

纳米科技引领绿色印刷新时代

——变革性纳米产业制造技术聚焦纳米绿色印刷与器件制造技术项目研究进展*

变革性纳米产业制造技术聚焦纳米绿色印刷与器件制造技术项目研究团队^{1,2,3,4,5,6}

- 1 中国科学院化学研究所 北京 100190
- 2 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 江苏 215123
- 3 中国科学院福建物质结构研究所 福建 350002
- 4 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050
- 5 中国科学院自动化研究所 北京 100190
- 6 国家纳米科学中心 北京 100190

摘要 发展纳米制造技术是从纳米材料到器件规模化制造与应用发展的核心内容。传统的印刷技术主要是基于感光 and 刻蚀工艺，造成严重的环境污染和资源浪费。绿色印刷是一种增材制造技术，可以从源头大幅度降低能耗和减少环境污染。开发绿色印刷制造技术对我国相关产业的可持续发展具有重要的战略意义。同时，绿色印刷制造与传统微纳加工方法的结合，为器件的制造与集成提供了新的可能途径与方法，可望对产业制造技术产生变革性影响。文章介绍了纳米绿色印刷与器件制造技术项目的研究背景、项目目标与实施概况，以及已经取得的创新成果。

关键词 纳米制造，绿色印刷，印刷电子，3D打印，器件制造

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.09.017

1 研究背景

纳米制造技术在信息、材料、环境、能源、生物、医学和国防安全等领域都有重要的研究价值和广阔的应用前景，是国际科技前沿的热点研究领域之一^[1-3]。世界各国高度重视纳米制造技术的研究与开发，许多国家制定了国家战略和计划。在过去的20余年里，美国、日本、英国、法国和德国先后对纳米技术给予持续的资金资助，并把纳米制造列为重要研究方向^[2]。我国也积极参与促进纳米科学的基础研究和应用发展。国家自然科学基金委将“纳米制造的基

*资助项目：中科院变革性纳米产业制造技术聚焦战略性先导科技专项纳米绿色印刷与器件制造技术项目（XDA09020000）

修改稿收到日期：2016年8月18日

基础研究”列为“十一五”重大研究计划进行支持^[1-3],并将纳米制造定义为纳米结构制造、纳米精度制造和跨尺度(微观、介观和宏观)制造^[4]。

印刷技术是实现材料图案化的有效方式,是纳米制造技术的重要组成部分。但传统的印刷制造技术主要是基于感光 and 刻蚀工艺,造成严重的环境污染和资源浪费,大大限制了其可持续发展。

(1) 作为世界第三大印刷市场,印刷业已经发展为对我国国民经济有重要影响的行业之一,并被列为我国《文化产业振兴规划》中重点发展的九大文化产业之一。2014年全国共有印刷企业10.5万家,实现印刷总产值10 857.5亿元^[5]。然而,印刷产业链中版基制造(因电解工艺产生大量废液和固体废弃物)、制版过程(感光冲洗废液排放)以及油墨污染(挥发性有机化合物排放)三大严重环境污染问题使印刷业成为高污染行业之一,更是制约其可持续发展的关键问题之一。

(2) 目前中国已成为世界最大的印刷电路生产国,销售额、产量、进出口额居世界第一。传统的印刷电路制造主要是基于感光 and 刻蚀工艺,80%以上的非电路部分金属材料需要通过曝光腐蚀去除,造成严重的环境污染和资源浪费。

(3) 3D打印技术是对全球制造业具有变革性影响的一项新兴产业技术,可以实现直接从计算机数字模型到3D实物产品的制造。这种直接数码制造技术可以大幅度简化生产设备和工艺、提高生产效率、降低生产成本、减少材料浪费,并可以实现个性化产品制造和制造传统技术难以实现的复杂3D产品。因而,3D打印技术不仅可能改变传统制造业的大规模生产模式,更将对今后社会经济的发展产生深远影响。

(4) 氮化镓(GaN)基蓝光激光器和相变存储器(PCRAM)的发展瓶颈与先进的纳米制造技术的缺失紧密相关。作为第三代半导体的GaN基半导体材料,具有

优异的物理和化学性能,GaN基纳米光电器件和PCRAM在印刷、大型数据中心、可穿戴设备等多个领域将有广泛应用。GaN基蓝光激光器是目前国际上GaN基半导体材料与器件领域研究开发的重点,GaN基蓝光激光器可以带动低功耗、高性能的绿色印刷制造等领域产业的技术革新。PCRAM在密度方面有巨大潜力,且与最先进的CMOS^①技术兼容,被公认为继DRAM和Flash后可实现商用化的新型存储技术。PCRAM的存储单元功耗、速度、寿命与数据保持力等性能居国际前列并具有进一步探索多值存储的可行性,其将增强我国消费性电子产品的技术含量与市场竞争力,实现存储器更新换代,推动我国信息产业的快速发展。

基于以上现状,开发绿色印刷制造技术对我国相关产业的可持续发展具有重要的战略意义。2013年中科院启动了战略性先导科技专项“变革性纳米产业制造技术聚焦”,并在该专项下设置了项目“纳米绿色印刷与器件制造技术”,其中包含“绿色印刷”“绿色印刷电路”“3D打印制造”和“器件制造”4个课题,期望通过系统解决“绿色印刷制造技术”在印刷、电子、3D打印等领域的应用关键技术和工艺,最终实现示范应用或推广,从而积极推动传统印刷技术向“绿色化、功能化、立体化、器件化”发展,大大缓解甚至从根本上解决传统工业制造方式对我国自然环境造成的严重污染,提升我国纳米绿色印刷和器件制造产业的核心竞争能力。

2 项目目标和研究内容

2.1 项目目标

通过纳米材料和印刷技术的创新,针对印刷产业链和印刷电路中产生严重污染的生产环节,采用印刷增材制造技术,形成从纳米材料到装备和软件的系统技术集成,从根本上解决印刷与电路制造等重要产业制造过程的环境污染问题。并通过3D打印材料和技术及器件制造

① 互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor)

的系统创新,提升我国相关制造业的核心竞争能力。

2.2 研究内容

(1) **绿色印刷**。突破目前通过电化学阳极氧化制备印刷铝版基的技术思路,研发非电化学的纳米涂层绿色版基制备新技术。将纳米功能涂层材料通过特定工艺涂布在普通铝板表面,实现其表面粗糙度和浸润性可控,并达到耐印力和保水性等印刷适性要求;研究量产化纳米涂层材料的生产工艺,建立百吨级生产线;实现年产能六百万平方米绿色版基的规模制备。解决水性绿色油墨在不同表面能的基材(纸张、塑料等)表面的铺展和粘附问题,同时提高油墨的存储稳定性和印刷适应性;开发绿色油墨的量产技术,形成稳定的产业制备工艺包;实现千吨级/年绿色油墨的生产能力。

(2) **绿色印刷电路**。纳米导电油墨的制备及其在不同承印物上的可控铺展和浸润性调控是该技术要解决的关键问题,其中包括金属纳米粒子及其导电油墨的规模制备技术、承印物表面的批量化处理技术及承印物表面性质对墨滴铺展影响的研究等;对传统印刷设备的改造以及印刷电子规模生产设备的开发等;形成年产十万公斤导电油墨、一亿片RFID天线、一千万片平板电脑触摸屏的生产能力。

(3) **3D打印制造**。开发满足3D打印制造需求的纳米材料和关键设备,解决3D打印设备高速、高精度控制材料异质界面结构和性能控制等系列关键技术问题;集中突破激光3D打印平台和喷墨3D打印平台两个方向,研究相应的软件控制系统和高速图形处理模块,实现与3D打印相关的激光器、喷墨打印头、3D打印功能材料的产业化;建成年产十吨纳米3D打印材料、年产一万个喷墨打印头、1千台激光器和3D打印机、十万件3D打印产品的生产线。

(4) **器件制造**。研究GaN基激光器结构设计、MOCVD材料生长及激光器芯片工艺可控制备技术,实现GaN基激光器的可控制造;研究激光器低热阻封装技术和激光器失效机理,研制成功输出功率大于500 mW、寿命大于5000小时的GaN基蓝光激光器。开发PCRAM

限制型单元结构纳米均匀填充技术,并通过理论模拟进行结构优化,突破28 nm PCRAM芯片关键的单项与集成工艺,实现一款GB量级PCRAM试验芯片。

3 项目实施情况综述

纳米绿色印刷与器件制造技术项目由中科院化学所、中科院苏州纳米技术与纳米仿生所、中科院上海微系统与信息技术所、中科院福建物构所、中科院自动化所、国家纳米中心共同组织实施,充分发挥了中科院多学科交叉、大团队研究的综合优势。项目团队围绕“目标清、可考核、用得上、有影响”的要求,以引领印刷产业“绿色化、功能化、立体化、器件化”发展思路为主线,突出应用与市场导向,凝练研究内容,聚焦关键突破,强化企业合作,形成产业影响;通过近两年多的协同攻关,取得一系列重大进展。

(1) 实现绿色版基、绿色制版和绿色油墨的完整印刷产业链技术突破,系统解决印刷产业的污染问题;入选中科院“十二五”25项重大科技成果及标志性进展^[6]。建成世界首条百万平方米绿色版基生产线,并与产业化公司绿色制版中心的商业模式创新相结合,加快绿色印刷技术在印刷集中区的示范推广。

(2) 研发出嵌入式纳米材料印刷金属网栅柔性透明导电膜,并实现批量化生产和应用,销售收入达数亿元;同时,采用绿色印刷电子技术印制的射频标签产品成功在科技周、北京APEC会议及地铁票得到示范应用。

(3) “3D打印”突破了一批具有自主知识产权的3D打印核心关键技术,形成了系列重大创新成果,其中超快速连续数字投影打印技术、高精度多层柔性电路全打印制备技术、金属3D打印技术居于国际领先水平,并向产业下游延伸。压电喷头制造工艺取得重要进展。

(4) 发展纳米器件制造技术,研究GaN基材料MOCVD方法生长机制及激光器芯片制备工艺,实现GaN基激光器的可控制造;研究激光器低热阻封装技术和激光器失效机理,研制成功输出功率大于500 mW,

寿命大于 5 000 小时的 GaN 基蓝光激光器。发现并设计了自主知识产权的高速、低功耗 TiSbTe 新型相变材料与限制型相变单元结构；12 英寸 40 nm 技术 64MB 容量 PCRAM 芯片晶圆级良率~40%；为研制基于 28 nm 新型 CMOS 技术的 GB 量级 PCRAM 芯片奠定了坚实的基础。

项目实施期间，注重技术创新与系统集成的紧密结合，为合作企业面向市场的产品开发提供技术支持与保证，并借助企业的力量加快技术成果转化。为保证“用得上、有影响”，所有课题关键技术都与企业开展实质性合作，并积极参与行业发展规划，加快产业化进程。

4 重大创新成果

4.1 世界首条百万平方米绿色版基生产线建成

传统印刷版基因电解氧化工艺存在严重的高耗能及大量的废酸、废液排放，给周围环境及人员健康带来严重的隐患。为推动传统版基制备工艺实现绿色、清洁化生产，促进印刷版材生产技术的变革创新和工艺转型，中科院化学所研究人员基于前期绿色制版技术的研发基础，提出一种免砂目的绿色版基制备技术，即将纳米颗粒涂层材料通过特定的涂布工艺在铝版表面构造出特殊的微纳米结构，从而实现印刷过程对水和油介质的浸润性调控。该技术工艺简捷、成本低廉且绿色环保，其规模化生产后必将在全国印刷版材行业起到示范和引领作用。该技术荣获第二届全国印刷行业重点创新成果（特别突出成果，全国共两项）。

在先导科技专项支持下，研发人员突破纳米绿色版基技术的关键技术和批量化生产工艺，并与企业合作，完成了纳米绿色印刷六百万平方米版材生产线的建设工作。纳米绿色版基生产线是世界上第一条没有电解氧化工艺的版基示范生产线，在生产线建设过程中没有前例可循，没有实物参考，也没有建设经验，所以整个建设过程困难重重。研究人员与建设传统 PS 版生产线经验丰富的“中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究

