

# 未来在社会中用作普适电子产品生产工具的个人桌面液态金属打印机

Jun Yang<sup>1</sup>, Yang Yang<sup>1</sup>, Zhizhu He<sup>1</sup>, BoweiChen<sup>1</sup>, Jing Liu<sup>1,2\*</sup>

**摘要:** 就像简单地用办公打印机在纸上打印图片一样直接写出电子产品是电子产品行业长久以来的梦想。笔者实验室已发明和论证了首台液态金属打印机的原型,为该目标的实现迈出了关键的一步。作为未来为社会制造非常实用的桌面液态金属打印机的持续努力的一部分,本项工作旨在将此技术向消费者层面推进。通过一系列针对关键技术问题的工业设计和技术优化,如工作可靠性、打印分辨率、自动控制、人机界面设计、软件、硬件和软硬件之间的整合,可制造出一台高品质的个人桌面液态金属打印机(为进行大批量工业化生产作准备)。本文解释了此打印机的基本特点和重要技术原理,并论证了制造功能性装置(如发光二极管(LED)显示器)的几种可能的消费者终端用途。此液态金属打印机是一种自动的个人电子产品生产工具,其使用简单,成本低,并具有许多潜在用途。本文论证了这种新设备对一些新需求可能发挥的重要作用,概述了这项尖端技术的前景,并与几种传统打印方法进行了对比分析。可以预见,在不久的将来,这种桌面液态金属打印机将在学术领域、工业、教育和个人用户中成为基本的电子产品生产工具,并被用于许多新实践中。

**关键词:** 液态金属打印机, 打印电子产品, 增材制造, 创客, 自己动手做(DIY)电子产品, 普适技术

## 1 引言

2011年,当英特尔在其22 nm逻辑技术中引进变革

性的三闸极晶体管时,半导体行业还在继续遵循著名的摩尔定律[1]。由于半导体工艺变得越来越先进和复杂,人们对晶体管智能生产替代方法的兴趣也在迅速增加。2000年曾报道了使用喷墨技术实现有机半导体、导体和绝缘体制造的全聚合物晶体管[2],引发了针对打印电子产品的大量研究。打印的有机晶体管通常在两方面引起人们的兴趣:第一,传统的矿物型晶体管可使用有机材料制造;第二,打印技术可用于制造电子装置。尽管印刷电路板(PCB)已颇具规模,但其涉及抗蚀材料而非电子材料的印刷。在寻找低成本、大规模和快速的电子产品制造方法的过程中,世界各地完成了许多出色的工作。这些工作可概述为两个类别:印刷策略创新和材料创新。除喷墨打印外,其他制造策略是通过微接触印刷、卷对卷印刷和丝网印刷实现的[3]。迄今为止,人们已对多种重要的功能性印刷材料进行了深入研究[4, 5]。其中,银纳米颗粒油墨可能是最突出的导电油墨。在此阶段,发展银纳米颗粒油墨的主要挑战在于印后工艺要求的高温烧结或强脉冲光烧结,以及材料本身具有的相对较大的电阻率和潜在断裂的印刷线。为了解决高温烧结工艺的需求,研究者合成了只需在中等温度(90 °C)退火就可获得超高导电性的活性银油墨,其导电性与银块的导电性一样好[6]。目前已经提出了具有内置烧结机制的新型银纳米颗粒型导电油墨,使用这种材料可完全避免后烧结[7]。然而,大多数打印材料仍要承受这种制造技术其他缺点,如繁复的制造工艺和复杂的印刷条件等。到目前

<sup>1</sup> Beijing Key Lab of CryoBiomedical Engineering and Key Lab of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; <sup>2</sup> Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084, China

\* Correspondence author. E-mail: jliu@mail.ipc.ac.cn

Received 22 April 2015; received in revised form 25 November 2015; accepted 30 November 2015

© The Author(s) 2015. Published by Engineering Sciences Press. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)  
英文原文: Engineering 2015, 1(4): 506–512

引用本文: Jun Yang, Yang Yang, Zhizhu He, Bowei Chen, Jing Liu. A Personal Desktop Liquid-Metal Printer as a Pervasive Electronics Manufacturing Tool for Society in the Near Future. *Engineering*, DOI 10.15302/J-ENG-2015042

为止,传统的电子产品制造策略通常不环保;消耗过多的时间、水和能量;并依赖于昂贵的装置。在很大程度上,这些缺点阻碍了电子产品制造在现代商业中的广泛应用,尤其是在个人使用方面。无疑,就像简单地用办公打印机在纸上打印图片一样直接写出电子产品是电子产品行业长久以来的梦想。

