

# 印刷电子发展回顾与展望

崔铮

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所印刷电子技术中心, 苏州 215123

**摘要** 印刷电子技术作为一个新兴电子技术正在受到越来越广泛的关注。通过印刷方法制造的信息电子与光电子器件和系统具有大面积、柔性化、个性化、低成本、绿色环保等一系列优点。尽管印刷加工本身没有传统微纳米加工的高分辨率与高集成度, 但上述优点足以使印刷电子在许多新应用领域发挥作用。本文对印刷电子定义、起源、发展历程及产业与技术现状进行了全面介绍, 分析了印刷电子面临的挑战, 并对印刷电子未来发展前景做了展望。

**关键词** 印刷电子; 柔性电子; 无机纳米材料; 物联网; 绿色增材制造

## 1 印刷电子及特点

印刷电子, 也就是“印刷+电子”, 即利用传统印刷技术来制作电子器件或电路。传统印刷技术即所熟知的印刷报纸与杂志的技术。传统印刷报纸的技术何以可以用来印刷电子? 印刷报纸或杂志用的是黑白或彩色油墨。如果把这些仅是表达颜色的油墨换成具有电子功能的油墨, 印刷出来的图形就具有了电子功能。类似于印刷彩色图画的多色套印技术, 多种电子功能油墨也可以通过套印方式叠加印刷, 形成复杂的电子功能结构。目前普遍使用的各种电子设备中的集成电路芯片 IC 与印刷电路板 PCB (printed circuit board) 是通过复杂的光刻、显影、刻蚀等一系列加工步骤实现的, 而印刷制造则简单得多。图 1 比较了传统平面微纳米加工与印刷加工的区别<sup>[1]</sup>。

同样是将一种功能材料在平面基底上制作成图形结构, 传统集成电路芯片的加工方法要经过从镀膜到去胶 8 个步骤, 而印刷加工则只需要 2 步。印刷方法可以直接将功能材料以图形化方式沉积到基底表面, 只需要额外的烧结工艺, 将墨水材料烧结成固体材料, 就形成了传统工艺需要 8 步才能实现的同样的图形结构。

印刷制造与现已熟知的 3D 打印一样, 本质上是一种增材制造技术。而传统集成电路芯片加工或各种电子设备中常见的电路板制造技术, 都是减材制造技术, 即通过等离子刻蚀或酸液腐蚀将不需要的材料去除, 形成功能材料的图形结构<sup>[2]</sup>。印刷增材制造有 5 个优点。

1) 不依赖基底材料的性质。集成电路芯片只能在硅基半导体晶圆上制备, 而印刷可以在任何材料表面沉积功能材

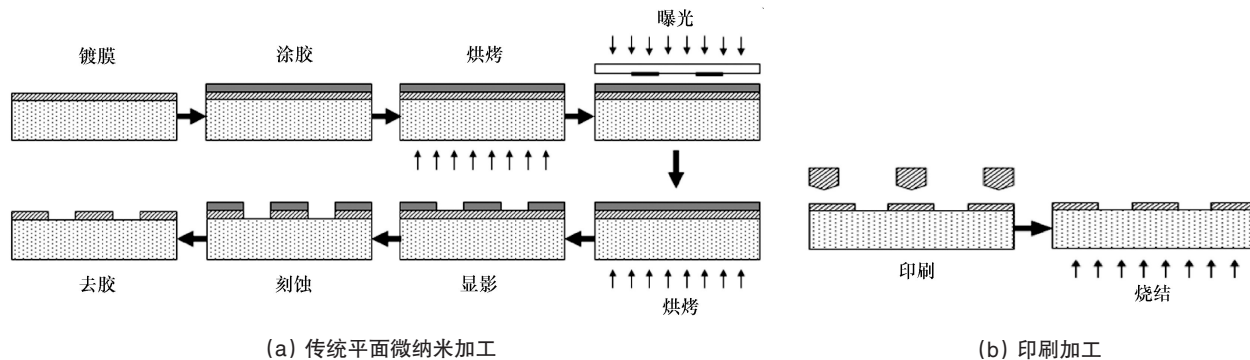


图 1 传统集成电路芯片加工与印刷加工的比较

Fig. 1 Comparison between conventional microfabrication for integrated circuits and printing fabrication

收稿日期: 2017-06-07; 修回日期: 2017-06-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA09020201); 国家自然科学基金项目 (91623104)

作者简介: 崔铮, 研究员, 研究方向为印刷电子材料与技术、纳米材料的规模化产业化应用、印刷电子标签与传感器及其在物联网中的应用, 电子信箱:

zcui2009@sinano.ac.cn

引用格式: 崔铮. 印刷电子发展回顾与展望[J]. 科技导报, 2017, 35(17): 14-20; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.17.001

料。这就使得在塑料、纸张、布料等大量低成本柔性材料表面制造电子器件与电路成为可能。

2) 印刷可以大面积与批量化制造。传统印刷技术已经可以在数米宽的材料表面通过高速连续卷对卷方式印刷报纸或印染布匹,同样方法也适用于印刷电子功能材料。集成电路芯片加工目前可以实现的最大晶圆直径为 300 mm,而印刷电子器件可以在直径 1 m 以上的面积上实现。

