

塑料壳体上三维电路制造技术现状分析与应用

李洋, 刘斌

(华南理工大学聚合物成型加工工程教育部重点实验室, 聚合物新型成型装备国家工程研究中心, 广州 510640)

摘要:介绍了三维电路制造技术的工艺流程和分类,并结合激光诱导金属沉积工艺对激光直接成型技术作了详细阐述。列举了应用于三维电路制造的原料,特别是用于激光直接成型技术的原料。最后对三维电路制造技术的发展趋势进行了展望。

关键词:三维电路;激光直接成型;有机金属复合物;激光诱导金属沉积;化学镀

中图分类号: TN41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)07-0100-05

Analysis and Application of Manufacturing Technology of Three-dimensional Circuit on Plastic Shell

Li Yang, Liu Bin

(The Key Laboratory of Polymer Processing Engineering of Ministry of Education, National Engineering Research Center of Novel Equipment for Polymer Processing, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The manufacturing technology and classification of three-dimensional circuit were introduced, especially for the laser direct structuring(LDS), which was one kind of the manufacturing technology of three-dimensional circuit, and combined it with laser-induced metal deposition. Then the materials of three-dimensional circuit were introduced, especially for the materials of LDS. Finally the development trends of the manufacturing technology of three-dimensional circuit were prospected.

Keywords: three-dimensional circuit; laser direct structuring; organometallic complex; laser-induced metal deposition; electroless plating

三维电路又称为立体电路,是指通过在注射成型塑料壳体的表面采用一定处理方法,制作出所需的图形导线,然后通过电子元器件的组装,把普通印刷电路板的电气互连、支撑和塑料壳体的防护等功能集于一个器件上,形成三维的电路载体,也就是三维模塑互连器件(3D-MID)。三维电路技术出现在20世纪80年代,但是在近几年才得到快速发展,因其设计的自由度大、能实现的功能多、可减少安装层次和装配的数量,目前已经在汽车、计算机、通讯等领域得到应用,特别是采用激光直接成型技术,制造过程大为简单,市场需求正以20%的速度增长^[1-3]。

1 三维电路制造技术

1.1 三维电路制造技术的工艺流程

一般说来,三维电路制造技术的生产工艺流程有两部分^[4],第一部分是成型载体和生产线路,第二部分是將所需的电子器件通过相应的方法组装在载体上。其中成型载体和生产线路是该技术的关键部分,包含注射成型塑料基体、塑料基体表面金属化、线路生成几个步骤。

1.2 三维电路制造技术的分类

按生产线路方法的不同,可将三维电路制造技术分为五类^[4]:(1)二次注射法;(2)热压印法;(3)激光刻蚀法;(4)

注射复合法;(5)照相法。

(1) 二次注射法。

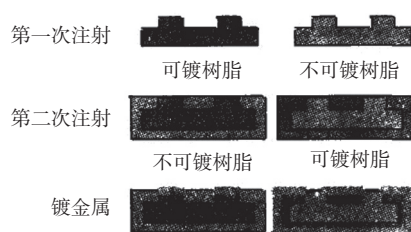
二次注射法也称二组分注射法,它是将两种不同性能的塑料注射成一个制品,其中一种塑料在适当处理后便可以进行金属化,通过设计模具的形状便可得到相对应的电路。该方法空间设计自由度大,生产自动化,制造流程短,产量大,但由于采用二次注射,设备投资较大,且线路图设计柔性较小。二次注射法中最常用的为活化树脂法和表面催化活化法,其工艺过程如图1所示。

