

美国塑料电子产业的起步与发展

王佳存

(山东省科技厅, 济南 250014)

摘 要: 进入21世纪以来, 塑料电子逐步发展成为电子技术新革命的前沿科技领域。本文分析了美国科技界、产业界围绕塑料电子开展研发、提出创新理论、开发创新成果并促进成果转化的主要经验和措施, 研究了美国在孕育和促进电子技术革命方面所发挥的作用。本文指出, 美国塑料电子产业仍然处于发展初期, 但展示出广阔的市场前景。

关键词: 美国; 电子技术革命; 塑料电子; 有机电子; 柔性制造; 塑料电子产业

中图分类号: F407.6; TQ327 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2011.08.007

进入 21 世纪以来, 塑料电子逐步发展成为前沿科技领域, 展示出广阔的市场前景。美国科技界、产业界围绕塑料电子积极开展研发, 提出创新理论, 开发创新成果并促进成果转化, 在推动电子技术新的革命方面发挥了重要作用。

一、塑料电子的基本概念及美国相关研发机构

塑料电子是将电子器件制作在柔性/可延性塑料或薄金属基板上的新兴电子技术, 以其独特的柔性/延展性以及高效、低成本制造工艺, 在信息、能源、医疗、国防等领域可得到广泛的应用。作为一个新兴领域, 塑料电子还被称为印刷/印制电子 (printed electronics)、有机电子 (organic electronics)、聚合体电子 (polymer electronics)、柔/软性电子 (flexible electronics) 等。与传统硅基电子技术相比, 塑料电子技术可用于开发各种创新产品, 而且成本更低, 更加环保。

对于塑料电子这一新兴领域, 美国有众多的科研机构和企业参与研发。根据塑料电子咨询公司 IDTechEx 的统计报告, 美国涉足塑料电子研发的单位有 312 家, 在数量上高于其他国家 (表 1)。

2008 年 3 月, IDTechEx 发布《北美有机和印制

表 1 全球塑料电子开发机构情况

Countries	No. of organization
United States	312
Germany	150
Japan	103
United Kingdom	96
Korea	58
France	39
Netherlands	22
Sweden	22
Switzerland	19
Canada	18

Source: IDTechEx[®]

电子产业》, 介绍了美国 196 家涉及塑料电子研发的机构情况, 其中大学为 56 家, 包括麻省理工学院、加州理工学院、普林斯顿大学、斯坦福大学、康奈尔大学、杜克大学等, 有些大学成立了专门研究塑料电子技术的实验室或开发中心; 重点科研单位和国家实验室 14 家, 包括: 空军研究实验室、贝尔实验室、海军研究实验室、美国航空航天局光伏研究中心、橡树岭国家实验室、布鲁克黑文国家实验室等; 企业 126 家, 包括: 杜邦、Applied Materials、摩托罗拉、通用电气、IBM、惠普等。部分开发机构体现

作者简介: 王佳存 (1965-), 男, 博士, 山东省科学技术厅 副处长; 研究方向: 金融信息处理、科技经济政策。

收稿日期: 2011年6月8日

了产学研等不同资源的整合,比如,亚利桑那州立大学在其科技园内与军方和波音公司等联合设立了柔性显示中心,专门从事柔性面板和显示器制造工艺的研发^①。

二、美国引领塑料电子研发

美国是科技强国,在20世纪以来的很多重大技术突破和创新方面引领发展潮流。对于塑料电子的研发,美国不论是在理论创新还是技术创新方面,都发挥了重要的引领作用。

(一)提出塑料导体的创新理论

艾伦·黑格教授是加利福尼亚大学固体聚合物和有机物研究所所长,艾伦·马克迪尔米德教授在宾夕法尼亚大学化学系任职,这两位科学家在20世纪70年代发现了塑料能够传导电流的原理,颠覆了人们关于塑料是绝缘材料的常规认识。由于对导电聚合物的发现,他们与一名日本科学家分享了2000年诺贝尔化学奖。美国《科学》杂志将有机电子技术进展列为2000年世界十大科技成果之一,与人类基因组图谱、克隆技术等重大发现并列。根据专家预测和目前研发趋势,塑料电子在半导体器件、显示、照明、电源、传感等领域都可以进行大规模的应用,具体情况见表2。