3) 印刷电子制造是低成本的。这种低成本来自于印刷设备的低成本,通常一台设备就可以搞定全部印刷制造环节;来自于印刷材料的低成本,尤其是各种低成本塑料或纸张基底材料;来自于高速连续卷对卷批量化印刷导致的单个器件的低成本。

4) 印刷增材制造绿色环保。一方面增材制造本身减少了原材料浪费,减少了因腐蚀而形成的污染排放;另一方面,印刷本身大多没有高温工艺环节,节省了能源,减少了碳排放。

5) 印刷制造中的喷墨打印方法具有数字化与个性化制造的特征。与 3D 打印的个性化制造特征一样,喷墨印刷电子不需要模板,可以快速制造小批量个性化电子产品。

因此,大面积、柔性化、个性化、低成本、绿色环保是印刷电子制造区别于传统电子制造的主要特征,也是印刷电子技术近年来蓬勃兴起的重要原因。

印刷电子本身作为一个学科领域和技术领域,所涵盖的内容非常广泛。任何电子或光电子制造采用印刷加工方法后都可以称之为印刷电子。目前电子领域有许多新名词,除了有机电子外还有柔性电子、塑料电子、纸电子、透明电子、纺织电子、可穿戴电子等。这些新兴电子领域都区别于传统的微电子,但都与印刷电子有关联,因为这些电子系统除了可以用传统微加工方式制造外,也可以用印刷方式制造。

## 2 印刷电子起源与发展历程

尽管印刷制造具有一系列显而易见的优点,印刷本身也是一个源远流长的技术,但印刷电子的快速发展却并不久远。这主要归因于可印刷电子材料的发展在早期比较缓慢。20 世纪 70 年代,有机导体材料的发现开创了有机电子学这一新学科领域。科学界对有机电子学感兴趣,不仅仅是出于科学好奇心,更重要的是有机聚合物材料有可能制备成溶液态,最终有可能以印刷方式大批量、低成本地制造有机电子器件。因此,有机电子学发展早期即已经有人开始将有机电子材料进行溶液化处理并用于制作晶体管的尝试,到 2000 年时已经出现了全部用喷墨打印方法制备的有机场效应晶体管<sup>[3]</sup>。

有机电子学在一开始发展时就以能够低成本印刷制造为最终目的。但在相当长时期,印刷并没有成为有机电子器件的主流制造技术。这主要是因为溶液态有机电子材料(无论是小分子材料还是聚合物材料)的电荷迁移率(charge carrier mobility, 单位:  $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )总是不如真空蒸发的有机小

分子材料<sup>[4]</sup>。电荷迁移率是指半导体材料中电子(n-型半导体)或空穴(p-型半导体)在外加电场下运动的速度。电荷迁移率的高低决定了晶体管在外电场作用下的开关速度,是衡量半导体材料性能最重要的参数。有机半导体之所以远远不如单晶硅、多晶硅及砷化镓等无机半导体材料,主要表现在电荷迁移率的巨大差异。有机电子材料的另一个缺点是其电学性能受环境影响较大,尤其是空气中水与氧的影响<sup>[5]</sup>。有机电子器件接触到水、氧后会导致器件失效,而印刷制造大多是在空气环境下进行的。提高电荷迁移率与环境稳定性至今仍然是有机电子学研究的关键领域。

如果考察印刷电子相关论文发表的年代分布,可以发现,以“印刷电子”(printed electronics)为关键词的研究论文在 2005 年以后才逐年增加,2008 年以后明显增长(图 2)。其主要原因是无机纳米材料开始被应用于印刷电子技术。2000 年之后,全球性的纳米技术研究形成热潮,各种纳米材料被发现、被创造出来。纳米尺度的无机固体材料(纳米粒子、纳米线、纳米管等)本身具有多种优异的电子与光电性质,远远优于有机电子材料。它们可以通过分散方式制成墨水或油墨,然后用传统印刷方式制成图案。纳米材料本身的性质赋予了这些印刷图案结构以电荷传输性能、介电性能或光电性能,从而形成各种半导体器件、光电与光伏器件,真正体现出印刷技术做为一种低成本电子制造技术的优越性,印刷电子学开始成为一个独立的学科与技术领域<sup>[6]</sup>。2009 年后,国际上开始出现了以印刷电子为专题的国际学术会议。2011 年,国外塑料电子杂志(《+Plastic Electronics》)专文介绍了纳米材料在印刷电子技术中的应用前景,文章标题为《Nanomaterials are becoming synonymous with printed electronics》(《纳米材料正成为印刷电子的代名词》)<sup>[7]</sup>。

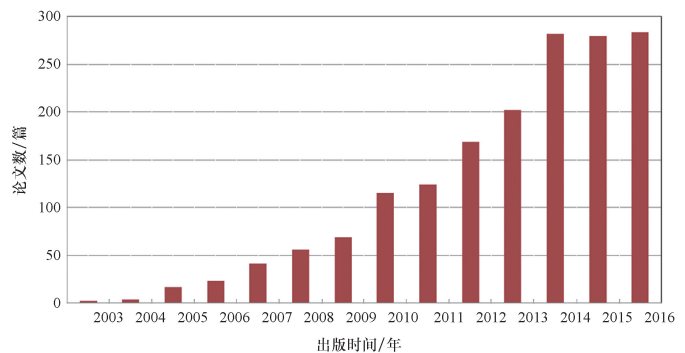


图 2 印刷电子研究论文发表年代分布

(Web of Sciences 统计数据)

