

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2014.04.007

纳米铜导电油墨的制备及其应用

钱俊, 苏亚兰, 周奕华, 万云蕾

(武汉大学 印刷与包装系, 湖北 武汉 430079)

摘要: 综述了纳米铜粒子的制备方法, 即机械球磨法、辐射合成法、物理气相沉积法等物理制备法及化学制备法, 探讨了改进纳米铜导电油墨防氧化、低温烧结、导电性能等关键问题, 以及纳米铜导电油墨在印刷RFID电子标签、薄膜开关、触摸屏等方面的应用, 并提出纳米铜导电油墨未来的研究方向为: 抗氧化、低温烧结、多种印刷方式及产品应用等研究。

关键词: 纳米铜; 导电油墨; 防氧化; 低温烧结; 导电性能

中图分类号: TS802.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2014)04-0039-05

Preparation and Application Research of Nano-Copper Conductive Ink

Qian Jun, Su Yalan, Zhou Yihua, Wan Yunlei

(School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The preparation methods of Cu nanoparticles are reviewed, which include mechanical ball milling method, radiation synthesis, physical vapor deposition and chemical method. The key issues of anti-oxidation, low temperature sintering and conductivity improvement of nano-copper conductive ink are discussed. The applications of Cu ink in RFID tags, membrane switches and touch screens are concluded. The research direction of nano-copper conductive ink is put forward as that of anti-oxidation, low temperature sintering, a variety of printing methods and product applications.

Key words: nano-copper; conductive ink; anti-oxidation; low temperature sintering; conductivity

0 引言

电子墨水是一种信息显示的方法和技术。根据 Nano Markets 的报告, 用于生产印刷电子产品的电子墨水及其相关基材的消费额在 2015 年将达到 110 亿美元, 而电子墨水中使用量最大的为导电墨水^[1]。印刷电子领域主要使用的材料为无机、有机和金属材料。无机材料印刷适性较差, 难以得到致密的导电涂层, 发展相对落后; 有机材料虽然在光电器件领域已得到广泛应用, 但是其电荷迁移率比其他两种材料低, 使用寿命较低, 限制了其发展; 金属材料

发展相对成熟, 具有许多优良的特性, 如粒子尺寸小, 烧结温度低, 且可以较易制成油墨, 近年来被广泛应用于印刷电子领域。选择金属材料时, 主要需考虑体积电阻率、价格和可操作性等因素^[2]。理想的金属导电油墨应具有价格便宜, 易于制取、保存和喷墨, 以及经沉积和后处理后仍具有高导电率的特性。对于金、银、铜这 3 种常见金属材料, 银的体积电阻率最低, 仅为 $1.59 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, 铜次之, 为 $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, 金最大, 达 $2.44 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$; 但在价格方面, 铜的价格远低于银与金, 银的价格为

收稿日期: 2014-05-12

作者简介: 钱俊 (1971-), 男, 湖北孝感人, 武汉大学教授, 主要从事印刷电子及包装材料方面的教学与研究,

E-mail: qianjungreat@whu.edu.com

通信作者: 苏亚兰 (1989-), 女, 湖北荆门人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为包装新技术, E-mail: sylunny@whu.edu.cn

5~7元人民币/g,金则高达300~400元人民币/g,而铜仅为0.05~0.07元人民币/g,将金与银两种金属用于替代普通的电子线路显然不经济,相比之下,铜的价格则可满足大面积印刷的成本要求^[3];同时,利用纳米铜导电墨水制得的导电路径的抗电子迁移能力比用银制得的要强。因此,综合考虑价格和导电性能等因素,在金、银、铜这3种常见金属材料中,铜是最有潜力得到普及应用的金属导电油墨。

纳米铜具有纳米尺度材料所具有的表面效应、尺寸效应和隧道效应等特殊效应,故能表现出独特的化学性质和光、电、磁、力等性质。作为重要的工业原料,纳米铜在光电功能、信息存储和智能包装等方面得到了广泛应用,引起了国内外的广泛关注。近年来,国内外关于纳米金属电墨水的研究较多,但是申请的专利技术等大多还是集中在银基导电墨水上,铜基导电墨水的研究较少。本文主要就纳米铜的制备方法、改进纳米铜导电油墨的关键问题,以及纳米铜导电油墨的应用进行研究。