塑料是聚合体,构成塑料的无数分子通常都排成长链并且有规律地重复着这种结构。根据艾伦·黑格等的发现,通过使碳原子之间交替地包含单键和双键黏合剂,并且除去或者附着电子,额外的电子就能够沿着分子移动,因此,塑料就可以成为导体。在这一发现的推动下,导体塑料已经发展成为化学家和物理学家重点研究的一个科学领域,孕育出了一些非常重要的应用成果,并逐渐展现出诱人的产业化前景。比如,导体塑料可以应用在许多特殊环境中,摄影胶卷需要的抗静电物质、计算机显示器的防电磁辐射罩都会用到导体塑料。而近来研发的一些半导体聚合体,甚至可以应用在发光二极管、太阳能电池以及移动电话和迷你电视的显示屏当中。

有机电子协会在其第三版白皮书《有机和印制电子发展路线图》中勾勒了塑料(有机)电子产业短期、中期和长期发展的路线图,并对不同塑料电子产品的开发进行了预测^②。

(二)取得一批创新成果

艾伦·黑格等教授关于塑料导体的发现开创了新的科技前沿领域,美国科技和产业界围绕塑料电子,取得了一系列重要的创新成果。

在有机发光二极管(OLED)方面,美国GE公司

表2 印制电子产品应用领域与特点

产品应用领域	印制电子产品	产品特点
半导体器件	薄膜晶体管(TFT)、RFID系统、逻辑电路、存储器	比硅基IC质量轻、体积小,适于挠曲和低温装配,比硅基半导体成本低
显示	有机光电显示管(OLED)、有机光电广告屏、电子纸、电泳显示、电致变色显示、场致发光显示、热显示等	改善平板显示器强度,可设计成卷曲的新产品,适于成卷高效生产
照明	有机发光二极管(OLED)	消耗电量少,节能,可分散、卷曲排列灯光,成本低,适于成卷生产
电源	薄膜太阳能电池、光伏	新颖环保、低成本电源、质量轻、体积小,可卷曲
传感	接触压力感应器、光电感应器、温度感应器等	用于不同结构的信号检测,质量轻、体积小、成本低,能用于生物产品中,能挠曲与纤维织物结合
其他	薄膜开关	质量轻、体积小、成本低

① FDC Capabilities, <http://flexdisplay.asu.edu/about>

② Organic Electronics Association, OE-A Roadmap for Organic and Printed Electronics (3rd Edition)

表3 有机和印制电子发展路线图

产品类型	产业化时间		
	2009-2012 年(短期)	2012-2017 年(中期)	2018 年以后(长期)
有机太阳能电池	消费品,先是非并网应用	非并网供电, 光伏建筑一体化	并网供电
柔性显示	价格标牌,电子阅读器	高分辨色彩, 电子阅读器, 电子广告	电子墙纸, 可弯卷有机发光二极管,电视
有机发光二极管/电致发光	小型灯,设计及装饰应用	发光瓷砖,建筑物发光	柔性发光元件
印制电子标签	防伪商标,电子票	物流及自动化	物品标记,识别系统
印制存储器	防伪商标识别	高端防伪商标,先进游戏卡	电子品,多媒体
有机传感器	光电二极管, 可检测温度、压力及化学	传感器阵列	智能传感器, 嵌入系统
柔性电池	低容量非连续使用	高容量连续使用	直接集成在封装或系统中
智能物品	问候卡,动画徽标	智能票,初级智能包装	复杂的智能包装
智能纺织物	服装内集成键盘, 传感器,光效应	服装内集成显示,光伏电池	燃料电池, 纤维内集成传感器

与 KM 公司自 2007 年以来,积极开展 OLED 的研发,2010 年在利用溶液化材料制造白光 OLED 技术方面取得突破性进展,已实现每瓦 56 流明的发光效率并降低了生产成本,拥有充分寿命的柔性白色发光照用有机 EL 元件,为下一步全印刷制造白光 OLED 奠定了基础^①。2010 年 5 月 12 日,美国杜邦公司宣布研制成功第三代溶液化 OLED 材料,并通过印刷制作出大尺寸 OLED 显示屏,其寿命超过 3 万小时^②。

在材料方面,普林斯顿大学研制成功可延展的导电塑料,使得导电聚合物或塑料通常在改变形状用于特定用途后,依然保持导电能力,从而能够替代太阳能电池板生产所需的昂贵的导电材料钢锡氧化物,为降低太阳能电池板成本提供了技术支撑^③。美国斯坦福大学化工系教授鲍哲南和她领导的 30 人研究团队发明了一种最新、最柔软的塑料电子器件,这种可以真正模拟人类皮肤的薄膜材料具有前所未有的高灵敏度,将被广泛用于假肢、机器人、手机和电脑的触摸式显示屏、汽车安全和医学应用上^④。另外,她采用十八烷基三氯硅烷(OTS)修饰有机

