[J] . *Appl. Surface Sci.*, 2000, 158(1) : 127-133.
- [35] KORD S K, BALI K, LEPP VUORI S, *et al.* . Laser direct writing of copper on polyimide surfaces from solution[J] . *Appl. Surface Sci.*, 2000, 154-155: 399-404.
- [36] SZ R NYI T, GERETOVSZKY Z, T TH J, *et al.* . Laser direct writing of tin oxide patterns[J] . *Vacuum*, 1998, 50(3-4) : 327-329.
- [37] TOFTMANN B, PAPANTONAKIS M R, AUYEUNG R C Y, *et al.* . UV and RIR matrix assisted pulsed laser deposition of organic MEH-PPV films[J] . *Thin Solid Films*, 2004, 453-454: 177-181.
- [38] CHRISEY D B, PIQUE A, MODI R, *et al.* . Direct writing of conformal mesoscopic electronic devices by MAPLE DW [J] . *Appl. Surface Sci.*, 2000, 168(1-4) : 345-352.
- [39] SANO T, YAMADA H, NAKAYAMA T, *et al.* . Laser induced rear ablation of metal thin films[J] . *SPIE*, 2002, 4426: 70-73.

作者简介: 蔡志祥(1980—),男,江苏盐城人,讲师,主要从事激光微纳制造技术方面的研究。E-mail: caizhix@gmail.com