所”和传统版基生产厂家“承德天成印刷科技股份有限公司”合作，从 2013 年开始采购纳米绿色版基中试生产线建设用部件，经过和两家合作者的多次沟通、实地考察及数次修改调整，最终形成了具有自动化控制、废气处理、余热回收、空气净化等多功能的节能环保示范生产线及具有 28 项具体工艺步骤（其中包含 13 项独有功能）的生产线设计方案，2015 年在合作厂家进行整体组装联机调试。2016 年 4 月 19 日，中科院与承德天成印刷科技股份有限公司合作的纳米涂层绿色印刷版材生产线项目正式在承德天成股份科技园区签约，同时举行了“纳米绿色印刷产业基地承德绿色版材生产示范线”揭牌仪式。该项目将推动纳米绿色印刷版材实施规模化生产，加速纳米绿色制版技术体系的推广应用，实现印刷行业的颠覆性技术创新与实践。

4.2 绿色印刷油墨技术

针对目前广泛使用的苯或甲苯系塑料印刷油墨的严重危害和食品安全隐患，中科院化学所通过系统研究成膜树脂分子结构设计及水溶性控制、颜料纳米粒子均匀分散以及规模放大等关键技术，制备出能在不同塑料表面实现良好印刷效果的环保油墨。并通过中试放大试验，对绿色油墨树脂制备过程中的物料比例、物料滴加方式、反应温度、反应时间等制备工艺条件进行系统考察，最终制备出合格的绿色油墨树脂，确定了绿色油墨树脂的中试制备工艺条件。与四川省成都托展新材料股份有限公司合作，建设了“纳米绿色印刷产业基地成都绿色油墨示范线”，进一步加强纳米先导专项科技成果与生产企业的合作，将相关产品推向国内和国际市场。

4.3 新型印刷金属网栅触摸屏技术

触摸屏已成为现代社会人们日常生活的必需品，例如，人们通过手机触摸屏上轻轻一点，就可以获得所需的信息。但很多人不知道的是，触摸屏也可以像报纸一样印刷出来，这利用的便是印刷电子技术。这种新型“印刷术”与传统意义上的印刷技术原理大体相同，但

使用的“油墨”是具有导电、介电或半导体性质的材料，印刷对象则是电子产品。

作为触摸屏中最核心的材料，透明导电薄膜一直主要采用氧化铟锡（ITO）制作，然而，随着近年来触摸屏的大规模普及应用，该材料中的稀土材料铟出现了巨大的供应缺口。除 ITO 材料外，碳纳米管、石墨烯和导电高分子等也可以制作透明导电薄膜，但透明导电薄膜的导电性与透光性“此消彼长”的弊端一直得不到消除。此外，目前已开发的透明导电膜都存在电阻过大、在大尺寸显示屏中触控灵敏度下降的问题。传统触摸屏制作都离不开导电层沉积、光刻腐蚀制作触控图形电极和边缘引线印制这 3 个基本步骤，非常依赖光刻与腐蚀工艺，金属导电图案附着于基底材料的表面。由于制备在表面的金属层厚度有限，要增加金属网栅的导电性，就必须增加金属网线的宽度。这一方面会降低导电膜的透光性，另一方面会影响触摸屏的外观。

在先导科技专项支持下，中科院苏州纳米所研发的嵌入式纳米材料印刷金属网栅柔性透明导电膜则不存在这些问题。通过嵌入式印刷技术，可以在不增加网线宽度的情况下，通过控制纳米银的埋入量控制导电性，其导电性比传统 ITO 柔性透明导电膜高百倍以上，而且透光性与可挠性均更为优秀。从制备工艺上来看，嵌入式金属网栅制备技术也是别具一格，开发的金属网栅制备技术可以将 3 个基本步骤合并为一步完成，而且可以实现卷对卷连续印刷制备。从机器的一端输入基底膜材料，就能像打印报纸一样从另一端打印出专为各种触摸屏定制的透明导电膜。该项技术被触摸屏业界认为是一项“革命性”技术，彻底颠覆了传统触摸屏的生产方式，获得 2014 年中国专利金奖。

为了迅速推动该技术产业化，研发团队直接与国内触摸屏龙头企业“欧菲光”合作，利用“欧菲光”雄厚的资本、丰富的量产经验与成熟的市场渠道，在一年时间内即实现新型金属网栅触摸屏的批量化生产，并已大批量应用于国内外知名电脑产品中。共同申报的“应用

于触摸屏的混合印刷金属网栅技术”在全球 30 个国家近 400 项创新技术的竞争中获得了制造类的年度创新提名奖。目前这项新技术已经实现了数亿元的销售。

4.4 印刷射频标签技术

印刷电子技术以其产品柔性化、透明化和轻薄化的特点，近年来引起国际上的广泛重视。据 NanoMarkets 2010 年预测，2020 年全球印刷电子的市场将达 570 亿美元，而其中 75% 为柔性产品。纳米银导电油墨是印刷电子技术的核心材料，纳米银导电油墨的难点在于高固含量（银含质量百分比 $\geq 50\%$ ）和低黏度（黏度 ≤ 20 cp）。目前国际上只有日本哈利玛化工基于物理气相沉积方法制备了高固含量低黏度的导电油墨，而且与英国赛尔（XAAR）联合开发工业数字印刷电路技术正在进行中。中科院化学所基于化学湿法技术制备了超细纳米银（ < 10 nm），并基于积累的纳米材料分散技术，实现了高固含量低黏度导电油墨的制备，并经过第三方测试。与北京中科纳通电子科技有限公司合作，共同建立了卷到卷印刷射频天线平台，并改进进料和收料的表面张力，避免了在收放料过程中纸张的变形，同时改进印后烧结工艺，避免在烧结后变形和收缩，显著提高了印刷射频标签天线的良品率。成功实现绿色印刷射频标签在北京科技周入场券、北京 APEC 峰会绿色安全门票的应用；采用绿色印刷工艺制造的新型地铁票通过考核并应用。

4.5 超快速连续数字投影打印技术

2015 年，获得谷歌 1 亿美元投资的 Carbon 3D 公司其滚雪球式的成功传奇将连续液面生产技术^[7]（Continuous Liquid Interface Production, CLIP）推向 3D 打印业界视野。2016 年，中科院福建物构所在国内首次突破了可连续打印的三维物体快速成型关键技术，研发出具有自主知识产权的连续打印数字投影 3D 打印原理样机。采用一种特殊的透光、透气元件，作为树脂槽内底面的一部分，固定于打印光源的照射路径上，在通入氧气或空气条件下，均可实现连续的 3D 打印，最大打印速度

超过 650 mm/h, 在质量相当的情况下打印速度上已经超过美国 Carbon 3D 的 500 mm/h。可在 6 分钟内打印出一个高度为 60 mm 的三维物体, 而同样物体采用传统的立体光固化成型工艺 (SLA) 打印则需要约 10 个小时, 采用流技术速度提高了 100 倍, 比美国 Carbon 3D 公司发布的连续 3D 打印设备速度快约 30%。此外, 连续打印数字投影 3D 打印技术采用自主研发的 3D 打印树脂, 与国外进口树脂相比, 成本从 1 000 元/公斤降至 50 元/公斤, 且打印强度比国外高 1 倍, 实现了连续打印数字投影 3D 打印技术的全自主研发和供给, 摆脱了对国外的依赖, 为我国塑料行业的使用和推广奠定可行性基础。截至 2016 年 2 月 4 日, 该项研究成果已被多家媒体报道和转载, 包括《光明日报》《科技日报》《中国青年报》《经济日报》以及“科学网”等众多媒体, 引起国内产业界的高度关注。

4.6 金属 3D 打印技术

2016 年 1 月美国卡内基梅隆大学连同美国阿贡国家实验室研究发现, 3D 打印钛合金存在致命的缺陷, 难以达到制造各种航空航天部件或医疗植入物的要求, 极大地限制了增材制造钛合金的发展^[8]。