薄膜晶体管(OTFT)的 SiO₂ 表面,在 OTS 单分子层上生长出更大的有机半导体晶体,大幅度减少晶界的产生,使 OTFT 的迁移率提高了一个数量级以上,获得了良好空气稳定性、迁移率大于 1 平方厘米(VB)的有机 P 型材料。美国佐治亚理工大学利用单链 DNA 支架辅助制备高荧光、水溶性银量子点及其光电性能的研究。研究者通过 DNA 序列的可调节性制得了十余种性能优异的银量子点发光材料,且发光峰覆盖了可见光到近红外区段。美国 IBM 公司开发了一种新型的有机/无机复合半导体材料——杂化钙钛矿结构材料,把有机和无机分子有序地复合在一个单分子上,在分子水平上改变其化学和光电性能,能够使杂化材料像有机材料那样可低温和低成本地进行加工,显示出广阔的应用前景和巨大的商业市场。

在半导体器件方面,俄亥俄州立大学科学家演示了世界上第一个塑料计算机存储设备,该设备利用电子自旋来读写数据,能以更小的空间存储更多数据,处理程序更快而且更加节能。这些聚合物做的磁性半导体不仅作为一种旋转极化器,使它在弱

① White OLED Outlook Brightens with Efficiency Breakthrough, <http://www.genewscenter.com/content/detail.aspx?releaseid=10601&newsareaid=2>

② Cost-Effective Solution Printing Process and Materials Deliver Record Lifetime Performance, http://www2.dupont.com/Displays/en_US/news_events/article20100512.html

③ Plastic electronics could slash the cost of solar panels, <http://www.princeton.edu/main/news/archive/S26/98/90030/index.xml?section=topstories>

④ Stanford researchers patent pressure-sensitive e-Skin, <http://www.stanforddaily.com/2010/09/21/stanford-researchers-patent-pressure-sensitive-e-skin>

磁场中通过上旋或下旋来存储数据,还可以用作旋转探测器,完整地读取所存储数据,从而向制造一种全有机材料的设备迈进了一大步^①。普林斯顿大学复杂材料研究中心2003年研制成功塑料储存技术,利用塑料薄膜进行数据储存,使得塑料替代硅晶片成为可能^②。2010年,美国罗格斯大学利用新型材料研制成功新的塑料太阳半导体,有望替代硅太阳能电池,为发展太阳能做出新的科技支撑^③。

在制造方面,麻省理工学院的研究者开发了一种新型微机电系统(MEMS)制造技术,用塑料衬底代替目前的单晶衬底,不但可以大幅降低成本,还为未来大面积、柔性传感器(如机翼上的应力传感器)的开发走出了一条新路。研究者首先制备了一种表面刻有线路的弹性塑料片,上面覆盖一层导电材料——氧化铟锡(indium tin oxide),然后通过一种“转移垫”(transfer pad)把金属薄膜印在上述塑料片上^④。

(三)积极开发塑料电子产品

科技创新是推动经济发展的决定性因素。美国充分利用塑料电子的研发优势,开发塑料电子产品,培育形成了新的经济增长点,在新的产业竞争中占有一席之地。

2007年年初,POLYMER VISION宣布将生产可折叠的电子阅读器,塑料逻辑公司宣布投入1亿美元生产印制有机电子产品。对此,美国《技术评论》认为,塑料电子经过几十年的研发,终于实现了商业化^⑤。随着塑料电子技术的应用,塑料电子逐步发展受到产业界的关注。对于这一新兴产业的发展,不同的机构有着不同的预测,但相同的一点是,

这些不同的机构都认为塑料电子在今后将有较大的发展。比如,NanoMarkets认为,塑料电子市场到2012年将达到49亿美元,到2015年达到158亿美元^⑥。IDTechEx认为,塑料电子市场2010年为19.2亿美元,预测到2020年,将增长到551亿美元^⑦。此前,IDTechEx曾预测到2025年,塑料电子市场将达到3000亿美元,到2027年达到3300亿美元^⑧。根据FlexTech的预测,塑料电子市场到2020年将达到1200亿美元。