Fig. 2 Published papers on printed electronics by years (Statistics from Web of Sciences)

印刷电子引起全球范围广泛关注的标志性事件是 2008 年美国 Kovia 公司宣布开发成功喷墨打印纳米硅墨水制备的柔性射频标签(RFID),以及 2009 年韩国顺天大学发表了通过卷对卷印刷制备基于碳纳米管等无机纳米材料墨水的

RFID 论文<sup>[8]</sup>。尽管这些技术后来并没有成功走向产业化,但让科技界与工业界看到,无机纳米材料的确可以通过印刷集成成为具有晶体管功能的电子器件。无机材料的纳米化使相应的墨水烧结温度降低到普通塑料甚至纸张能容忍的温度,真正打开了印刷电子向大面积、柔性化、低成本制备电子系统的大门。例如,银纳米粒子与银纳米线等纳米尺度的银材料被制成可印刷的且可以低温烧结的墨水或浆料,已大量用于印刷导电路线与电极,成为迄今为止应用最广泛并最成功的印刷电子材料<sup>[9]</sup>。

2009年,以欧洲地区参加人员为主的大面积有机印刷电子国际会议(Large-area Organic and Printed Electronics Conference, LOPEC)首次在德国举办。此前欧洲只有与有机电子技术相关的学术会议。同是在2009年,以亚洲地区参加人员为主的首届柔性印刷电子国际会议(International Conference on Flexible and Printed Electronics, ICFPE)在韩国举办。这两个代表性国际会议都将印刷电子列为会议核心议题。在此之前,国际上只有英国市场调查公司IDTechEx每年举办的小规模印刷电子相关会议。2012年,由韩国倡导成立了国际印刷电子标准委员会,成为国际电工委员会IEC下属的一个新的标准化制定组织。自2009年以来,多个工业发达国家包括欧盟委员会都开始了与印刷电子技术研发相关的政府研究计划。例如,2009年英国成立了国家印刷电子中心;2010年韩国也建立了国家印刷电子中心。2011年日本成立了日本先进印刷电子技术研究协会(JAPER);2012年韩国启动国家印刷电子发展计划,计划在6年时间内投资1725亿韩元(约合10亿人民币),发展印刷电子全产业链技术(total solution)。同年,韩国也成立了国家印刷电子协会(KoPEA)。除了政府机构的研究计划外,科技界与工业界都开始将注意力转向这一新兴技术领域,这从图2的论文发表情况可见一斑。

中国的印刷电子发展起步稍晚。笔者2011年初到韩国国家印刷电子中心参观时曾见到该中心的大厅悬挂一幅“印刷电子世界地图”(图3)。全球研发印刷电子技术的国家(地区)都标注在该地图中,但中国的位置上是空白。说明中国在印刷电子领域的工作至少在2010年之前不为国外所知。



(图片来源:2011年初摄于韩国国家印刷电子中心)

图3 印刷电子世界分布

Fig. 3 World map of printed electronics

2009年10月笔者入选中组部“千人计划”特聘专家并全职回国加入中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所,决心在中国开展印刷电子研究,并于2010年在苏州纳米所创建了“印刷电子技术研究中心”。这在当时应该是中国第一个挂牌“印刷电子”的研究机构。2010年7月,笔者在苏州主办了中国首届印刷电子技术研讨会;2011年联合北京印刷学院等单位,发起成立了中国印刷电子产业创新联盟;2012年应邀出席了在韩国首尔召开的国际印刷电子标准委员会成立大会。中国印刷电子技术的研发与产业化活动从此进入国际视野。

自2010年起中国印刷电子研讨会至今已举办了6届,参会人数由首届只有20余人到2016年200余人。2014年,中国还首次主办了第5届国际柔性与印刷电子大会(ICFPE)。除了学术研讨外,自2012年以来每年在上海还举办与产业相关的印刷电子产业论坛。2013年,由天津大学邹竟院士领衔撰写并向中国工程院提交了“中国印刷电子产业政策研究”的调研报告。2013年底,科技部高新技术中心组织了“西苑论坛”,召集国内专家研讨中国发展印刷电子的方案<sup>[10]</sup>。2014年,由TCL研究院牵头组织了3次研讨会,研究中国发展印刷显示技术的规划。在此基础上形成了科技部重点研发计划“印刷显示”专项指南,并于2015年发布。2016年,有7个印刷显示项目得到科技部专项资金的支持。2017年,科技部继续发布了印刷显示相关的重点研发计划指南。印刷显示成为印刷电子技术产业化方面的突破口,得到国家的优先支持。在其他方面,中国的印刷电子装备、印刷电子材料等均已开始打开国内国际市场。

### 3 印刷电子技术与产业现状

实现印刷电子制造主要涉及到5方面的技术:基底材料、可印刷电子材料、印刷设备、印刷工艺、系统设计与集成。其中基底材料与印刷设备基本是现有技术。由于印刷本身是增材制造,对基底材料没有特殊要求。基底材料的选择主要取决于特定的产品形态,例如柔性化、低成本要求等。印刷设备方面已经有传统印刷工业作为基础。当然,印刷电子与印刷报纸不同。印刷电子对设备有更高的要求,包括对各种电子墨水材料的兼容性、多层电子材料印刷的套印精度等。目前,国外许多传统印刷与涂布设备制造厂商已经开始关注印刷电子技术的发展,开发出一些印刷电子专用设备,包括喷墨打印、丝网印刷、凹版印刷、柔版转印等设备。分辨率在1 μm左右的静电喷墨打印和5 μm左右的凹版印刷都已有商品化设备。一些设备已开始进入中国市场。以喷墨打印机为例,国外各种类型的喷墨打印系统都可以在中国大学与科研单位见到。一些大型的价值上千万元人民币的印刷系统也已购入中国。中国本土印刷电子设备企业开始成长起来,其印刷电子设备已经进入或开始进入中国市场,并向国际市场扩张。

印刷电子材料是印刷电子的重点研究领域,实现印刷电

子制造的前提是要有针对应用需求的电子墨水材料。电子墨水分为有机与无机两大类。有机电子材料的最大特点是分子可设计性。通过有机合成技术可以创造出不同的新型有机电子材料,不断发现性能更好的材料。过去40年有机电子技术发展史也是不断创造新材料,不断提高有机电子材料性能的历史。有机电子材料本身又分为聚合物材料与小分子材料。有机聚合物电子材料的特点是易于溶液化,可印刷性好,但电学性能不如小分子材料。而小分子材料恰好相反,电学性能胜过聚合物材料,但不易溶液化,更适于真空蒸发沉积。最近几年,有机电子材料发展有了大幅度进步,电荷迁移率与环境稳定性都有明显提高,这方面的研究导致了大量论文的发表,但距实际应用要求仍有差距。无机纳米材料的可选择种类则非常有限。将无机纳米材料应用于印刷电子的主要技术障碍是如何将它们墨水化。无机纳米材料的通常形态是纳米粒子、纳米线、纳米片或纳米管等。制备无机纳米材料墨水的主要途径包括将纳米粉体包覆表面活性剂并分散在溶液中,或者将其前驱体溶液印刷后再还原成本体纳米材料。由于无机纳米材料具有天然的优异电学性能与环境稳定性,基于无机纳米材料的电子墨水更具有实用性,因而更先一步市场化。以纳米银导电墨水为例,国内外已有众多公司推出种类繁多的基于纳米银粒子与纳米银线的商品导电墨水或浆料。印刷纳米银的电子电路也成为最常见的印刷电子应用实例。

印刷电子墨水必须转化固体形态才能表现出应有的电学性能。实现电子墨水向固体转化的主要方法是烧结,包括高温烘烤烧结或光子辐照烧结。有机电子墨水一般不需要高温烧结,大多也不允许高温处理。无机电子墨水则通常需要高温烧结。发展纳米尺度的无机印刷电子材料的一个重要原因是把烧结温度降下来。当无机纳米材料单体的尺度减小至100 nm以下,所制备的墨水材料烧结温度一般可以降到150℃以下,达到一般塑料基材可容许的温度。另一种方法是光子烧结,可以在不提升基底材料温度的条件下实现纳米墨水材料的高温烧结。因为某些波长的光子能量可以选择性地被金属纳米材料吸收产生高温,但对基底材料无吸收或吸收很少,避免基底材料被高温损伤。除了烧结工艺外,印刷工艺还包括基底表面处理工艺,包括表面亲水或疏水处理,以增加墨水在基底表面的黏附力或减少墨水在基底表面的横向扩散。成功的印刷电子制造是印刷设备、印刷电子材料与印刷工艺相互匹配、相互适应的综合作用结果。

与有机电子不同,印刷电子不是一个基础科学领域,不需要去发现发明新的分子与材料。印刷电子是一个技术领域,是用一种新的方法制造电子。因此,印刷电子从一开始就与产业密切关联,而且被产业界看好。2010年,英国市场调查公司IDTechEX曾预言,印刷电子的市场未来将会像微电子一样有爆发式增长,2019年可达到570亿美元。现在距当年的预测已经过去7年了。反观过去7年印刷电子产业化的进程,其市场规模并不如当年预测的那样大幅度增长。一

些高显示度的技术与产品,例如美国Kovio公司的印刷纳米硅RFID标签、美国Konacac公司的印刷有机太阳能电池等都没有等到市场爆发就破产了。这些产业未能成功的原因有很多,但其中重要一条是如何面对市场的竞争。印刷电子这一概念尽管很吸引人,但如果不是创造了一种前所未有的产品,则必然要面对现有技术与产品的竞争。印刷RFID要面对现有极低成本RFID标签竞争,印刷有机光伏要面对现有高效率低价格的晶硅光伏的竞争。

印刷电子产业化比较成功的一个领域是触摸屏技术领域。苹果手机的成功让电容式触摸屏技术家喻户晓。以往触摸屏中使用的透明导电膜都是基于一种氧化铟锡(ITO)的透明导电材料。ITO除了材料成本高之外,所制成的透明导电膜电阻比较高,柔性比较差,而且制造工艺复杂。近年来出现了一批印刷纳米银制造透明导电膜的替代技术,包括印刷纳米银的金属网栅,或涂布纳米银线的透明导电膜。它们都具有更好的导电性与柔性,制造工艺也更简单。尽管ITO透明导电膜制造商通过降价拼力反击,力图保住ITO现有的市场,但这些印刷纳米银的透明导电膜已经开始侵蚀ITO的市场,尤其在大尺寸触摸屏市场取得显著成功。

中国印刷电子产业仍处于起步阶段。本研究组自2010年开始在国内研发印刷电子技术,并推动印刷电子在中国的宣传普及,包括出版了中国第一本印刷电子方面的中英文专著,并在各种会议上介绍印刷电子。观察到一个现象是,中国产业界对印刷电子的关注明显高于科技界。其原因是印刷电子本身毕竟没有太多的基础科学问题需要研究,更多的是实施过程中的技术问题。但产业界很被“印刷”这个新概念所吸引。产业界人士通常将印刷电子与印刷报纸类比,觉得如果实现印刷制造电子,将会对多个传统产业产生极大冲击,例如传统印刷产业、印刷电路板产业等。笔者所在印刷电子中心近年来接待了多批来访企业,均希望了解印刷电子及其产业化前景。

中国印刷电子产业化的成功率先体现在触摸屏领域。印刷电子中心科研团队于2012年开发成功一种混合印刷纳米银制备金属网栅透明导电膜的技术。用该技术制备的透明导电膜方阻可以小于1 Ω,同时保持88%的透光率,而且可以卷对卷连续生产制造<sup>[1]</sup>。该技术已在中国触摸屏龙头企业南昌欧菲光实现大规模量产,达到月产150万片金属网栅透明导电膜触摸屏的产能。集成了这种透明导电膜的中大尺寸触摸屏产品自2014年开始进入国际知名电脑品牌市场。这项技术的发明专利获得了2014年中国专利金奖<sup>[2]</sup>。国内还有多家企业开发了涂布纳米银线的透明导电膜技术,也都取得了不同程度的产业化成功。其他如印刷石墨烯或碳材料制造的加热或散热产品等已经进入市场。中国科学院自2013年实施了聚焦纳米制造的先导专项,其中包括绿色印刷电路的项目,目标也是定在产业化上。自2016年开始实施的国家重点研发计划印刷显示项目群,更是将产业化与建立产业示范线作为项目的最终目标。

#### 4 印刷电子面临的挑战

印刷电子这一概念很吸引人,但真正要实现像印刷报纸那样印刷电子,还有诸多技术与产业化、市场化方面的挑战。首先,印刷电子技术本身有局限性。1) 印刷加工的图形分辨率远低于传统微纳米加工。目前印刷所能实现的最细线条约 1  $\mu\text{m}$ ,而集成电路加工的图形尺寸已到 10 nm 范围。2) 印刷电子的前提是具备能够印刷的电子墨水材料,但目前这类材料种类有限,而且性能普遍低于对应的固体材料,印刷的电子器件性能也低于通过传统微纳米加工制备的器件。3) 电子器件通常需要多层结构。印刷多层结构受到套印精度的限制。印刷套印精度通常远远低于微纳米加工的多层对准精度。4) 印刷电子墨水要恢复原有材料的性质需要固化与烧结过程。对某些材料,这种烧结的温度可能很高,因而限制了基底材料的选择范围,烧结固化后的材料性质通常很难恢复到该固体材料的原有性质,如导电性。5) 由于印刷电子器件与传统微电子器件的差别,现有微电子设计方法与设计软件无法直接应用于印刷电子设计。

印刷电子产业化方面还有大量的技术开发工作要做。认为传统印刷企业可以直接转成印刷电子,或电路板可以直接采用印刷方法制造(注意:传统印刷电路板 PCB 并不是印刷制造的),这些都是传统行业对印刷电子的认识误区。印刷电子所需要的印刷技术比印刷报纸要复杂的多,包括电子墨水的适印性,以及多层电子墨水印刷的套印精度等。目前印刷导电墨水的导电性与精度等方面都还没有到达传统 PCB 的使用要求。印刷电子最吸引人的应用,即印刷晶体管还远没有到达实用化的水平。目前有些产品开发采用了有机或无机半导体墨水制备晶体管,但大多仍依赖光刻等传统工艺来实现晶体管结构的图形化,并不是真正意义上的全印刷晶体管。印刷制备的太阳能电池产品在稳定性与封装方面还有很多技术问题要解决。

除非印刷电子能够创造一种革命性的前所未有的产品,否则印刷电子产品必须和其他电子产品一样,到市场上参与竞争。印刷电子产品有其产品形态(柔性化、塑料基、纸基)的特点,但也有性能上的劣势。以 RFID 标签为例,传统 RFID 芯片小于毫米见方,可以集成数万个晶体管。印刷 RFID 除了印刷的天线外,在有限的标签面积上只能印刷 1000 余个晶体管,其性能自然远不能与集成了数万个晶体管的 RFID 芯片相比。而且芝麻大小的 RFID 芯片也可以安装在柔性的 RFID 天线上,实现柔性的 RFID 标签。所以,印刷电子市场化面临的挑战是如何创造具有差异化、给予用户新的使用体验的产品,可以与现有微电子技术互补的产品。至于印刷电子的低成本特点,只有通过大批量生产才能体现出来。小批量制造的印刷电子产品并不一定能做到低成本。

#### 5 印刷电子前景展望

印刷电子是一个新的领域,本身发展不过 10 年左右。印刷电子是多种现有技术的综合体,不像有些新技术,需要经

过数十年的研发才能最终走向产业化。印刷电子在多个应用领域的产业化已初露端倪。尽管过去数年的市场现实与早期的乐观预测有较大差距,但全球科技界与产业界对印刷电子的关注度并没有减弱,反而越来越高涨。2017 年 3 月底在德国慕尼黑召开的 LOPEC 国际会议吸引来自全球 47 个国家约 2500 余人参加,比 2016 年增加了 20%。同时有来自 17 个国家的 154 个参展商在会议期间展示了他们的技术与产品。众多参展商展出样品,无论上游材料与设备,还是下游终端产品,全球印刷电子的确处于蓄势待发的前夜。笔者持这种乐观看法的理由是,印刷电子可以在太多的领域发挥作用。图 4 是印刷电子潜在的领域,该信息来源于国际有机电子协会(OE-A)在 2015 年发布的有机与印刷电子技术报告<sup>[13]</sup>。所谓“潜在”的应用领域意味着印刷电子技术与产品还没有大规模进入这些领域,但由于前面所述印刷电子的独特性,有可能取代现有的技术或创造新的应用场景与用户体验。一旦被市场所接受,全面爆发只是时间问题。

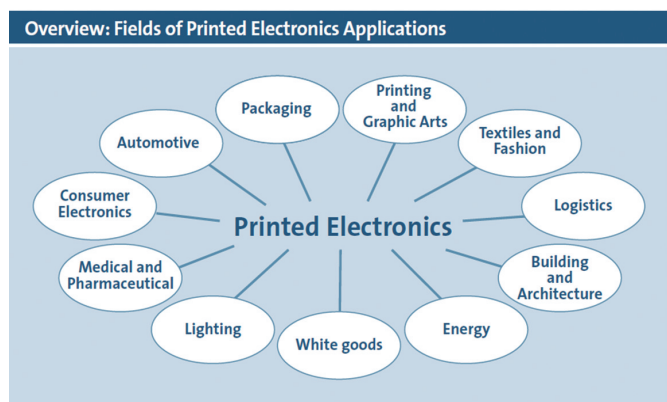


图 4 印刷电子应用领域

Fig. 4 Printed electronics applications by sectors (OE-A report, 2015)

笔者对印刷电子发展前景持乐观态度的另一个理由是物联网应用在可预见未来的全面爆发。物联网(IoT)不仅仅是“网”,更重要的是“物”。将“物”联到“网”,需要海量的与“物”相连的传感器。国外在 2013 年就已经预测到在未来 10 年内要实现物联网,全球需要万亿个传感器,进入所谓“万亿传感器社会”<sup>[14]</sup>。这万亿传感器不可能完全依赖于硅基集成电路制造工艺实现。海量的处于价值链低端的“物”需要有与本身价值相匹配的传感器,国外在 2013 年就已经预测,印刷制造将成为实现万亿传感器的重要途径之一。基于印刷电子技术的智能标签与传感器具有天然的低成本属性,可以将网连接到海量的低价值物端,实现真正意义上的物联网。

与物联网相连的传感器将有相当大一部分是柔性传感器。图 5 是已经可以预见的物联网(IoT)柔性传感器的应用领域,包括用于物流追踪与溯源以及防伪的智能包装、冷链运输监测、电子票证、电子标识符显示、建筑与机械结构件疲

劳与失效监测、健康医疗监测与检测、机器人智能皮肤等众多领域<sup>[15]</sup>。而实现柔性传感器制造的最便捷、最低成本的技术是印刷电子技术。相信这一类传感器产品随着物联网的发展将出现巨大的市场需求。

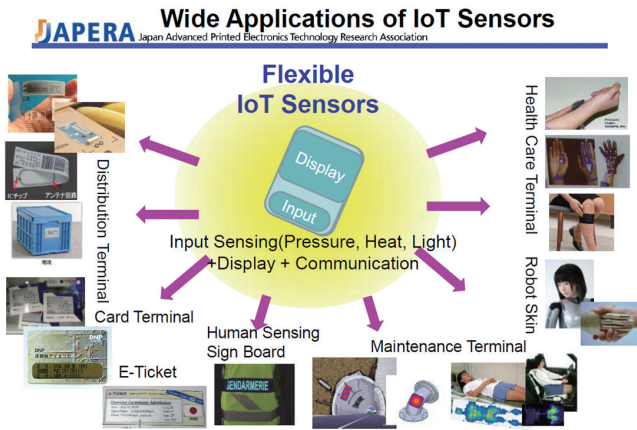


图5 柔性传感器在物联网中的应用领域  
Fig. 5 Application areas of flexible sensors in the Internet of Things (IoT)

针对电子电路全印刷制造的技术难度,尤其是晶体管的印刷制造尚未成熟,近年来一种新的技术方案获得产业界的高度重视,即“柔性混合电子”方案(flexible hybrid electronics, FHE)。图6说明了柔性混合电子技术的特点<sup>[16]</sup>。

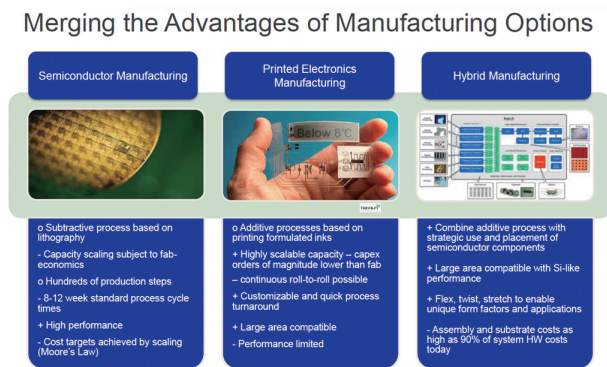
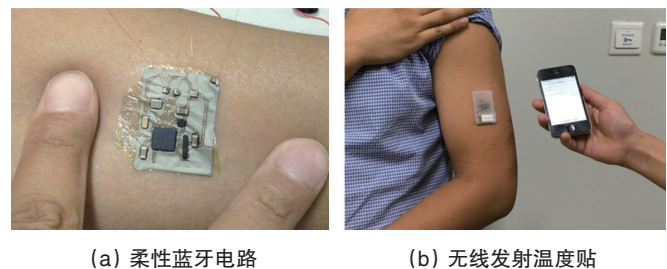


图6 柔性混合电子技术路线  
Fig. 6 Technology route of Flexible Hybrid Electronics (FHE)

所谓“柔性混合电子”是指将硅基集成电路芯片与微传感器等传统固体器件与柔性基底材料结合,形成柔性化的电子电路系统。这类电子电路既保留了传统微电子固体器件的高功能,又体现了轻、薄、柔与小型化以及以人为本的未来电子电路系统发展趋势,将在汽车、通信、健康医疗、消费类电子等众多领域有广泛应用。这一技术路线结合了传统集成电路芯片的强大功能与印刷电子的大面积、柔性化、低成本的优势,补足了目前印刷晶体管性能有限的短板,为微电子固体电路找到了柔性化的新路径,可以满足市场的现时需

求。美国联邦政府在2015年出资7500万美元,在加州硅谷建立一个“柔性混合电子制造创新研究院”(Manufacturing Innovation Institute for Flexible Hybrid Electronics)。该项目计划5年时间在硅谷建立一个融合成熟的硅集成电路芯片技术与新兴的柔性印刷电子技术的创新平台。除了国防部的7500万美元投资外,该创新平台还将吸引工业界、地方政府及大学等联邦政府外的投资6500万美元。参与该平台建设的包括96家美国公司、11个专业实验室、42所大学与14个州及地方政府机构。柔性混合电子的技术路线大大缩短了柔性印刷电子从实验室到市场的路程,将可以尽早实现柔性电子的大规模市场应用。

本研究组自2013年以来即开始投入柔性混合电子技术的研发。采用市场已有各种电子元器件与集成电路模块,充分发挥印刷电子优势,与印刷制备的柔性电路基底相结合,研发成功一系列具有复杂功能的柔性电路系统(图7)<sup>[17]</sup>。图7(a)是印刷电子中心研制的柔性蓝牙电路。整个电路制备在只有2 μm厚的塑料薄膜上,蓝牙芯片等固体器件通过印刷制备的导电路径连接成系统,既实现了柔性化又具备所有蓝牙无线发射的全部功能。图7(b)是在柔性蓝牙电路基础上集成了温度传感器与微型锂电池构成的无线发射温度贴,可以贴敷在皮肤上实时监测体温并无线发射到手机应用端。该温度贴已经具备了可穿戴温度传感器的基本功能,而这些功能是目前有机全印刷电子技术都还无法实现的。



(a) 柔性蓝牙电路 (b) 无线发射温度贴

图7 基于印刷电子技术的柔性混合电路  
Fig. 7 Examples of printed flexible hybrid electronics

结合印刷电子技术的柔性混合电子打破了过去长期认为印刷电子性能不行的魔咒,让印刷与柔性电子技术更贴近市场,更符合实际应用的需求。从2017年3月在LOPEC国际会议上的参展技术来看,各种柔性混合电子展品已大量涌现,与传统技术相比,其柔性化的特征非常显著。这种柔性混合电子也开始渗透到纺织电子与智能服装领域,印刷电路加传统电子器件与纺织面料结合,形成各种可穿戴的传感监测系统,成为未来柔性印刷电子发展的一个重要领域。

## 6 结论

印刷电子作为一个新兴电子制造技术领域,发展的时间并不长。各种相关技术本身还需要不断完善和创新,包括研究更高分辨率的印刷技术、更好性能的可印刷电子墨水材

料。但印刷电子本身不是一个基础研究领域,它的落点应该是产业化应用。因此,如何在现有的市场需求和未来可能出现的市场需求中找到印刷电子技术的应用点,应该是科技界与工业界关注的焦点。根据应用需求创新完善印刷电子技术应该是这一技术本身未来发展的重点。中国自2016年开始由国家出面组织的印刷显示技术研发计划,将有希望在未来数年中从有机发光显示这个应用点上实现印刷电子的产业化突破。随着科技界与工业界的深度参与,可以期待印刷电子技术将渗透到越来越多的已有行业领域,并创造出新的行业与新的市场。

### 参考文献 (References)

- [1] 崔铮, 苏文明, 赵建文, 等. 印刷电子学: 材料, 技术及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.  
Cui Zheng, Su Wenming, Zhao Jianwen, et al. Printed electronics: Materials, technologies and applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [2] 崔铮. 微纳加工技术及其应用[M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2013.  
Cui Zheng. Micro-nanofabrication technologies and applications: Principles, capabilities and limits[M]. 3rd Edition, Beijing: Higher Education Press, 2013.
- [3] Sirringhaus H, Kawase T, Friend R H, et al. High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits[J]. Science, 2000, 290(5499): 2123-2126.
- [4] Kelley T. Organic electronics: Materials, manufacturing and applications [M]. Weinheim Boschstrasse, Germany: Wiley-VCH, 2006.
- [5] Lewis J S, Weaver M S. Thin-film permeation-barrier technology for flexible organic light-emitting devices[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(1): 45-57.
- [6] 崔铮. 印刷电子的前世今生[N]. 科技日报, 2012-06-29(08).  
Cui Zheng. Past and present of printed electronics[N]. Science and Technology Daily, 2012-06-29(08).
- [7] Rogers D. Nanomaterials are becoming synonymous with printed electronics[J]. +Plastic Electronics, 2011, 3(6): 35.
- [8] Jung M, Kim J, Noh J, et al. All-printed and roll-to-roll-printable 13.56-MHz-operated 1-bit RF tag on plastic foils[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57(3): 571-580.
- [9] Kamysny A, Magdassi S. Conductive nanomaterials for printed electronics[J]. Small, 2014, 10(17): 3515-3535.
- [10] 杨斌, 滕继濮. 印刷电子技术: 为电子产业带来更多可能[N]. 科技日报, 2014-04-04(06).  
Yang Bin, Teng Jipu. Printed electronics bring more possibilities to electronic industry[N]. Science and Technology Daily, 2014-04-04(06).
- [11] Cui Z, Gao Y L. Hybrid printing of high resolution metal mesh as transparent conductor for touch panels and OLED displays[J]. Sid Symposium Digest of Technical Papers, 2015, 46(1): 398-400.
- [12] 崔铮, 高育龙, 陈林森, 等. 图形化的柔性透明导电薄膜及其制法: ZL201110058431.X[P]. 2012-10-09.  
Cui Zheng, Gao Yulong, Chen Linsen, et al. Patterned flexible transparent conductive film and fabrication: ZL201110058431.X[P]. 2012-10-09.
- [13] Organic and Printed Electronics Association(OE-A). Organic and Printed Electronics, Applications, Technologies and Suppliers[M/OL]. 6th Edition. (2017-06-05). <http://www.oe-a.org/downloads>.
- [14] Anon Trillion sensors roadmap[C/OL]. (2013-08-23)[2017-05-05]. TSensor Summit 2013: 23-25. <http://www.mancef.org/tsensors-trillion-sensors-summit/>.
- [15] Shinichin N. Flexible printed electronics technologies by JAPER[A/C/OL]. [2017-05-05]. [http://www.printedelectronicsnow.com/contents/view\\_breaking-news/2015-02-05/oe-a-expands-its-international-network/](http://www.printedelectronicsnow.com/contents/view_breaking-news/2015-02-05/oe-a-expands-its-international-network/).
- [16] Melissa Grupen-Shemansky. Collaboration and development of a flexible hybrid electronics ecosystem[C]/Large-area, Organic & Printed Electronics Convention(LOPEC) Conference. Messe München: Organic and Printed Electronics Association, 2017.
- [17] Yuan W, Gu W B, Lin J, et al. Flexible and stretchable hybrid electronics systems for wearable applications[J]. Sid Symposium Digest of Technical Papers, 2016, 47(1): 668-671.

## Printed electronics: Past, present and future

CUI Zheng

Printable Electronics Research Center, Suzhou Institute of Nanotech and Nanobionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China

**Abstract** Printed electronics as a newly emerged electronics discipline has received increasing attention in recent years. Electronic and optoelectronic devices and systems fabricated by printing are of several distinctive advantages, such as large area, flexible, customizable, low cost and environmental friendly. Though printing's resolution is not as high as conventional microfabrication, the above advantages are enough to warrant many new applications. This article gives a comprehensive introduction of the definition of printed electronics, its origin and development history. Based on the author's own many years experience, the technology and commercialization challenges for printed electronics are analyzed. The future development trend is described. It is hoped that this article will give readers an overview of the new technology.

**Keywords** printed electronics; flexible electronics; inorganic nanomaterials; internet of things; green manufacturing

(编辑 王志敏)