为了提供一种可靠的和真正直接的电子产品制造方法,笔者实验室引入一种由低熔点液态金属或合金制成的新型导电油墨,针对电子产品的直接写出(或打印),提出了一个从根本上与传统方法不同的策略。此方法后来被命名为“基于合金和金属油墨的电子产品的直接写出”,缩写为“梦之墨技术”(DREAM Ink)[8]。通过过去几年对一系列不同打印原理的大量研究,研究人员发明了首台供个人使用的液态金属打印机[3]。笔者已证明使用此设备可在一系列软质或硬质承印物上打印出具有较高分辨率的各种导电模型,精度在20~80  $\mu\text{m}$ 。这些模型包括单根电线和各种复杂的结构,如集成电路、天线、传感器、射频识别(RFID)、电子卡、装饰工艺品、古典绘画和其他自己动手做(DIY)的电路。整个过程只需15 min。此设备可在全世界的电子产品制造中显著激发个人实践潜能。液态金属打印正在迅速成为室温下制造电子产品的一种极好的方法。作为制造一种在未来社会普适的、高品质的、适用于消费者层面的打印设备的持续工作的一部分,本文介绍了液态金属打印机接近工业生产的制造工艺,并解释了其作为一台自动的、使用简单的和面向个人的桌面电子产品打印设备的未来价值。本文说明了此尖端技术的基本特点、技术原理、重要应用和未来潜力。

## 2 液态金属油墨的基本特点

从最初应用于高热通量电子产品的热管理开始[9],室温液态金属在各种消费电子产品应用中正在成为一种非常有用的材料。术语“液态金属”通常指改性镓或更多合金型的电子油墨,尽管可能会使用到多种不同的低熔点合金。最典型的材料是 $\text{GaIn}_{24.5}$ ,这是一种共熔镓铟合金,含有质量分数为75.5%的镓和24.5%的铟。 $\text{GaIn}_{24.5}$ 的熔点为15.5  $^{\circ}\text{C}$  [10],其在室温下(20  $^{\circ}\text{C}$ )仍然为液态。液态金属油墨另一个极为重要的特点是人类可安全使用,不像有毒的水银。在本研究中,笔者着重探讨了熔点接近室温的液态金属和合金,即 $\text{GaIn}_{24.5}$ 合金。作为印刷油墨,此合金具有独一无二的重要性。它的自然液态和高导电性( $3.4 \times 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ )使其成为可在室温下直接打印电子产品油墨的最有前景的候选合金[3]。

水在树叶上会形成水滴但在地上就会渗入积满灰尘的地面,这是常识。然而,水银在积满灰尘的地面上会形成液滴并翻滚,而不会渗入。水与水银之间的这种差异是由材料表面的润湿性造成的,而润湿性取决于表面的固有张力或表面能量。一般而言,树叶的表面张力大于积满灰尘的地面,而水银具有高于水的表面张力。当液滴落在平坦的固体表面上时,接触角被定义为液固界面与液气界面之间交汇形成的角度(图1)。

为了测量接触其他固体材料的液态金属的润湿性,使用POWEREACH JC2000D2测量了几种含 $\text{GaIn}_{24.5}$ 的正常聚合物的接触角,并绘制于图2中。结果表明,聚合物与液态金属 $\text{GaIn}_{24.5}$ 合金之间的接触角大致随着聚合物表面张力的增加而减小,此现象可通过杨氏方程定性说明。对相同的液态金属, $\gamma_{\text{SG}}$ 上升时,接触角 $\theta_c$ 将减小, $\gamma_{\text{LG}}$ 影响可以忽略。如图2所示,由于 $\text{GaIn}_{24.5}$ 合金巨大的表面张力(624  $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,与张力为425  $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 的水银相比 [10, 11]),在此研究中液态金属对聚合物的润湿性不太理想。根据定性分析和实验结果可得出这样的结论,即具有较高表面张力的承印物更适合与液态金属油墨一同使用[12]。

尽管所研究的聚合物中没有任何一种在与液态金属油墨接触时显示理想的润湿性,包括已用于液态金属打

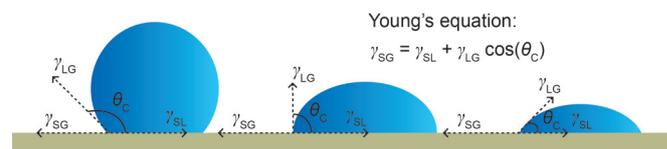


图1. 杨氏方程和接触角图示。所涉及的固体和液体的表面张力分别用 $\gamma_{\text{SG}}$ 和 $\gamma_{\text{LG}}$ 表示。当构成接触角 $\theta_c$ 的这两种材料接触时, $\gamma_{\text{SL}}$ 表示它们之间的表面张力。根据杨氏方程,这四个参数之间的关系为 $\gamma_{\text{SG}} = \gamma_{\text{SL}} + \gamma_{\text{LG}} \cos(\theta_c)$ 。接触角小于 $90^{\circ}$ (极保守)表明表面湿润性是有利的。否则,润湿性偏弱。

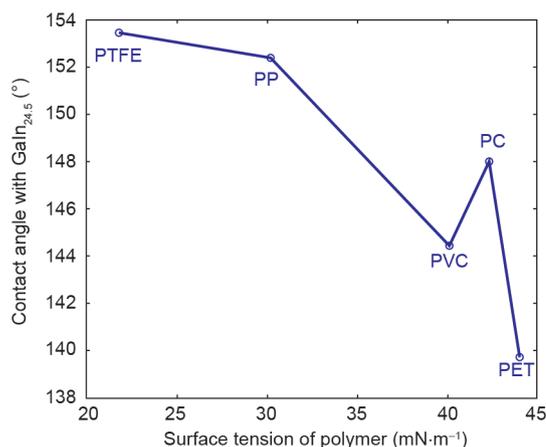


图2. 几种聚合物与液态金属 $\text{GaIn}_{24.5}$ 合金的接触角图示。各聚合物的表面张力值是通过ACCU DYNE TEST™收集的[12]。每个接触角代表了至少十个测量值的平均值,以使结果相对可靠。PTFE: 聚四氟乙烯; PP: 聚丙烯; PVC: 聚氯乙烯; PC: 聚碳酸酯; PET: 聚对苯二甲酸乙二醇酯。