柔性显示器是塑料电子的代表性产品,主要有电子纸、柔性OLED和柔性液晶。与普通的刚性显示器相比,柔性显示器具有诸多优点:耐冲击,抗震能力更强;质量轻、体积小,携带更加方便;采用类似于报纸印刷工艺的卷带式工艺,成本更加低廉等。

在电子纸方面,美国企业占据较大的市场份额。1997年,朗讯公司、摩托罗拉公司以及数家风险投资公司成立E-Ink公司,利用电泳技术发明了电泳油墨(又称电子墨水),成功实现产业化,占有大部分电子纸市场,使得E-ink几乎成为电子书或电子纸的代表^⑨。美国亚利桑那州立大学柔性显示器中心于2009年推出世界首款触摸屏主动矩阵显示器。2009年美国辛辛那提大学和Polymer Vision以及Sun Chemical几家公司合作开发成功电流体电子纸,主体是由疏水性材料制成的六角形像素,每个像素的中心是一个蓄液池,用于储存色素。高通全资子公司高通光电开发了干涉调制显示电子纸,主要用于手机的屏幕显示。据美国《技术评论》杂志报道,惠普公司2010年研发出塑料柔性弯曲彩色

① PLASTIC SHOWS PROMISE FOR SPINTRONICS, MAGNETIC COMPUTER MEMORY. <http://researchnews.osu.edu/archive/spintron.htm>

② New Plastic Memory Technology May Replace Silicon Chips. <http://www.nsf.gov/mps/dmr/highlights/04highlights/mrsec/0213706.pdf>

③ New 'plastic' solar semiconductors could replace silicon solar cells, <http://www.siliconrepublic.com/green-tech/item/18270-new-plastic-solar-semicon>

④ Contact Printed Microelectromechanical Systems, <http://web.mit.edu/press/2010/mems-printing.html>

⑤ Plastic Electronics Head for Market. <http://www.technologyreview.com/Nanotech/18159/?a=f>

⑥ NanoMarket, Organic Harvest: Opportunities in Organic Electronic Materials, http://nanomarkets.net/market_reports/report/organic_harvest_opportunities_in_organic_electronic_materials/

⑦ IDTechEx, Printed, Organic & Flexible Electronics Forecasts, Players & Opportunities 2010-2020, http://www.idtechex.com/research/reports/printed_organic_and_flexible_electronics_forecasts_players_and_opportunities_2010_2020_000238.asp

⑧ Printed and Conformal Electronics: Transformational, Dual-Use Technology.

⑨ 2009年,台湾地区显示器制造商元太科技(Prime View International)斥资2.15亿美元收购E Ink全部股权以及电子纸显示器材料的关键技术及专利

显示屏,有望应用于未来的彩色电子阅读器和平板计算机,或将终结电子阅读器的“黑白时代”。美国保尔佳(Polyera)公司与其合作伙伴联合研发新的半导体墨水,设计出新分子化合物,与带负电荷的分子结合,大大节省了成本,可以用来制造更为廉价的电子标签以帮助零售商跟踪其商品,并可促进可弯曲计算机屏幕的研发。

在柔性 OLED 方面,美国企业的代表是通用显示器公司。OLED 是利用正负载流子注入有机半导体薄膜后复合发光的显示器件,柔性 OLED 是以柔韧性好、具有良好透光性材料代替普通的 OLED 的玻璃衬底,其结构和发光机理与普通玻璃衬底的 OLED 器件相似。美国通用显示器公司 2003 年研制成功无源矩阵柔性显示器,塑料衬底厚度为 0.175 毫米,像素数量为 500×400;在陆军的资助下,研制了柔性有源矩阵 OLED 显示器样机。该公司还与亚利桑那州立大学柔性显示器中心合作开发了有机电子发光(EL)面板,尺寸为 4.1 英寸(1 英寸=25.4 毫米),采用单色绿色发光;与韩国 LG 合作,开发了手镯造型的有机 EL 显示器,画面尺寸为 4 英寸(81.6 毫米×61.0 毫米),像素为 QVGA(320×RGB×240 像素),分辨率达到 100ppi。

另外,美国企业在有机薄膜电池、薄膜晶体管、无线射频识别 RFID 系统、逻辑电路、传感器、碳纳米管等方面也开发出具有较强市场竞争力的产品。

三、美国对塑料电子研发的支持

进入 21 世纪以来,美国联邦政府围绕塑料电子研发,在不同的科技计划中增加投入,提高塑料电子的技术和创新能力,力争在新的科技前沿领域取得更大的优势。2004 年,美国科学基金会投入 400 多万美元,组织专家对塑料电子技术和产业发展面临的挑战进行研究,提出加大对塑料电子研发投入的建议^①。以 OLED 为例,自 2004 年以来,美国

能源部在这一领域投入研发经费 5400 多万美元,支持研发项目 65 项,其中 45 项已完成。美国有关科技计划也把塑料电子作为重点领域给予资金支持,美国技术创新计划 2010 年立项 9 个项目,其中两项支持柔性液晶显示与柔性光伏的先进制造技术的开发,项目投资达 1100 万美元。美国国家纳米技术计划把碳基纳米电子作为 5 个重点之一,加大对碳纳米管等技术的资助力度^②。美国小企业管理局 2010 年拿出专项资金支持 10 个地区创新经济的发展,其中一个地区是俄亥俄州的 NorTech,该机构获得近 50 万美元资助,主要用于促进塑料电子技术成果的转化,发展当地塑料电子产业,创造新的就业岗位^③。

美国政府还通过政府采购合同等形式,促进塑料电子技术的应用和发展。诺斯罗普·格鲁门公司在 2010 年 6 月 14 日与美国陆军签订了价值 5.17 亿美元的合同,规定在为期 18 个月的时间框架内建造三艘具有持续 21 天情报、监视与侦察能力的飞艇,这种飞艇被称为“长航时多智慧飞行器”(LEMV),所使用的能源来自非晶硅薄膜太阳能电池柔性光伏组件。美国波音公司近日获得一笔美国先进研究计划局(DARPA)价值达 8900 万美元的合同。根据该合同,波音/Qinetiq 公司团队将为 DARPA 的“秃鹰”(Vulture)长航时无人机项目研发一种采用柔性光伏太阳能/电能驱动(solar-/electric-powered)的无人机原型机^④。

四、美国塑料电子产业任重道远

作为前沿技术领域和新兴产业,塑料电子受到世界科技强国的重视。与英国、德国等国家相比,美国在塑料电子技术和产业发展方面既有优势,也有不足。一方面,美国在塑料电子研发方面,起步早,科研力量强,企业参与度高,另一方面美国政府还没有给予足够的重视,企业间的力量整合与合作

① NSF, Technological Challenges in Organic Electronics, Photonics and Magnetics

② National Nanotechnology Initiative Signature Initiative: Nanoelectronics for 2020 and Beyond, www.nano.gov/html/research/NNISigInitNanoelectronicsJul2010.pdf

③ SBA Announces Support for 10 Regional ‘Innovative Economies’ Clusters, Local Job Creation. <http://www.sba.gov/content/sba-announces-support-10-regional-innovative-economies-clusters-local-job-creation>

④ Printed Electronics – The money floods in, http://www.printedelectronicsworld.com/articles/printed_electronics_the_money_floods_in_00002903.asp?sessionid=1

还不够密切,某些塑料电子产品的开发相对落后等。比如,为了确保在高速发展的塑料电子方面的世界领先地位,英国政府出台了《塑料电子:英国走向成功战略》(*Plastic Electronics: a UK Strategy for Success*),同时公布将注入2800万英镑的资金,而美国政府却没有制定自己的塑料电子发展规划,投入的研发资金也不能满足技术发展的需要;德国机械设备制造业联合会为了推动塑料电子产业的发展,成立了塑料(有机)电子协会,而美国则还没有成立自己的行业组织;在塑料电子产品开发方面具有较强技术优势的塑料逻辑公司,虽然在美国设立了总部,但该公司却是英国剑桥大学的孵化企业;在电子墨水市场具有较大份额的美国公司E-ink,于2009年年底被台湾元太成功收购,从而让出了美国企业在这一市场的优势;电子纸是塑料电子的重要领域,美国在该领域拥有专利865件,而日本则拥有4258件^①。

奥巴马政府就职以来,疲于应对金融危机,创造就业岗位,复苏经济发展,把重点放在能源研发、绿色经济培育、医疗信息技术应用等方面,还没有全力推动塑料电子技术的研究和产品的开发。面对这一新兴领域的发展和英国、德国的高歌猛进,美国显然还将在塑料电子技术创新和产品开发的竞争博弈中遇到很大的挑战。为了赢得塑料电子产业

发展的优势,美国尽管有强大的创新能力,但依然任重而道远。■

参考文献:

- [1] Raghu Das and Dr Peter Harrop, Printed, Organic & Flexible Electronics Forecasts, Players & