

印刷电子：现代“印刷术”

中国古代印刷术曾对世界文明进程和人类文化发展产生过重大影响，如今，印刷电子这项新型“印刷术”也将引发一场新的产业革命。

我对触摸屏毫不陌生，只须在手机触摸屏上轻轻一点、一按或是一划，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，所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。

中国印刷电子领域的先行者、中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所（以下简称苏州纳米所）研究员崔铮博士介绍说，从技术应用领域来看，凡是能够用印刷方法取代传统电子学制造方法的领域都可以归入印刷电子的范畴。印刷电子以及与之相关的有机电子、塑料电子、柔性电子、纸电子、透明电子、纺织电子等形成了一类完全不同于硅基微电子的新型电子技术与产品。“印刷电子并不能取代硅基微电子，而是形成互补。”崔铮博士说。与硅基微电子不同的是，一方面，印刷电子器件与基底材料无关，能够在各种基材上制备，包括各种柔性基底材料，因此具有柔性化的特征；另一方面，印刷电子器件又保留了传统印刷的优势，可以实现大面积批量化制造，尤其是卷对卷连续生产制造，能够大大降低制造成本。由

于印刷电子能耗低、材料消耗少，无腐蚀工艺，因此其制造方法本身还具有绿色环保特征。

事实上，当有机导体与半导体材料被发现时，人们的确看到了未来信息电子器件有可能通过印刷制造的希望，因为有机材料一般可以制备成溶液形态，使其具有印刷油墨的特征，因此可以通过印刷导体与半导体材料制备晶体管。但有机电子材料中只有一部分有机小分子材料具有较好的电子学性能，而这些有机小分子材料必须通过真空蒸发来制备电子器件，这在一定程度上限制了印刷电子的迅速

发展。在过去5年中，一方面，有机电子材料在不断进步，高稳定性高电荷迁移率的有机半导体材料与可溶液化加工的有机发光材料开始出现；另一方面，无机纳米材料开始进入印刷电子领域，印刷电子才迎来了真正的春天。

碳纳米管、石墨烯、纳米形态的银与铜等无机纳米材料都具有比有机电子材料更好的电子学性能，对无机纳米材料进行墨水化处理也要比寻找新型高性能有机电子材料容易得多。最重要的是，无机纳米材料具有良好的环境稳定性，不受空气中水分子和



崔铮主持第4届全国印刷电子研讨会

氧气的影响，电子器件可以在自然环境下通过印刷制备。因此只要将无机纳米材料制成墨水或油墨，就可以用传统印刷方式制成各种结构。通过印刷方式将这些纳米材料集成到各种传统电子与光电器件中，所形成的电子器件既保留了纳米材料的纳米尺度特性，又体现了印刷制备技术的大面积、柔性化与低成本特征。纳米材料本身的性质赋予了这些结构以电荷传输、光电转换，传感、发光与显示等特性，从而形成各种新型半导体器件、光电与光伏器件、显示器件与传感器件，大大增强了印刷制备电子器件的实用性，拉近了印刷电子与市场的距离。如今，印刷电子已经在触摸屏、柔性显示与照明、薄膜太阳能电池、电子“皮肤”、纸电池以及智能标签等多个应用领域发挥着作用。

凭借在国外微纳加工领域整整 20 年的工作经历，崔铮博士看到了印刷电子的优势和发展潜力。2009 年 10 月，崔铮博士入选中组部第 2 批“千人计划”并全职加盟苏州纳米所。回国后，崔铮博士立即在苏州纳米所着手筹建当时国内第一个印刷电子技术研究中心。现在，印刷电子中心已经发展成为拥有 60 余名研究人员的强大团队，形成了从电子墨水材料、印刷电子工艺与装备到印刷电子器件封装与工程化开发的全产业链技术研发布局。在应用方面，印刷电子中心聚焦于印刷薄膜晶体管、印刷光伏与发光以及印刷电子电路等领域，特别强调研发与市场应用需求的紧密结合。在印刷电子中心的诸多研发成果中，最值得骄傲的一项成果就是全新的柔性透明导电膜制备技术。

作为触摸屏中最核心的材料，



批量印刷制备的平板电脑触摸屏透明导电膜

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。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。此外，传统触摸屏制作离不开导电层沉积、光刻腐蚀制作触控图形电极与边缘引线印制这 3 个基本步骤，非常依赖光刻与腐蚀工艺。已有的金属网栅型透明导电膜其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。这不仅会降低导电膜的透光性，而且会影响触摸屏的外观。

而崔铮博士及其研发团队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。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。崔铮博士及其研发团队开发的金属网栅制备技术可以将传统触摸屏制作的 3 个步骤合并为一步完成，而且可以实现卷对卷连续印刷制备。在机器的一端输入基底膜材料，就能像印刷报纸一样从另一端印刷出专为各种触摸屏定制的透明导电膜。该项技术一问世就被触摸屏业界公认为一项革命性技术，彻底颠覆了传统触摸屏的生产方式。

为了让这项国际领先的技术迅速产业化并进入市场，崔铮博士及其团队没有走融资与自建产线的常规路径，而是直接与中国触摸屏龙头企业欧菲光集团合作，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了新型金属网栅

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。在全球取代 ITO 制造触摸屏的“赛跑”中，中国跑在了最前面，欧菲光成为全球首个实现非 ITO 触摸屏技术量产并进入市场的企业。目前这项新技术已经实现了数亿元的销售额。

国内外对这项技术的先进性给予了充分肯定。由崔铮博士作为第一发明人的核心专利（专利号：ZL201110058431.X）获得了 2014 年中国专利金奖。在 2014 年欧洲印刷电子年会上，崔铮博士领导的印刷电子中心获得了年度国际印刷电子进步奖，这也是中国科研人员首次在国际印刷电子技术领域获奖。2014 年 11 月，第 10 届英国工程技术学会（IET）年度创新奖颁奖仪式在英国伦敦举行，由崔铮科研团队与欧菲光共同申报的“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脱颖而出，获得了制造类的年度创新提名奖。

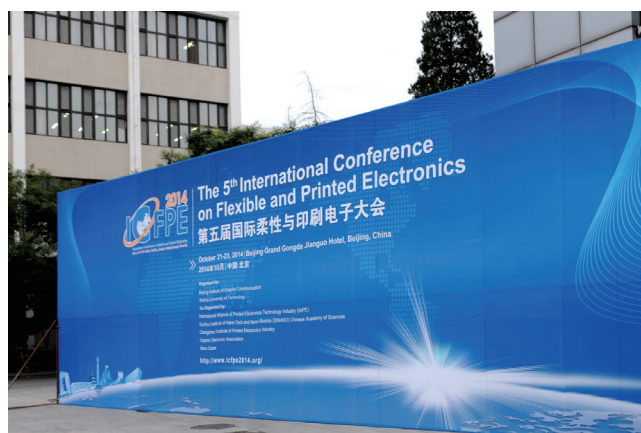
如今，中国印刷电子技术已展现出蓬勃发展的趋势，越来越多的科技界与产业界人士开始了解印刷电子技术并参与研发与产业化活动。2010 年以来，苏州纳米所印刷电子中心每年都在国内组织印刷电子技术研



欧菲光卷对卷印刷柔性透明导电膜生产线



崔铮与印刷制备的柔性透明导电膜及核心发明专利



中国首次主办的“第 5 届国际柔性印刷电子大会”

会，参会人数逐年增多。2014 年 10 月，印刷电子中心与北京印刷学院在中国首次主办了“第 5 届国际柔性印刷电子大会”，会议收到了国内近 140 份论文摘要，有超过 200 名国内代表出席了会议。崔铮博士及其科研团队除了成功实现新型金属网栅柔性透明导电膜的产业化外，还在印刷薄膜晶体管、印刷太阳能电池、有机电子封装、自主研发喷墨打印头和 3D 打印等领域取得了进展。中国进入印刷电子科研领域的科研团队越来越多；一些企业也开始推出印刷电子相关产品；科技部还将印刷电子列为国家“十三五”科技发展规划的重要领域之一。

在摩尔定律面临失效、晶体管性能提升及成本降低越来越难的今天，成本低、环保性高的印刷电子成为电子产业发展的一个新契机。“在今后消费类电子产品越来越强调个性化、强调创造用户新体验的趋势下，印刷电子产品的大面积、透明化和柔性化等新特性极有可能培育出新的消费需求。”崔铮这样说。未来，印刷电子这项现代“印刷术”必将展现它的真正实力。

作者：杜莹