印的少数几种实用性承印物之一的聚氯乙烯(PVC),但通过对液态金属打印机使用聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)可实现较为理想的打印结果。同时笔者也发现,与PVC薄膜类似,另一种易于获得的塑料薄膜,PET薄膜,具有与PVC承印物相同的打印性能。这些结果为发现更多针对具体需求的承印物提供了指导路线,而这些承印物将大大扩展此项技术未来的应用范围。

### 3 液态金属打印机的发展

本节简要概述了印刷技术的历史。大约在1000年前,一位名为毕昇的中国发明家发明了活字印刷术(图3(a)),作为一种快速、大量制作书籍的方式,其在很大程度上克服了手抄书籍的弊端。后来出现了平板印刷术(图3(b)),此印刷术提高了印刷速度,并提供了大规模的制造能力。后续的丝网印刷术(图3(c))极大地扩展了承印物的范围,目前其主要用于服装业。喷墨打印技术(图3(d))在办公室和家庭中成功实现了商品化,同时也被用于制造电子产品,如有机发光二极管(OLED)。在办公室中通常使用的另一种打印技术是激光打印(图3(e))。2D打印技术将承印材料限制为平面,打破此先天限制的梦想促进了3D打印的发展。目前已有3D打印(图3(f)),并可被用于打印制作实体物品。总之,印刷技术的发展始终朝着人类希望的目标前进。因此,即使存在合适的方法,除非承印的材料可用,否则该方法也不是最佳方法——这使打印材料成为此技术中的主要影响因素。

低熔点金属在室温下呈液态的特性使其成为电子打印油墨的自然选择,这促使我们在打印电子产品领域探索其巨大的价值。作为在不同柔性承印物上打印电子产品的第一次尝

试,Gao等[13]证明了有一种毛笔可将液态金属直接写到承印材料(包括玻璃、布和塑料)上。作为柔性电子打印油墨的液态金属,其基本功能已通过功能电路的制造得到了验证。为了实现使用液态金属打印电子产品的目标,Zheng等[14]开发了一种类似分配器的设备,可将液态金属二维或三维地打印到铜版纸上。该设备现在已经能直接自动打印出小型天线和较大的电感线圈。但是,考虑到其较慢的打印速度和较低的空间分辨率,该研究中的桌面打印设备对于打印电子产品领域的个人或普适用途来说仍然不符合需要。

不久之后,笔者实验室开发了世界首台供实际应用的液态金属打印机原型,其首次报道见于《科学报告》(《Scientific Reports》)[3]。为了使此设备更适用于个人用途,笔者做了大量的工作以设计以实现本文所述的高性能和接近工业用途的设备。笔者希望在不久的将来,此设备可满足普通终端用户的各种应用。图4(a)所示的液态金属打印机是最近开发的原型,目前已接近批量生产。此打印系统将最近公开的中性笔式液态金属墨盒机理与绘图机式打印原理结合在了一起。其基本工作原理是,液态金属油墨被预先加载,并能在重力作用下附着于滚珠表面且被均匀送至针尖;然后,油墨被传输并沉积在承印物的表面[3]。打印头反向出墨移动的强作用力和滚珠的滚动保证了油墨对目标承印物极强的附着力。