1 纳米铜的制备方法

纳米铜粉的制备方法很多,按反应性质可分为物理法和化学法两类。物理制备方法需要昂贵的设备,合格率也较低,总体成本较高;化学法的实验设备和原料成本相对较低,制备工艺也较简单,更易实现工业化生产。

纳米铜颗粒用作导电墨水需要合适的粒径。如果颗粒过大,则会因为密度过大而加剧沉降,获得的分散液稳定性能较差;如果粒径过小,则会导致比表面积过大而加速氧化,或者被有机物过度包覆而影响最终导电路径的导电性能。一般认为,用作导电墨水的纳米铜颗粒最佳平均粒径在80 nm左右^[4]。

1.1 物理制备方法

机械球磨法 机械球磨法是纯金属单质由大晶粒变为小晶粒的物理粉碎过程。这种方法操作简便,但产品粒度分布不均匀,产品纯度较低。刘维平^[5]采用机械球磨法,通过正交实验,对微米级铜粉进行研磨,研究了研磨时间、研磨介质和原料的质量比对生成铜粉质量的影响,得出机械球磨制备超细铜粉的粒径方程式为 $y=46.705x^{0.290^2}$,其中: y 为粒径累计质量分数,%; x 为粒径, μm 。

辐射合成法 用辐射合成法制备纳米粒子一般采用 γ 射线辐照较大浓度的金属盐溶液,其产物处于离散胶体状态,故纳米粒子的收集较困难。为此,研究者们通过将其与反相微乳液法、水热结晶法等结

合起来进行制备^[6]。目前,国内对这种方法的研究才刚刚起步。陈祖耀等^[7]首次采用 γ 射线辐射-水热合成法,制备出铜、银和铜-银合金纳米粉末,纳米铜粒径分布比较均匀,平均粒径约为50 nm。

物理气相沉积法 物理气相沉积法是将铜粉原料放在坩埚中,搅拌,采用激光热源或电阻丝热源加热,使铜粉蒸发。铜粉在惰性气体中经过冷凝,可沉积在收集器上,所以收集器的性能与结构在很大程度上决定铜粉的产量和产率。Dorda^[8]采用混合等离子加热制备出的铜粉,平均粒径约为70 nm。

1.2 化学制备方法

化学制备方法是目前实验室和工业制备纳米铜最常用的一种方法,其一般以铜盐为前驱体,以水合肼、抗坏血酸和硼氢化钠等为还原剂,在液相中发生氧化还原反应,生成不同形貌和粒径的铜。Lisiecki等^[9]采用水合肼作为还原剂,用微乳液法制备了分散性能较好、平均粒径为50 nm的铜粉。Wang等^[10]采用 CuSO_4 为前驱体,以抗坏血酸为还原剂,以聚乙烯吡咯烷酮(polyvinylpyrrolidone, PVP)为分散剂,在乙二醇中反应,制备出平均粒径为 (100 ± 25) nm的纳米铜。Koroleva等^[11]用硼氢化钠还原硝酸铜,并用聚氧乙烯山梨醇酐单油酸酯作为表面活性剂,制得粒径为25~35 nm的球形纳米铜粒子。

2 改进纳米铜导电油墨的关键问题

目前,纳米银导电油墨的应用已比较成熟,而纳米铜导电油墨的研究还处于研发阶段,存在许多需要解决的问题。

2.1 抗氧化问题

纳米铜粉表面活性很高,在空气中特别容易氧化成氧化亚铜和氧化铜,如何防止其氧化,成为一个重要的研究课题。

目前,使用较多的防止纳米铜氧化的方法为包覆法,如使用PVP和短链羟基羧酸。PVP分子内含有极性的内酰胺基和非极性的亚甲基,是一种水溶性高分子聚合物^[12]。它可以通过氧原子和氮原子与纳米铜粒子表面的原子配位,形成比较紧密的吸附层,从而避免纳米铜颗粒直接接触空气。短链羟基羧酸可以和表面被氧化的纳米铜发生反应,生成有机羧酸铜盐,生成物以及多余的羟基羧酸包覆在其表面,可以防止纳米铜进一步被氧化,再经过焙烧,有机铜盐能被还原成铜,其中,羟基羧酸在焙烧的过程中也能抑制纳米铜的氧化^[13]。

Park等^[14]采用PVP包覆纳米铜,以防止其氧化

和团聚,并加入乙二醇和2-甲氧基乙醇等,制得纳米铜油墨,用于喷墨印刷。铜膜经325℃真空烧结1h,PVP完全分解,形成导电通路,电阻率为17.2 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 。Jeong等^[15]通过改变保护剂PVP的分子量,控制喷印铜膜上氧化层的厚度,进而探究氧化层厚度对导电性能的影响。当PVP分子量为4000时,氧化层最薄,此时,铜膜经275℃真空烧结1h,电阻率仅为11.6 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 。Kim等^[16]研究了烧结时还原气体对纳米铜烧结的影响。实验采用在氮气中压入甲醇、乙酸、甲酸、乙醇等还原气体的方式。结果表明,甲酸还原效果最好,还能促进油酸的分解,以降低所需烧结温度;而使用甲酸与乙醇混合气体时,铜膜形貌与导电性能较佳,铜膜经200℃真空烧结1h,电阻率仅为4 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 。Woo等^[17]研究了羧酸类还原性气体对铜膜烧结的影响。该研究将一元饱和羧酸与多元羧酸进行了实验对比,结果表明,短烃链羧酸较易解离,对氧化层的还原效果较好。在甲酸气体条件下,铜膜经200℃和250℃真空烧结,电阻率分别为3.4 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 和2.3 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$;而草酸更有效,还能缩短烧结时间。

2.2 低温烧结问题

高温烧结印刷油墨存在如下问题:一般用于印刷电子的基材玻璃化温度 T_g 在200℃以下,聚酰亚胺的 T_g 值为220℃,而粒径大于20nm的纳米铜熔点在300℃以上,有机基材完全不能经受高温烧结工艺^[18],而且存在烧结时间过长的缺点。因此,探索相应的低温固化技术是纳米铜导电油墨广泛应用必须解决的问题。

紫外光烧结是一种快速烧结工艺,其通过形成化学键来实现固化。在紫外光照射下,导电油墨中的光引发剂吸收紫外光的辐射能,受激发生成自由基,进而引发聚合、交链接枝,然后在短时间内固化成膜。需注意的是,紫外光的强度应足以穿透印刷导电油墨的底层,不然,只有表面得到烧结。

激光烧结是以激光为热源,使涂布在基板上的油墨层吸收热量以实现固化,进而形成导电线路。激光烧结存在线路表面比较粗糙的缺点。

2.3 导电性能问题

印刷电子行业的蓬勃发展势必要求导电油墨印刷后具有较好的导电性能,而纳米铜导电墨水印刷的线路电阻率比纯铜大1~2个数量级,这限制了其在印刷电子领域的应用,可以通过改善导电油墨的配方和优化工艺等方法来提高其导电性能。

通过改善导电油墨的配方,增加油墨中导电组分的含量(同时考虑节省成本),并控制导电组分中

树脂和溶剂的种类,可在一定程度上提高导电油墨的导电性能^[19]。纳米铜导电油墨的基本组成成分和一般的导电油墨相同,主要由导电填料(纳米铜粒子)、连接料、溶剂和助剂构成。用作连接料的树脂包括丙烯酸树脂、环氧树脂、聚酯等,在满足性能的前提下,一般选择电阻变化小、稳定性能好的连接料。溶剂运用在导电油墨中主要起调整黏度、溶解树脂和改善干燥速度的作用。如果溶剂对树脂的溶解性能差,会导致树脂在油墨固化过程中出现析出现象,阻碍导电通道的形成。同时,如果溶剂挥发过快,油墨在印刷过程中干得快,油墨层会出现透空现象,影响其导电性能;但若挥发太慢,溶剂难以完全挥发,同样会影响其导电性能,所以一般使用混合溶剂。导电油墨中添加的各种助剂(消泡剂、稀释剂等),主要起改善其印刷适性的作用。

纳米铜导电油墨的工艺可分为两种:

1)直接制备纳米铜墨水。这种工艺将纳米铜的合成与油墨配制过程衔接。纳米铜的合成方法可以采用化学还原法,溶液中加入PVP、油酸、乳酸、明胶等对生成的纳米铜进行有机包覆。合成过程中,采用边加热边搅拌的方式,得到一种胶体。胶体经电渗析除杂后,再经减压蒸馏,得到纳米铜墨水^[20]。这种工艺避免了常规的离心、清洗、干燥、再分散等系列过程,可以有效防止在获取纳米铜粉末与配置油墨过程中的氧化。制备的纳米铜胶体墨水经减压蒸馏,纳米铜质量分数可达30%,不易团聚、氧化与沉降,而且电渗析除杂比高速离心效果要好,除杂效果可达99%以上,有利于实现工业化批量生产,但是这种工艺对设备及实验条件要求较高。

2)纳米铜粉分散获得纳米铜油墨。这种工艺是将已经获得的纳米铜粉末超声分散于醇类溶剂中,加入有机物进行包覆,再加入连接料和添加剂等,得到一定固含量的纳米铜油墨。这种工艺操作简单,容易实现,但是纳米铜粉末在空气中极易氧化,这对原材料纳米铜的存储与分散过程极为不利,实验需要在真空箱等环境中进行。针对氧化层的去除,近年来,研究者们开始关注以甲酸为代表的羧酸类对铜膜烧结的影响。如以气态羧酸为烧结氛围,或者以羧酸取代PVP等加入油墨中^[21],这种方法兼顾纳米铜的抗氧化处理和低温烧结,优势较显著,但是其机理研究尚未成熟。

3 纳米铜导电油墨的应用

纳米铜导电油墨的应用领域主要集中在印刷电

路和显示产品两个方面,如智能标签包装、薄膜开关、触摸屏、柔性电池和薄膜晶体管等。

3.1 印刷 RFID 电子标签

射频识别(radio frequency identification, RFID)是一种非接触式的自动识别技术。目前,射频天线制造方法主要有蚀刻法、模切法和印刷导电油墨法。在 RFID 技术中,通过印刷导电油墨法固化的导电油墨功能天线,可用以接受无线信息^[22]。利用高速印刷法,可在一定程度上降低智能标签的成本,并减少传统蚀刻法所带来的材料浪费和大量废水的生成。

目前,RFID 已经在产品防伪、包装和物流等领域发挥着重要作用。如将 RFID 运用到泡罩包装上,可以自动记录病人将药品从包装中取出服用的时间。每个包装上的 RFID 与包装的标志可以逆向追溯,具有唯一性,从而可以准确掌控包装产品从生产到最终环节的所有过程。

3.2 薄膜开关

薄膜开关由印有导电路径的上下两层聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)薄膜和绝缘层叠加构成。具体运用时,按设计的接点和电路,采用丝印法,将纳米铜导电油墨印在 PET 薄膜上,再组合就完成了。这种薄膜开关比传统的机械式开关结构简单,使用寿命长(可达到 100 万次以上),且可运用到精密的设计中。目前,比较成熟的是导电银油墨印刷开关,但是银印线路容易发生迁移,而且价格较高,所以低成本的纳米铜导电油墨将会是更理想的选择。电脑键盘现在也多采用薄膜开关式,这种薄膜键盘较轻薄,但用纳米铜导电油墨制作的薄膜键盘应做好抗氧化处理,一般需在线路接触位置印刷一层碳油墨,以隔绝空气。

3.3 触摸屏

连接电子屏幕像素的薄膜主要由铟锡氧化物(indium tin oxide, ITO)制成,其对信息具有良好的传导性能,且透明程度较高。但铟是一种昂贵的稀土元素,同时 ITO 薄膜必须通过蒸汽沉积,且沉积过程十分缓慢。通过丝网印刷或喷墨打印金属导电油墨等方式,不需经过蚀刻等工艺,不仅可减少设备投资,而且保护环境。2010 年,美国杜克大学的化学家威利表示,有可能研制出能够覆盖在玻璃上的铜纳米线层,从而形成透明的导电薄膜。2011 年,他带领的研究团队研发出长而薄且不凝结分布的可转变成透明导电薄膜的纳米线,并覆盖于塑料或玻璃上。此薄膜与目前用于太阳能电池和电子设备上的薄膜具有相同的特性,但成本却显著降低。

4 结语

纳米铜的制备方法较多,化学法由于具合成简单、形貌可控和纯度较高等优点,是实际应用中最主要的方法,印刷方式多为旋涂、丝印和喷墨,其应用主要集中在 RFID 电子标签。目前,纳米铜导电油墨还处于研究阶段,主要为抗氧化与导电性能研究。未来,国内外关于纳米铜油墨的研究方向为:

1) 纳米铜油墨的抗氧化。以碳或石墨包覆纳米铜,防氧化效果不佳,且降低了导电性能;以 PVP、吐温-20 等包覆纳米铜,需要高温烧结,且防氧化不彻底。这些都只能在一定程度上降低氧化,不能完全抗氧化。因此,研究一种有自还原性的纳米铜导电油墨(如有机铜盐类导电油墨^[23])是抗氧化的重要解决对策。以羧酸铜盐油墨代替纳米铜油墨,羧酸铜盐热分解得到纳米铜,同时多余的羧酸又是有效的还原剂。但是这种方法形成的铜膜结构较稀疏,有待研究改进。

2) 纳米铜的低温烧结。这主要是为了实现基材(特别是有机柔性材料)的适应性。烧结方式的选择,如紫外烧结,虽然可以减小高温对基材的破坏,却不易控制。如何降低纳米铜所需烧结温度是其应用的研究重点。氧化层的存在是烧结温度高的一大影响因素,有机残余的去除也和烧结温度有关。因此,低温烧结可以从这两点着手。

3) 多种印刷方式。国外喷墨印刷研究较多,而国内相关研究较少。胶印是国内使用较广泛的印刷方式,其作为印刷电子的印刷方式颇具潜力。因此,制备适用于喷墨连供系统和胶印的纳米铜油墨,具有较好的应用前景。

4) 产品应用研究。RFID 是纳米铜导电油墨应用的初期,随着研究的深入及纳米铜导电油墨性能的改进,将会有更多应用于实践,尤其是薄膜开关、触摸屏等。

参考文献:

- [1] 庄 严. 印刷电子学的发展[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(9): 1-5.
Zhuang Yan. Development of Printed Electronics[J]. Electronic Components and Materials, 2010, 29(9): 1-5.
- [2] Jolke Perelaer, Patrick J Smith, Dario Mager, et al. Printed Electronics: The Challenges Involved in Printing Devices, Interconnects, and Contacts Based on Inorganic

- Materials[J]. Materials Chemistry, 2010, 20: 8446-8453.
- [3] 孙亮权, 安兵, 李健, 等. 用纳米铜油墨印刷RFID签天线[J]. 电子工艺技术, 2013(1): 6-9.
Sun Liangquan, An Bing, Li Jian, et al. Nano Copper Conductive Ink Printed RFID Tag[J]. Electronics Process Technology, 2013(1): 6-9.
- [4] 孟昭, 祁王伟, 曾德勇. 导电墨水用纳米铜的制备及表征[J]. 湿法冶金, 2012, 31(2): 129-132.
Meng Zhao, Qi Wangwei, Zeng Deyong. Preparation and Characterization of Copper Nanoparticles for Ink-Jet Printing[J]. Hydrometallurgy of China, 2012, 31(2): 129-132.
- [5] 刘维平. 采用改进型振动球磨机制备超细铜粉的研究[J]. 江西科学, 2000, 18(1): 24-27.
Liu Weiping. Study on the Preparation of Ultra-Fine Copper Powder by Improved Vibration Mill[J]. Jiangxi Science, 2000, 18(1): 24-27.
- [6] 李红, 单丹, 高德玉, 等. 金属纳米铜制备技术[J]. 化学工程师, 2007(12): 23-25.
Li Hong, Shan Dan, Gao Deyu, et al. Preparation Technology of Metal Nanocopper[J]. Chemical Engineer, 2007(12): 23-25.
- [7] 陈祖耀, 陈波, 钱逸泰, 等. γ 射线辐照-水热结晶联合法制备金属超微粒子[J]. 金属学报, 1992, 28(4): B169-B172.
Chen Zuyao, Chen Bo, Qian Yitai, et al. Preparation of Ultra-Fine Metallic Particles by γ -Ray Radiation Hydrothermal Crystallization Combined Method[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1992, 28(4): B169-B172.
- [8] Dorda Feliks A. Method of Obtaining Ultra-Dispersive Copper Powder by Supplying Copper Nitrate Solution into Nitrogen Plasma[J]. Russ, 1996, 7: 271.
- [9] Lisiecki I, Billoudet F, Pilemi P, et al. Synthesis of Copper Nanoparticles in Gelified Microemulsion and in Reverse Mielles[J]. Molecular Liquids, 1997, 72(1): 251-261.
- [10] Wang Yanfei, Biradar A V, Wang Gang, et al. Controlled Synthesis of Water-Dispersible Faceted Crystalline Copper Nanoparticles and Their Catalytic Properties[J]. Chemistry A: European Journal, 2010, 16: 10735-10743.
- [11] Koroleva M Y, Kovalenko D A, Shkine V M, et al. Synthesis of Copper Nanoparticles Stabilized by Polyoxyethylenesorbitan Monooleate[J]. Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2011, 56(1): 6-10.
- [12] 林荣会, 方亮, 郗英欣, 等. 化学还原法制备纳米铜[J]. 化学学报, 2004, 62(23): 2365-2368.
Lin Ronghui, Fang Liang, Xi Yingxin, et al. Preparation of Nano-Particle Copper by Chemical Reduction[J]. Acta Chimica Sinica, 2004, 62(23): 2365-2368.
- [13] 邓吨英, 肖斐. 纳米铜油墨和铜导电薄膜的制备方法中国, CN102924996A[P]. 2013-02-13.
Deng Dunying, Xiao Fei. The Preparation Method of Nanocopper and Copper Conductive Ink Film: China, CN102924996A[P]. 2013-02-13.
- [14] Park B K, Kim D, Jeong S, et al. Direct Writing of Copper Conductive Patterns by Ink-Jet Printing[J]. Thin Solid Films, 2007, 515(19): 7706-7711.
- [15] Jeong S, Woo K, Kim D, et al. Controlling the Thickness of the Surface Oxide Layer on Cu Nanoparticles for the Fabrication of Conductive Structures by Ink-Jet Printing[J]. Advanced Functional Materials, 2008, 18(5): 679-686.
- [16] Kim I, Kim J. The Effect of Reduction Atmospheres on the Sintering Behaviors of Inkjet-Printed Cu Interconnectors[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(10): 102807.
- [17] Woo K, Kim Y, Lee B, et al. Effect of Carboxylic Acid on Sintering of Inkjet-Printed Copper Nanoparticulate Films[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(7): 2377-2382.
- [18] 李健. 纳米铜导电油墨工艺及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
Li Jian. Processing and Application Research of Nano Copper Conductive Ink[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [19] 李路海. 印刷电子材料与技术发展趋势[D]. 北京: 北京印刷学院, 2008.
Li Luhai. Printed Electronics Materials and Technology Trends[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2008.
- [20] 陈明伟, 吕春雷, 印仁和, 等. 纳米铜导电油墨的制备及研究[J]. 材料导报, 2009, 23(20): 93-97.
Chen Mingwei, Lü Chunlei, Yin Renhe, et al. Preparation and Investigation on Copper Nanoparticles in Conductive Ink[J]. Materials Review, 2009, 23(20): 93-97.
- [21] Deng Dunying, Cheng Yuanrong, Jin Yunxia, et al. Antioxidative Effect of Lactic Acid-Stabilized Copper Nanoparticles Prepared in Aqueous Solution[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(45): 23989-23995.
- [22] 何为, 杨颖, 王守绪, 等. 导电油墨制备技术及应用进展[J]. 材料导报, 2009, 23(21): 30-33.
He Wei, Yang Ying, Wang Shouxu, et al. Preparation Technology and Application Progress of Conductive Inks[J]. Materials Review, 2009, 23(21): 30-33.
- [23] Shin D H, Woo S, Yem H, et al. A Self-Reducible and Alcohol-Soluble Copper-Based Metal-Organic Decomposition Ink for Printed Electronics[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(5): 3312-3319.

(责任编辑: 徐海燕)