中科院福建物构所通过激光 3D 打印工艺和微观结构调控技术, 通过控制 β 相含量及其内部 α'/α'' 相特征, 突破增材制造钛合金强韧化制造问题, 在屈服强度不低于 780 MPa 下, 3D 打印钛合金延伸率 $>10\%$, 疲劳极限 ≥ 450 MPa (10^7 周), 性能全面达到 ISO5832-3 标准要求, 从而突破 3D 打印钛合金强韧、高疲劳性能这一国际难题, 为在高承力要求的航空航天部件和医疗植入物等领域应用扫清了技术障碍。这一研究结果, 引起原中国航空航天工业部部长林宗棠及国内外产业界高度关注。

中科院福建物构所在金属 3D 打印产品应用方面也取得可喜进展: 在飞行器重要模型研制方面, 获得中国空气动力研究与发展中心高度评价; 个性化医疗器械获得国家食品药品监督管理总局颁发的许可证, 个性化种植基台等产品实现了临床应用, 打破 BEGO、ITI 等国际巨

头对技术、专利和产品垄断。一系列高强韧钛合金、抗菌钛合金 3D 打印材料、梯度模量种植体、低模量刚性多孔结构植入物等研究, 将可带动航空航天、生物医疗等行业定制化产品产业化。

4.7 喷墨 3D 打印技术

(1) 完成压电式高密度多喷口实验型喷墨打印头, 墨滴稳定喷射。其分辨率达到 100dpi, 发射频率 1—40kHz, 墨滴大小 1—20pL。MEMS 喷墨打印头成功开发, 将解决多年阻碍我国喷墨打印产业发展的瓶颈问题, 打破国际垄断, 已受到国内喷墨制造企业的广泛关注, 将带动我国喷墨设备制造产业链的发展。

(2) 推进 MEMS 喷墨打印头生产线建设。与苏州锐发打印技术有限公司、苏州纳米城 MEMS 中试线、无锡华润上华半导体有限公司和苏州晶方半导体有限公司商谈, 在喷头封装、测试、MEMS 制造技术、CMOS 制造技术等环节开展全方位合作, 力争打通喷头制造产业链, 建成国内首个 MEMS 喷墨打印头生产基地。

4.8 GaN 基激光器

GaN 基激光器是氮化物光电子器件领域难度最大、最具挑战性的课题, 中科院苏州纳米技术与纳米仿生所突破了 GaN 基蓝光激光器的关键技术, 研制成功输出功率大于 1W 的蓝光激光器。基于隧道结理论和超晶格应力调控技术, 设计了新型的 GaN 基激光器结构, 降低了串联电阻, 提高了发光效率; 研究了 MOCVD 原子层外延生长机理, 发现了 GaN 衬底的切向角是影响材料质量的关键因素, 解决了同质外延表面易出现 Hill-Lock 形貌和表面条纹状形貌的问题; 优化 InGaN 材料的生长温度和生长速率, 提高了 InGaN 材料的光学质量, 减小了 InGaN/GaN 量子阱中的 V 型坑缺陷; 提出了量子阱垒层 In 组分阶梯式渐变的量子阱结构, 改善了大注入电流密度下量子阱发光效率; 研究了 C 杂质并入的机理, 通过优化生长条件, 降低了 AlGaN 材料中的碳杂质, 提高了其空穴浓度; 通过采用 P-InGaN/P-GaN 的表面接触层结构, 在表面形成二维空穴气, 获得了性能良好和稳定

的P型欧姆接触电极工艺；采用激光器腔面等离子清洗和离子束辅助腔面镀膜技术，激光器的腔面膜系黏附牢固，膜系致密，提高了激光器的可靠性。

中科院苏州纳米技术与纳米仿生所在开展GaN基蓝光激光器研究的同时，积极开发GaN基蓝光激光器的工程化技术，吸引社会资本，成立了苏州纳睿光电有限公司推进GaN基激光器的产业化，目前产品已经上市。

4.9 高密度相变存储器

中科院上海微系统所研制的TiSbTe新型相变材料拥有中国和美国专利，和传统GeSbTe材料相比，其操作速度可提升一个数量级且操作功耗可降低80%，理论和实验揭示了在TiSbTe材料相变过程中，被钉扎的Ti中心八面体基团是实现高速、低功耗的有序—无序可逆结构转变的主要原因，基于该体系优选组分的PCRAM实验芯片整体性能完全优于传统GeSbTe基芯片。12英寸40nm PCRAM芯片的集成创新水平大幅提高，在材料、工艺、设计和器件结构方面都应用了多项自主创新技术，其中PCRAM关键的驱动二极管性能得到大幅度提升，达到国际先进水平；经过系统优化后，PCRAM芯片的1T1R集成工艺完全打通，容量为64MB的PCRAM芯片晶圆级良率~40%，为进一步研制基于28nm新型CMOS器件的GB量级芯片奠定了坚实的基础。

5 结语

通过材料创新带动生产方式创新，取得产业领域的重大进步和变革，是实现“中国制造2025”的关键突破点。纳米绿色印刷制造技术突破后覆盖的行业非常广泛，包括印刷、电子、医疗、航空等，是一种基础平台性的创新，将从根本上颠覆现有的生产方式，

从源头解决众多产业的严重污染和资源浪费问题。相信遵循“绿色印刷制造”的大印刷发展理念，在众多领域开展更深层次的技术创新与应用研究，将积极推动传统印刷技术向“绿色化、功能化、立体化、器件化”发展，最终实现中国在一些重要产业领域的技术变革和跨越式发展。

参考文献

- 1 王国彪,黎明,丁玉成,等. 重大研究计划“纳米制造的基础研究”综述. 中国科学基金, 2010, 24(2): 70-77.
- 2 沈湘, 宋秀芳. 纳米制造研究领域的现状与发展—基于Inspec数据库分析. 现代情报, 2015, 35(7): 126-130.
- 3 刘宇宏, 雒建斌. 纳米制造科学与技术中的基础问题研究进展. 中国基础科学, 2013, (3): 4-13.
- 4 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告. 北京: 科学出版社, 2010.
- 5 王岩鑫. 2014年我国印刷业总产值继续向上. [2015-10-12]. <http://data.chinaxwcb.com/epaper2015/epaper/d6116/d001/201510/60914.html>
- 6 李大庆. 中科院选出25项重大科技成果及标志性进展. [2016-1-16]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/1/336389.shtm>
- 7 Tumbleston J R, Shirvanyants D, Ermoshkin N, et al, Continuous liquid interface production of 3D objects. Science, 2015, 347(6228): 1349-1353.
- 8 Cunningham R, Narra S, Ozturk T, et al, Evaluating the Effect of Processing Parameters on Porosity in Electron Beam Melted Ti-6Al-4V via Synchrotron X-ray Microtomography. Journal of Minerals, Metals & Materials Society, 2016, 68(3): 765-771.

Nanotechnology Guides New Age of Green Printing Manufacture

—Progress of Green Printing Nanomanufacturing Techniques and Devices

Green Printing Nanomanufacturing Techniques and Devices Team of Strategic Priority Research Program on

Industrial Nanomanufacturing Focus^{1,2,3,4,5,6}

(1 Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Jiangsu 215123, China;

3 Fujian Institute of Research On the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fujian 350002, China;

4 Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

5 Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

6 National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China)

Abstract Up-scale manufacturing of nano-materials and nano-devices is essential for the practical application of nanotechnology. Conventional printing technology causes serious pollution and resource waste, thus it is imperative to upgrade this technology. As an additive technology, green printing manufacturing is unique in its low energy consuming and ultralow pollution. Moreover, green printing has potential to provide new venues for the assembly and fabrication of nano-devices via combining other micro- and nano-processing techniques. Therefore, green printing manufacturing is of strategic importance to the sustainable development of related industry sectors in China. In this article, we introduce the background, aim, and implementation of green printing nanomanufacturing techniques and devices of Strategic Priority Research Program on Industrial Nanomanufacturing Focus as well as the achievements obtained so far.

Keywords up-scale manufacturing, green printing, nanotechnology, printed electronics, 3D printing, nano-devices

(相关图片请见彩插一)