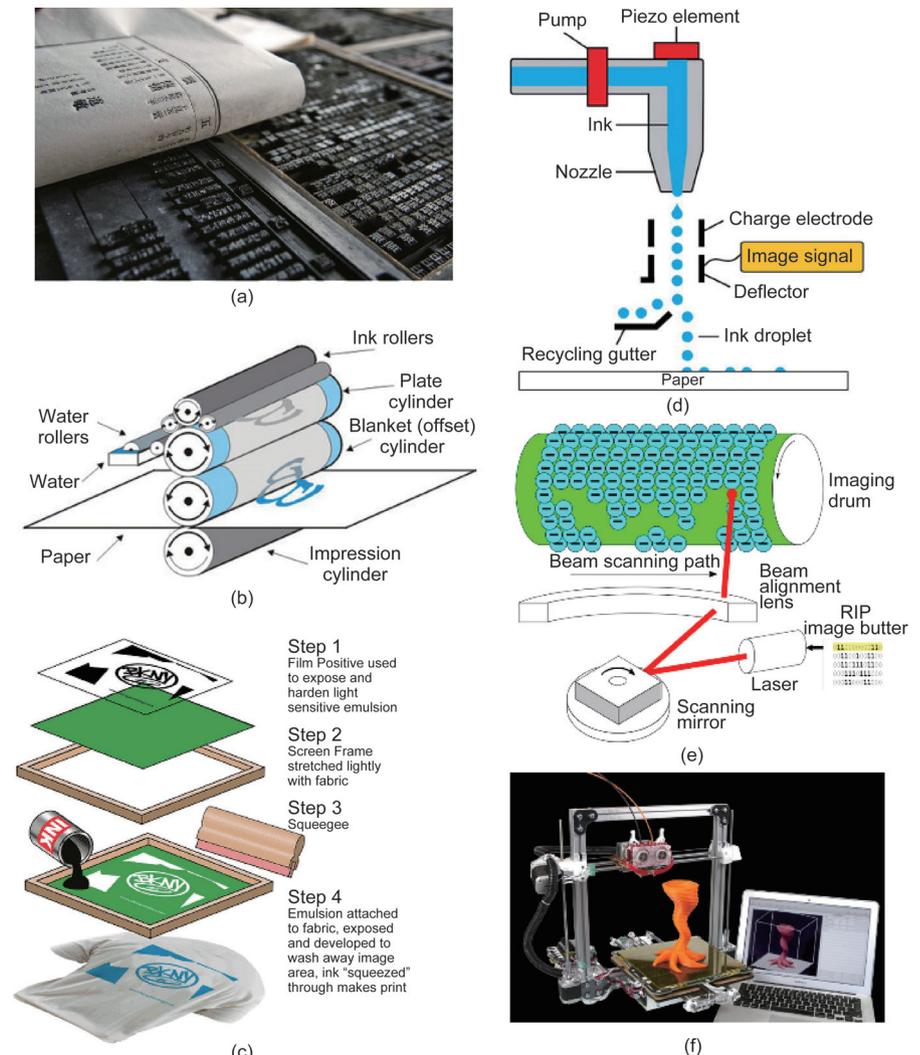
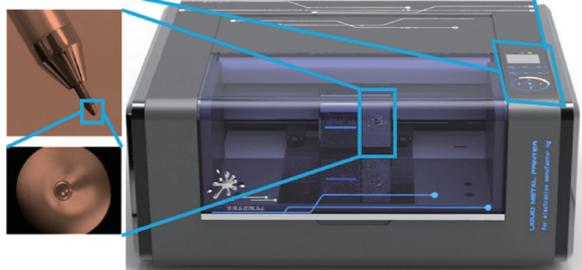


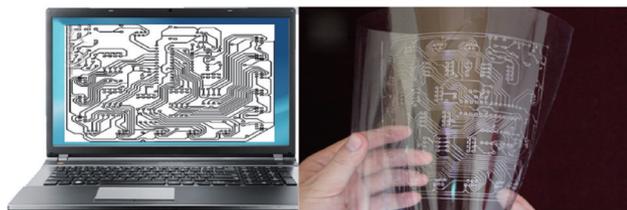
图3. 印刷技术发展过程图示。(a) 活字印刷术,约1000年前发明;(b) 平板印刷术;(c) 丝网印刷术;(d) 喷墨打印;(e) 激光打印;(f) 3D打印。

通过对潜在承印物的大量试验,并考虑到其润湿性和成本,笔者确认了PVC和PET薄膜是适合的承印物。尤其是这些承印物的透明度和挠性使打印电路相当有吸引力。如图2所示,当液态金属与PVC之间的杨氏接触角约为 $144^\circ$ 时,用液态金属墨盒书写,笔尖的小珠子在液态金属的包围下在PVC薄膜上滚动,从而将液态金属压印到PVC薄膜上。此过程使液态金属牢牢附着在薄膜上并形成书写轨迹。在轨迹的垂直方向上,如果我们按照杨氏接触角的说明但忽略其条件,则书写轨迹与PVC承印物之间的接触角将减小至 $110^\circ$ ,与书写时的压力略有不同。因此,通过改善液态金属与PVC薄膜之间的附着,此工艺成为目前进行液态油墨打印最适合的方式。为了实现直接打印,液态金属打印机被设计为可自动驱动液态金属墨盒在PVC承印物上打印。此过程需要笔记本或台式电脑(图4(b))来指导液态金属打印机,以制造预期的电子产品。当通过USB集线器将控制电脑首次连接至液态金属打印机时,必须在电脑上安装开发完善的驱动程序。从此时开始就能像操作办公打印机一样轻松地使用液态金属打印机。用户在处理软件(如Microsoft Word)中打开所需的矢量图形(如图4(b)所示的图形),然后只需单击“打印”并选择液态金属打印机。液态金属打印机收到打印请求后,将在承印薄膜上快速打印预先设计的确切图形(如图4(c)所示的图形)。为了实现此目标,打印机需要在两个相互垂直的方向驱动液态金属墨盒和承印物。

-X	F90	+X	Origin	Pause	Menu
-Y	V30	+Y	Repeat	Test	Enter



(a)



(b)

(c)

图4. 液态金属打印机及其打印出的电子产品。电路图和线路图可通过设备精确快速地打印输出,因为图形是通过USB集线器从控制电脑进行传输的。(a)液态金属打印机及其中性笔式液态金属墨盒和参数设置页面图;(b)控制电脑,显示预期的电子电路设计图;(c)已直接打印在软性PVC承印物上的电路。

同时,另一个驱动器下压液态金属墨盒打印电子图形,然后将其抬起并移至另一指定位置。理论上,此工艺可打印任何预先设计的线条图形。

液态金属打印机的打印参数,包括与打印性能相关的两个关键参数,即打印速度( $V30, 120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )和压力( $F90, 282 \text{ g}$ ),可通过带液晶显示(LCD)触摸屏的控制面板进行调节。为满足各种应用情况的需求,可将打印速度从0调节至 $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,将压力增加至 $800 \text{ g}$ 。正如笔者以前的论文所述[3],打印轨迹的宽度和高度与打印速度和压力有关。速度过高和压力不足可导致打印轨迹的缺陷;根据实践经验,如要获得连续不断的线条,压力应大于 $50 \text{ g}$ ,速度应低于 $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。单击“菜单”,用户可以切换至其他设置,如设置打印起始点。“测试”功能将打印一个小方块,用于验证是否所有的设置均适用。鉴于这种成套的特点和控制,用户可在一般情况下直接制造各种电子产品(图4(b)和(c)),而无需额外的预先或事后处理,使液态金属打印机成为普适各种情况的极佳选择。此外,使用液态金属打印机打印类似于使用办公打印机打印;打印电气艺术品或电路只需几美元,此成本足以令本技术在不久的将来对个人的日常生活产生重大影响。当然,必须要把稳定电路、结构和液态金属所打印图形的方法作为实践应用的重要问题加以考虑。为了完全确保所制造产品的环境和力学稳定性,可使用不同的材料包装产品,如聚二甲基硅氧烷(PDMS)或室温硫化(RTV)硅橡胶。欲了解更多详情,读者可参见笔者以前的论文[3]。

## 4 未来应用的典型实例

通过导电油墨打印生产功能性装置在各领域内正变得日益重要[8, 15]。在本文中,为了展示首台个人实用液态金属打印机的诸多普适用途,笔者选择通过 $8\times 8$ 发光二极管(LED)阵列来解释其基本流程。首先,必须确定 $8\times 8$  LED阵列(图5(a))的原理图。八行八列的信号线使64个LED相互独立。例如,为了点亮位于第三行第四列的LED,用户会将正电压连接至第三行,将地线连接至第四列(图5(b))。如原理图所示,各行和各列相互交叉(在同一层接线时这是不可避免的)。尽管传统的双层PCB是解决此问题的一个完美的方案,但使用液态金属轨迹很难模仿此解决方案(由于其在室温下呈液相)。笔者针对轨迹的交叉想出了解决方案,如图5(c)所示。用户在发生交叉处预留了约 $1.5 \text{ mm}$ 的间隙,并在轨迹打印后用室温硫化硅橡胶覆盖间隙[3]。然后,室温硫化硅橡胶硫化以后,像天桥一样,使得断开的轨迹可被人工连接。此

方法适用于交叉较少或交叉比较规则的情况，如LED的阵列。作为打印过程的下一步，应该人工绘制这些即将被应用于液态金属打印机的矢量格式图形，绘制可在图形设计软件(如CorelDraw)的辅助下完成。

对于此LED阵列电路，除网眼式交叉和两个LED底座以外，可打印图形(图5(d))非常像原理图。两个LED底座的大小是根据真实的LED包装仔细设计的，在此情况下，由于打印轨迹的液体特性，包装应为表面贴装包装，而非嵌入式包装。根据行业标准，图5(d)中提供的尺寸适用于具有固定尺寸的1210封装表面贴装的LED。当然，表面贴装LED的底座是实心矩形，而非图5(d)所示的开放式矩形。由于液态金属打印机在此阶段仍属于线条绘图机，在图中仅绘制了线条。当两条线之间的间隙小于打印机的空间分辨率时，即形成了填充区域。但是，填充区域对此LED阵列应用并非强制性的，因为打印的矩形可通过人工方式轻松填满。若要使用液态金属打印机打印LED阵列电路(图5(d))，可打印图形应为惠普图形语言(HPGL)格式，这是此打印机支持的原始格式。

LED阵列电路图形设计完毕后，用户将图形导入Microsoft Word，并随时准备将图形发送至液态金属打印机进行打印。在几分钟内就可准确地打印输出LED阵列电路(图6(a)和(b))。除黑色的线条现在是液态金属轨迹及承印物是PVC薄膜外，结果基本上与图5(d)所示的一样。装配LED只需要将LED放到底座上，并使用镊子(图6(c))将其固定。所有的LED装配完以后(图6(d))，使用上述的方法连接断开的轨迹(图5(c))。必须小心完成此步骤，因为轨迹处于脆性液态。首先，添加一小滴硅橡胶覆盖交叉区域。其次，在橡胶硫化后使用液态金属墨盒人工连接轨迹。尽管现在LED阵列已为验证作好了准备，但对于长期使用而言，使用室温硫化硅橡胶涂覆整块LED阵列电路板是合适甚至必要的。根据笔者以前的试验[14]，当打印的液态金属电路以不同的角度多次折弯时，电路电阻几乎没有变化。此结果表明，密封良

好的打印阵列可以满足柔性电路的要求。

以上所述是完成LED阵列的完整程序，包括设计电路图、利用液态金属打印机打印、连接断开的轨迹、LED装配和涂覆。此程序大大简化了传统PCB制造的工艺，传统工艺通常包括印刷、热转移、蚀刻和脱墨、焊接和打孔，并很大程度上依赖于昂贵的设施。此外，与传统制造相比，液态金属打印机的使用只需更少的材料和仪器，并避免了有风险的工艺，如化学蚀刻和高温焊接。与完全手动的电路实验板相比，液态金属打印机更加自动化，能力更强。

为了测试LED阵列，笔者开发了微控制器系统来驱动照明图案。笔者通过对此系统进行编程使其能够显示数字、字母和心形图案(图7)。

LED阵列的制造和验证证明了液态金属打印机是在各类应用中使用的实用电子产品制造设备。除制作有趣的电路外，此打印机还可用来创作艺术品。图8(a)~(d)显示了由液态金属油墨打印的各种线条图案，此油墨可用作创作艺术品的一种新型绘图材料——一种与石墨型材料截然不同的材料。液态金属的高度导电性为艺术与电子的结合提供了可能。作为一项主要工作，笔者打印了图9(a)所示的插图和图9(b)所示的电子贺卡，并使用彩色LED装饰了它们。LED使制作的图画变得非常生动，这是传统印刷品完全不具备的特点。

## 5 讨论和结论

在电气教育的初始阶段，由于电路试验板的易用性和修改灵活性，通常使用电路试验板来教授学生如何制作他们自己的基本功能电路。此阶段的教学现在可使用液态金属打印机进行，通过打印机，电路可被迅速并直

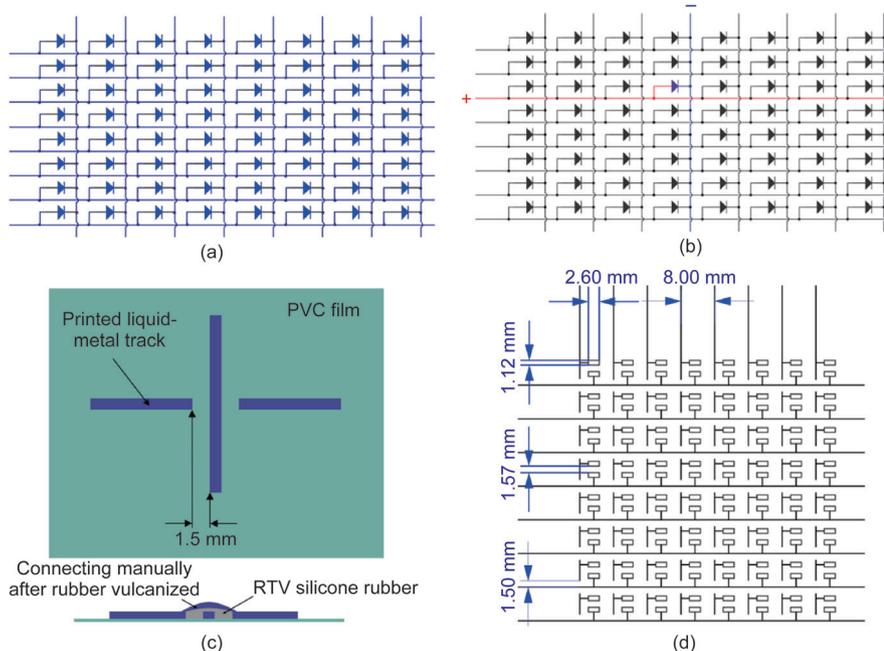


图 5. (a) 8×8 LED 阵列的原理图；(b) 点亮位于第三行第四列 LED 的示意图；(c) 在两个轨迹交叉处进行天桥式连接的方法；(d) 精心设计的可采用液态金属打印机打印的 LED 阵列电路。

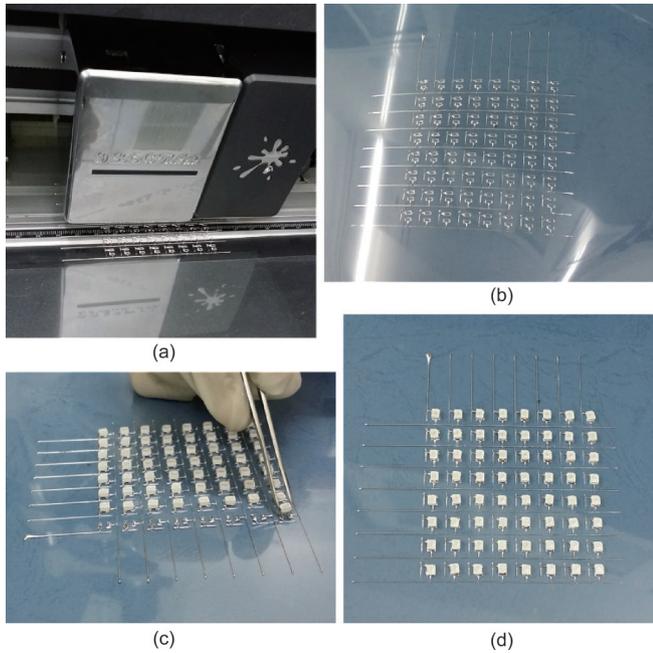


图 6. LED 阵列制作程序。(a) 使用液态金属打印机自动打印 LED 阵列电路图 (图 5(d)); (b) 打印的 LED 阵列, 看上去几乎与图形一样; (c) 使用镊子装配 LED, 确保在各 LED 与电路之间获得足够的电传导; (d) 所有 LED 连接完毕。

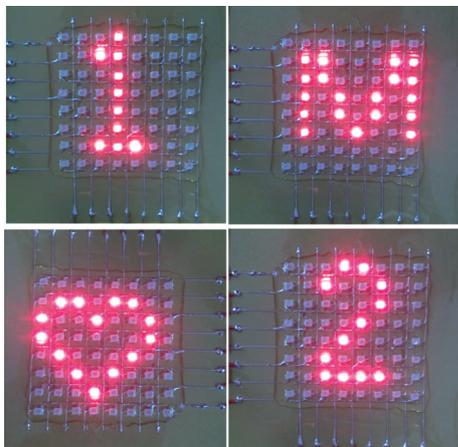


图 7. 显示“1”“M”、心形图案和“2”的 LED 阵列照片。将 LED 阵列的输入脚线连接至带传统铜导线的微处理器系统中; 在此图中未显示系统和导线。微处理器被编程为每个符号显示 1 s, 然后无限循环地切换至下一个符号。

接地打印输出, 并同时显示出各电子元件之间的直观连接。此外, 液态金属油墨在回收后可再利用, 类似于电路试验板的可复用性。

想象一位电子产品爱好者想在家制作 PCB 的情况。如果遵循常见的 DIY 流程, 此爱好者必须至少拥有一台打印机、PCB 承印物 (即阻燃剂 #4 或 FR4)、一台压膜机、蚀刻材料 (如硫酸) 以及焊铁。或者, 此爱好者可以选择摆脱所有这些材料和可能的工艺, 并从制造商购买 PCB, 但这就失去了自己制作的乐趣。现在, 液态金属打印机提供了一种制作 PCB 的全新方式。制作所需的电路只需要打印机本身、液态金属油墨和承印物, 然后即可装

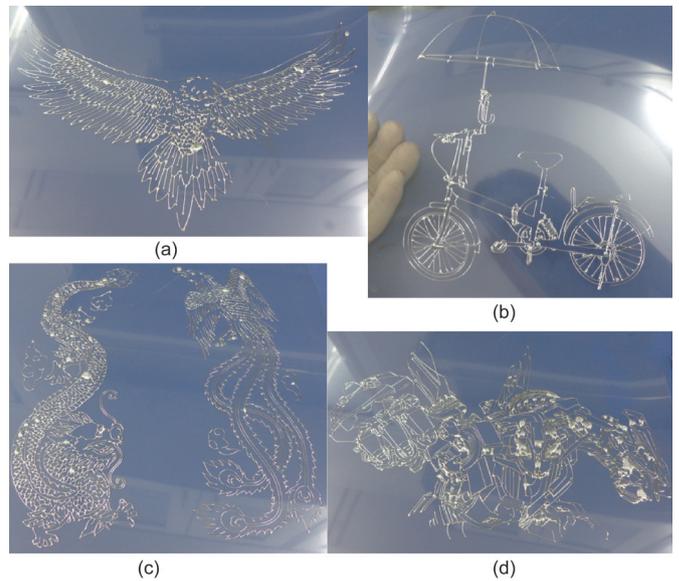


图 8. 液态金属油墨形成的打印线条图案照片。(a) 展翅的鹰; (b) 自行车和雨伞的静物画; (c) 中国著名绘画“龙凤” (寓意“美好吉祥”) 的复制品; (d) 电影《变形金刚》中角色“大黄蜂”的线条图。

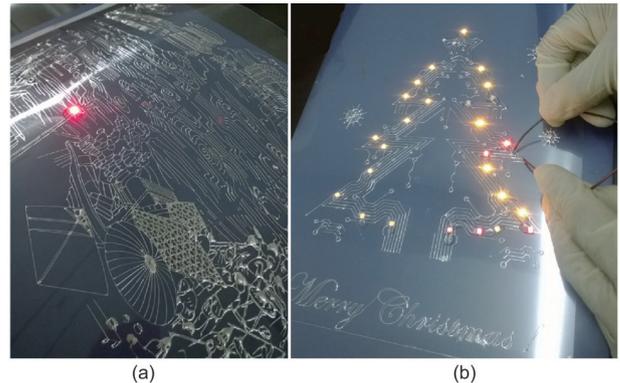


图 9. 结合了艺术性与电力的图案。(a) 中国古代著名绘画《清明上河图》的复制品; (b) 写有“圣诞快乐”的圣诞节贺卡。这两幅打印的液态金属绘画均嵌入了彩色 LED, 使艺术品更加漂亮和生动。尤其是, 圣诞树看上去就像是装饰了彩灯的真实圣诞树。

配电子元件。因此, 此项技术为未来个人电子产品的制造提供了一种高效的方式。由于液态金属打印机能打印输出任何导电图形, 电子产品与艺术之间的一体化也会成为现实。本文说明的实践案例显示了液态金属打印机可用于电子产品制造和许多其他情况, 包括家庭使用; 也可作为大专院校学生的教学工具; 甚至可以作为电子艺术工作的新式艺术媒介。