(2) 热压印法。

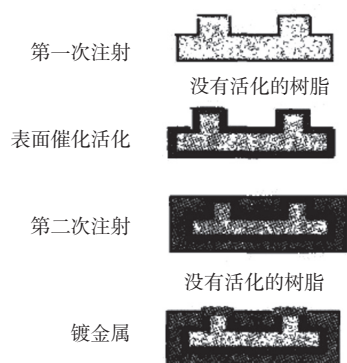
热压印法的工艺过程如图2所示^[5],它是设计相应的加热凸模,热压印铺设在塑料基体上的金属箔形成电路图案,最后除去多余的金属箔。该方法因为金属箔成型性能和压机行程方式的局限,仅适于生产较为简单的三维线路,但它具有加工周期短、设备成本低、基体材料选择性广,多余金属箔易收回等优点。将来的发展包括将线宽从200 μm降到100 μm、增加金属箔的品种等^[6]。

联系人:刘斌,博士,教授,主要研究方向为模具CAD/CAE/CAM和材料成型装备及数控技术

收稿日期:2013-04-16



(a)



(b)

a—活化树脂法;b—表面催化活化法

图1 二次注射工艺中的两种不同方法

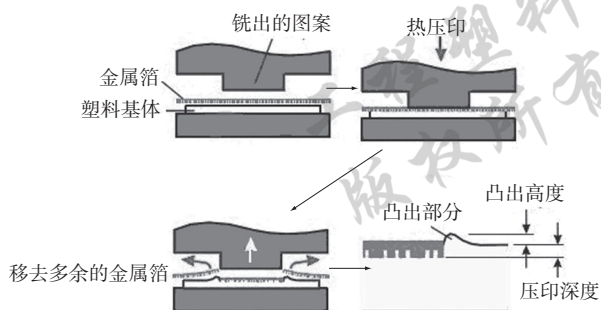


图2 热压印法的工艺过程示意图

(3) 激光刻蚀法。

激光刻蚀法工艺过程如图3所示,它是在经活化处理的制品表面镀上一层一定厚度的铜,再在其表面涂一层防蚀剂,用激光按预定的线路刻蚀制品表面除去防蚀剂,再腐蚀铜,经激光刻蚀的地方由于没有防蚀剂,表面的铜被腐蚀掉,再经相关的表面处理后即可形成线路。该方法线路图设计的柔性大,易于生产小批量产品和线路复杂的产品,而且其可设计非常精细的线路,线路的最小宽度可达 $50\ \mu\text{m}$ 。

(4) 注射复合法。

注射复合法工艺过程如图4所示,它是预先生产带有电路图案的塑料薄膜或片材,然后将其放入模具中适当地方,经合模注射完成了复合步骤,脱模后再镀金属,最后经后处理即可得到产品。它是一种先设计线路、后成型的方法,片材的金属化可采用镀膜的方法或印刷底漆的方法实现。另

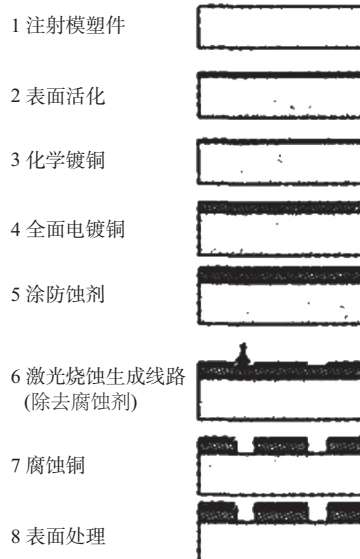


图3 激光刻蚀法的工艺过程示意图

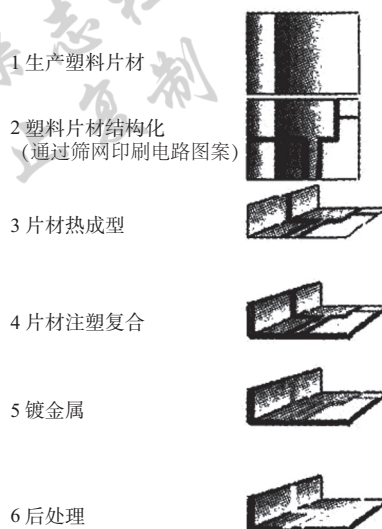


图4 注射复合法工艺过程示意图

外它还能生产一些大型的集成零部件,但是因为加工方法的原因,不能生产结构复杂的三维电路产品。

(5) 照相法。

照相法的基本原理与生产传统的线路板的原理相似,它是在经活化处理的基体表面化学镀铜后,再涂覆光敏抗蚀剂,采用与基体相匹配的掩膜进行曝光、显影和腐蚀,最后得到产品。由于掩膜和曝光系统都要随产品的形状尺寸变化,所以该方法的设计柔性很小,它能够生产线路结构很复杂的产品,但是生产不出三维结构很复杂的三维电路产品。

上述5种生产方法的比较如表1所示。

2 激光直接成型技术

激光直接成型(LDS)技术是近年来德国LPKF公司采用的、用于制造三维电路的一门新兴技术。它采用添加了某

表1 三维电路制造技术生产方法的比较

项目	二次注射法	激光刻蚀法	热压印法	注射复合法	照相法
三维设计自由度	好	中	差	差	中
可用的塑料	中/少	中	多	中	中
层状结构的柔性	好	好	中	好	好
最小线宽/ μm	250	50	200	100	125
线路图变化适应性	差	好	中	中	中
表面装饰适应性	中	中	中	好	中
电磁电容屏蔽性	好	好	差	差	好
投资	大	中	小	中	中

种非导电性有机金属复合物的塑胶原料作基体,直接用激光照射塑料件表面,被照射过的地方就会释放出金属原子,可作为后续化学镀的活性种。它突破了传统 MID 技术的一些限制,其产品在电气性能、结构和抗氧化性能方面有突出的优点^[2-3]。

2.1 LDS 技术的原理

在 LDS 技术中,激光扫描制品基体表面,是激光与金属化聚合物的一种相互作用,从而诱导金属沉积^[7]。激光与聚合物相互作用时,由于激光参数以及聚合物材料性质的不同,可导致材料发生各种变化,如消融、分子结构重组、单体聚合、表面粗糙度、附着力和导电性等变化。一般认为,只有激光能量被聚合物吸收时,才会引起后续反应。

激光的能量被聚合物吸收后,它们之间会发生相互作用,而这种相互作用存在光热和光解两种不同的机理。若是光热机理,聚合物在吸收激光能量后,表面温度会快速升高,有时这些热能只是活化材料表面的分子,有时这些热能能熔化材料表面甚至汽化表面的部分物质,有时还能够引起一定的化学反应。若是光解机理,分子在吸收光子后从基态跃迁到激发态,从而发生断链、交联和自由基形成等变化。激光与聚合物相互作用中到底是哪种机理目前还存在争论,对于光致导电机理,目前倾向于热效应的影响显著^[7]。

2.2 LDS 技术的工艺步骤

用 LDS 技术制造 MID 的工艺是一种完全加成法的工艺,包括三个步骤^[2]:

(1) 基体注射成型。用含有某种非导电性的有机金属复合物塑料为原料,采用通用的注射工艺成型制品基体。

(2) 激光加工。激光按预定的加工路线扫描制品基体表面,使预设的电路图形出现在制品表面。

(3) 电路图案的金属化。将激光照射过的制品放入化学镀液中,被激光辐照过的位置将暴露出金属原子,在化学镀时,能镀上金属铜,没有被激光辐照的位置化学镀时没有变化。如果对铜层厚度有要求,则可以用电镀法对其进行加厚,如果对涂覆层有其它方面的要求,还可以依要求在上面镀上镍、金等,直到满足各种对涂覆层的要求。

图 5 描述了一个采用 LDS 技术制造三维电路产品的全过程^[8]。

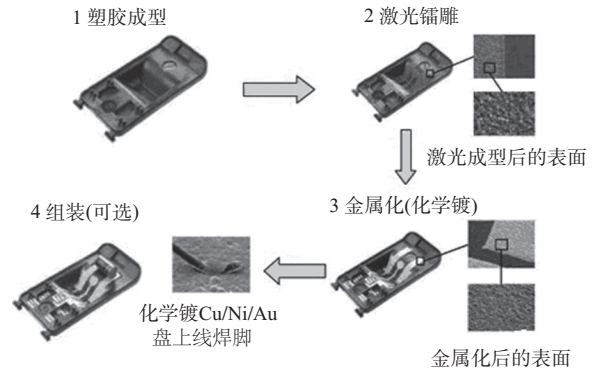


图 5 一个采用 LDS 技术制造三维电路产品的全过程

另外, LPKF 公司还新开发了一种漆 ProtoPaint LDS, 能使普通塑料兼容 LDS 工艺。它是一种双组分漆, 包括底漆和固化剂, 可以用激光来活化。配合三维快速成型工艺, LPKF ProtoPaint 可显著加快三维电路的制造过程。该工艺过程为^[9]:

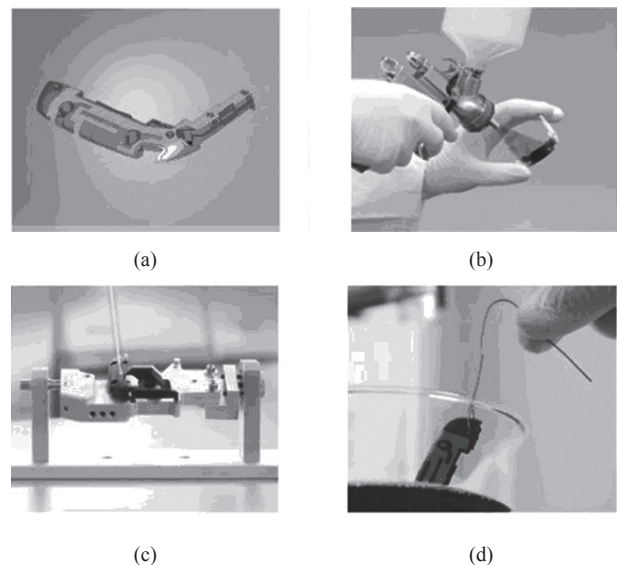
(1) 基体成型。快速、先进的 3D 打印技术可以通过三维 CAD 数据采用光固化 (SLA)、激光熔融 (SLS)、熔融沉积成型 (FDM) 等方法直接成型塑料基体, 不需要任何模具。

(2) 涂覆 LDS 漆。在基体表面涂覆 LPKF ProtoPaint 漆并烘干。

(3) 激光活化。用 LPKF Fusion3D 1000 照射基体表面, 在几秒钟内, 激光即可把所设计的线路图形加工到涂漆的塑料基体表面。

(4) 金属化。化学镀金属化是 LDS 工艺的最后一步。

图 6 为该技术的工艺过程。



a—基体成型; b—涂覆 ProtoPaint LDS 漆; c—激光活化; d—金属化

图 6 LPKF 公司采用 ProtoPaint 漆制造三维电路的工艺过程

2.3 LDS 制造设备

德国 LPKF 公司开发出了 LDS 三维激光成型设备,图 7^[10] 为该公司的产品之一,它是一个五轴的设备,包括水平方向的 X、Y 轴,其移动范围是 200 mm×200 mm,定位精度在 ±4 μm 之间;竖直方向的 Z 轴,其移动范围是 300 mm,定位精度在 ±3 μm 之间;一个可在 ±90° 范围之间旋转的立旋轴;一个可在 360° 范围类水平旋转的轴,这样就可以在塑料基体的多个表面上成型三维线路^[11]。除此之外,LPKF 公司还有 Fusion3D 6000, Fusion3D 1500 和 Fusion3D 1000 等型号的 LDS 设备。

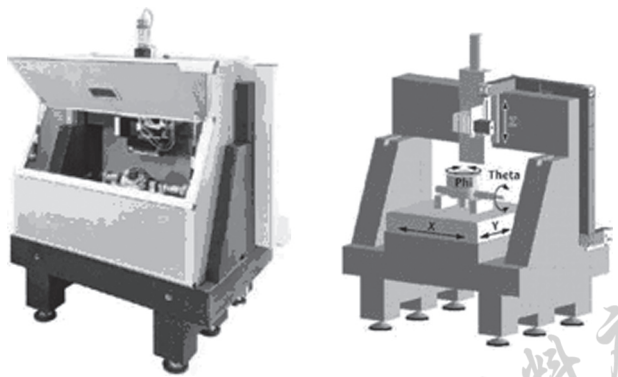


图 7 LPKF 公司的 LDS 三维激光成型设备

3 三维电路的原料

3.1 三维电路的基体材料

作为三维电路的基体材料,需要满足许多条件,如可模塑性、可镀性、阻燃性、可金属化性和低成本等,其中最重要的是金属在基体材料上的可镀性,基体材料对冷热温度变化的适应性以及基体材料的热变形温度^[4]。热塑性的耐高温塑料和工程塑料是现在比较流行的三维电路的基体材料,如聚酰胺(PA)、聚苯硫醚(PPS)等,但在这两类材料中,人们更倾向于工程塑料,这是因为耐高温塑料比较贵。在很多情况下,基体材料会用到组合材料,这时就应注意组合材料之间的相容性,除此之外,塑料的可镀性和它对金属的粘附力也是必须考虑的。表 2 为不同的三维电路技术所适用的基体材料。

表 2 不同三维电路技术所适用的基体材料

方法	塑料及组合
二次注射法 ¹⁾	ABS+PC, (PC / ABS)+PC, PA6+PA12, PA6+PBT, PA66+PA6 / 6T
热压印法	ABS, PC / ABS, PS, PP, PC, PA6, PA66, PA6 / 6T, PBT, POM, PESU, PEI
激光蚀刻法	ABS, PP, PC / ABS, PC, PA, PBT, PET, PEI, LCP, PI
照相法	PC / ABS, PET, PPA, PET
注射复合法	ABS, PC, PBT, PSU, PEI, PPS

注: 1) 塑料及组合表示为 A+B 形式,其中前面的 A 料可以金属化,后面的 B 料不能金属化。

3.2 用于 LDS 的塑胶原料

在 LDS 技术中,材料与激光的匹配很重要。把金属有机复合物和一些添加剂加入塑料是 LDS 技术制作三维电路产品的基础,目前常用材料有 LPKF 公司的 PP MID, PBT MID 和 PA6 / 6T MID。PBT 塑料电性能优良,因而 PBT MID 塑料应用得很广,而 PA6 / 6T MID 能耐 260℃ 的回流焊高温,因此在需用回流焊装配的领域应用得很广^[1]。

其它公司也开发了一些用于 LDS 的激光塑胶原料^[12],如表 3 所示。

表 3 用于 LDS 的激光塑胶原料

公司名	产品及牌号
德国朗盛集团公司	PBT, 牌号 Pocan Dp7102000000
	PET / PBT, 牌号 Pocan Dp7140LDS000000
德国巴斯夫公司	PA / 6T, 牌号 T 4381
	PBT, 牌号 4300
宝理塑料株式会社	LCP, 牌号 8201
德固赛公司	PBT, 牌号 VESTODUR RS1633
DSM 公司	PC / ABS, 牌号 Xantar LDS 3710
	PA6 / 6, 牌号 299x113399H
RTP 公司	PC, 牌号 399X113385B
	ABS, 牌号 699X113386B
	PC / ABS, 牌号 2599X113384C
	LCP, 牌号 3499-3X113393A, 3499-3X113393C
	PPA, 牌号 4099X117359D

(1) 用于 LDS 塑胶原料中的有机金属复合物。

用于 LDS 塑胶原料中的有机金属复合物应满足以下条件: ①能在基体中均匀分布; ②激光辐照后能分解出金属原子; ③不导电; ④在可见光下稳定; ⑤能耐高温; ⑥无毒或低毒; ⑦便宜。大多数情况下,有机金属化合物是二价钡离子或二价铜离子,因钡较贵,所以现在用的较多的是铜的有机金属化合物,有改性草酸二铜络合物如改性草酸 [(3- 乙炔) 铜 (I)] 和改性草酸二 [(降冰片烯) 铜 (I)],改性的无水甲酸铜等能受热裂解的有机金属复合物。应视塑胶原料熔融温度来选择改性有机金属复合物种类,改性有机金属复合物热解温度应高于载体母胶原料熔融温度 3 ~ 5℃ 以上^[10-12]。

(2) 用于 LDS 塑胶原料的制作及其特性。

将聚合物和相应的有机金属化合物及填充物混合,经高温熔融再冷却形成所需的改性塑料,再经粉碎后即可得到所需的粒料。许小曙等发明了一种用于 LDS 的激光塑胶原料^[12],其复合组分是: 在每 1 000 g 制成的激光塑胶原料中,添加表面活性剂 1 ~ 10 g、光吸收剂 0.1 ~ 5 g、降黏剂 0.5 ~ 30 g、无机功能填料 5 ~ 750 g、改性的有机金属复合物 30 ~ 50 g 和增容剂 5 ~ 200 g,其余为载体母胶。

3.3 用于 LDS 的表面膜材料

用于 LDS 的除了添加有机金属复合物的塑胶原料外,LPKF 公司还新开发了一种 LDS 级别的漆,LPKF ProtoPaint

LDS,使普通塑料兼容 LDS 工艺。它是一种双组分漆,由底漆和固化剂组成,该漆喷涂至器件表面产生与 LDS 塑料相同的特性。

此外,还有人研究了基于激光诱导金属沉积原理在非金属材料上制作精细电路。如:陈东升用 PVP/AgNO₃ 胶体,通过激光照射,在聚酰亚胺表面得到银粒子,经化学镀可得到铜线^[7];孙克等用 AuCl₃ 乙醇溶液在单晶 Si 上制得薄膜,经脉冲的 Nd:YAG 激光照射,在 Si 上制得 Au 线^[13];徐卫等^[14-16]用激光照射,利用甲酸铜薄膜沉积出了铜线。曾鑫等^[17-19]用乙酸钯薄膜,利用激光照射得到了钯线。J. G. Liu 等^[20]用 CO₂ 激光,从银化合物固体膜中得到了银线,经化学镀可得到铜线。

沉积层导线的电阻可用四探针测得^[17],其与基材的粘附性可用在超声波浴中清洗时间的长短来定性检测^[21],也可用胶带法来定性检测^[17,21-22],还能参照 GB/T5270-2005 进行测试^[22]。

作为 LDS 表面膜材料的金属有机复合物需满足:(1)可形成单相均一膜层;(2)溶液中金属离子含量高,足以分解产生连续镀层;(3)分解副产物可完全挥发,保证镀层杂质少、纯度高;(4)较低的解离温度,以免高温下基板被破坏;(5)膜层或基板在所用波长处有足够的光吸收,保证有足够的能量以激发热分解反应^[23]。

4 三维电路制造技术的发展趋势

随着新原料的制备、软件控制的人性化和激光设备的升级,以及产品设计、模具制造和加工工艺等方面合作的加强^[4],开发成本将减小,产品质量稳定性及电路的稳定性将会提高,布线更加容易,工艺环境更加友好,这将极大地促进该技术在汽车、传感器和通信行业的应用。在当今电子产品更小、结构更复杂、功能更多、要集成到更小空间内的情况下,三维电路制造技术及其产品将会得到更好的发展。

参考文献

- [1] 胡宏宇.集机电功能于一体的三维模塑互连器件(3D-MID)[C].2004 春季国际 PCB 技术/信息论坛论文集,2004:514-521.
Hu Hongyu.3D-MID, a device that combines the electrical and mechanical function in one component[C].Proceedings of Spring 2004 PCB Technology/Information Forum,2004:514-521.
- [2] 乐普科(天津)光电有限公司.印制电路信息,2007(3):72.
LPKF(Tianjin)Co. Ltd.Printed Circuit Information,2007(3):72.
- [3] 郁祖湛.电镀与精饰,2011,33(9):24-30.
Yu Zuzhan.Plating and Finishing,2011,33(9):24-30.
- [4] 钟世云,等.工程塑料应用,2002,30(11):17-21.
Zhong Shiyun, et al.Engineering Plastics Application,2002,30(11):17-21.
- [5] Zhuo Yong, et al.A electromechanical parts library for 3D-MID design[C].2010 IEEE 11th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design,2010:17-21.
- [6] Brocka, Zaneta, Ehrenstein, Gottfried W.Application of irradiation cross-linking for the improvement of the short-time thermomechanical properties of 3D-MID[C].Annual Technical Conference-ANTEC, Conference Proceedings,2004,2:1 657-1 661.
- [7] 陈东升.激光与聚合物的相互作用(Ⅲ)银选择性活化化学镀在聚酰亚胺薄膜上制作精细线路[D].上海:上海交通大学,2006.
Chen Dongsheng.Interaction between polymer and laser(Ⅲ) manufacture of fine circuit on polyimide film by selective electroless plating using silver as seeding[D].Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2006.
- [8] Ostendorf A, et al.3D-MID and process monitoring for micro-joining applications[C].Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering,2003:508-517.
- [9] <http://www.lpkf.cn/products/mid/protopaint.htm>.
- [10] Hüske M, et al.Laser Supported Activation and Additive Metallization of Thermoplastics for 3D-MIDs[C].Proceedings of the 3rd LANE 2001,2001.
- [11] 邢振发.印制电路信息,2003(2):37-39.
Xing Zhenfa.Printed Circuit Information,2003(2):37-39.
- [12] 湖南美纳科技有限公司.立体电路制造工艺及激光塑胶原料的复合组分、制造方法:中国,2009 10106506.X[P].2010-10-13.
HuNan Meina Technology Co. Ltd.The manufacturing process of three-dimensional circuit and the manufacturing methods, composite component of laser plastic materials:China, 200910106506.X[P].2010-10-13.
- [13] 孙克,等.应用激光,2002,22(1):15-18.
Sun Ke, et al.Applied Laser,2002,22(1):15-18.
- [14] 徐卫,等.陶瓷上激光诱导固相沉积铜的研究[C].'99 第六届海峽两岸表面精饰联谊会论文集,1999:200-201.
Xu Wei, et al.The research of laser-induced solid-phase deposition of copper on ceramics[C].The Association Proceedings of '99 Sixth Cross-Strait Surface Finishing,1999:200-201.
- [15] Müller H G.Applied Physics Letters,1990,56(10):904-906.
- [16] Gupta A, et al.Applied Physics Letters,1987,51(26):2 254-2 256.
- [17] 曾鑫,等.应用化学,1994,11(5):18-21.
Zeng Xin, et al.Applied Chemistry,1994,11(5):18-21.
- [18] Gross M E, et al.Applied Physics,1987,61(4):1 628-1 632.
- [19] Esrom H, et al.Applied Surface Science,1990,46(1-4):158-162.
- [20] Liu J G, et al.Applied Surface Science,2005,245(1-4):155-161.
- [21] Wang X C, et al.Applied Surface Science,2002,200(1-4):165-171.
- [22] 翁星星,等.电镀与涂饰,2011,30(4):23-26.
Weng Xingxing, et al.Electroplating & Finishing,2011,30(4):23-26.
- [23] 王建,等.电镀与精饰,1999,21(2):1-6.
Wang Jian, et al.Plating & Finishing,1999,21(2):1-6.