在笔者实验室的多年努力之后, 用于普适电子产品打印的新型个人液态金属打印机展现出了在世界各地大规模应用的光明前景。通过对液态金属的物理特性、油墨传送模式、适宜承印物和自动打印工艺的全面研究, 目前笔者已经设计和制造了这款非常实用的个人液态金属打印机。在此阶段, 该设备已接近客户级产品, 具有可承受的价格和易于获取的材料, 如 PVC 薄膜和液态金属。显然, 液态金属打印机的使用远比大多数传统或新

近公开的电子产品打印策略要简捷得多。使用打印机制造目标电子产品每次只需要由几个步骤组成的简单程序。这些程序可能包括：设计可打印的图形、使用液态金属打印机打印、连接断开的轨迹(如有必要)以及装配和涂覆电子元件。此外，液态金属打印机还为从小学到大专院校的电子教学提供了机会。只要拥有这种制造电子产品的基本工具，任何人，甚至是儿童都能获得复杂电子工程方面的培训——这无疑是一种令人振奋的可能性。根据笔者的经验，设计复杂的可打印图形似乎是使用液态金属打印机打印过程中最耗时的部分。但是，此过程在一定程度上可通过互联网上免费或购买下载的共享图形应用软件来提速。此外，液态金属打印机具有打印艺术品的内在能力，为含有电子这一新要素的艺术工作铺平了道路。液态金属甚至可以回收，因为其在涂覆后仍然保持着液相，且其工艺比许多传统方法更加环保。

总的来说，在电子产品打印应用中，以个人用户为目标的环保液态金属打印机显示出巨大的潜在价值，包括电子产品制造、电子学教育、艺术工作和工业制造；在不久的将来该设备将能被随时随地地使用。随着这种基本工具成为日常生活的一部分，我们期待一个奇妙新世界的到来，在这样的世界中，人们可以随意自行制造自己的电子产品以满足个人需求。这种工具可能会促进世界各地的创新。

## 致谢

本文获得了中国科学院研究基金(KGZD-EW-T04-4)的部分资助。

## Compliance with ethics guidelines

Jun Yang, Yang Yang, Zhizhu He, Bowei Chen, and Jing

Liu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

1. M. Bohr, K. Mistry. Intel's Revolutionary 22 nm Transistor Technology. Santa Clara, California: Intel, 2012. [http://download.intel.com/newsroom/kits/22nm/pdfs/22nm-details\\_presentation.pdf](http://download.intel.com/newsroom/kits/22nm/pdfs/22nm-details_presentation.pdf)
2. H. Sirringhaus, et al. High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits. *Science*, 2000, 290(5499): 2123–2126
3. Y. Zheng, Z. Z. He, J. Yang, J. Liu. Personal electronics printing via tapping mode composite liquid metal ink delivery and adhesion mechanism. *Sci. Rep.*, 2014, 4: 4588
4. J. J. Adams, et al. Conformal printing of electrically small antennas on three-dimensional surfaces. *Adv. Mater.*, 2011, 23(11): 1335–1340
5. H. S. Kim, S. R. Dhage, D. E. Shim, H. T. Hahn. Intense pulsed light sintering of copper nanoink for printed electronics. *Appl. Phys., A Mater. Sci. Process.*, 2009, 97(4): 791–798
6. S. B. Walker, J. A. Lewis. Reactive silver inks for patterning high-conductivity features at mild temperatures. *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134(3): 1419–1421
7. M. Grouchko, A. Kamyshny, C. F. Mihailescu, D. F. Anghel, S. Magdassi. Conductive inks with a “built-in” mechanism that enables sintering at room temperature. *ACS Nano*, 2011, 5(4): 3354–3359
8. Q. Zhang, Y. Zheng, J. Liu. Direct writing of electronics based on alloy and metal (DREAM) ink: A newly emerging area and its impact on energy, environment and health sciences. *Front. Energy*, 2012, 6(4): 311–340
9. K. Ma, J. Liu. Liquid metal cooling in thermal management of computer chips. *Front. Energy Power Eng. China*, 2007, 1(4): 384–402
10. N. B. Morley, J. Burris, L. C. Cadwallader, M. D. Nornberg. GaInSn usage in the research laboratory. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, 79(5): 056107
11. The Engineering ToolBox. Surface tension of some common liquids like water, mercury, oils and more. [2014-2-22]. [http://www.engineeringtoolbox.com/surface-tension-d\\_962.html](http://www.engineeringtoolbox.com/surface-tension-d_962.html)
12. Diversified Enterprises. Critical surface tension, surface free energy, contact angles with water, and Hansen solubility parameters for various polymers. [2014-02-22]. [http://www.accudynetest.com/polytable\\_01\\_print.html](http://www.accudynetest.com/polytable_01_print.html)
13. Y. Gao, H. Li, J. Liu. Direct writing of flexible electronics through room temperature liquid metal ink. *PLoS ONE*, 2012, 7(9): e45485
14. Y. Zheng, Z. He, Y. Gao, J. Liu. Direct desktop printed-circuits-on-paper flexible electronics. *Sci. Rep.*, 2013, 3: 1786
15. Y. Kawahara, S. Hodges, N. W. Gong, S. Olberding, J. Steimle. Building functional prototypes using conductive inkjet printing. *IEEE Pervas. Comput.*, 2014, 13(3): 30–38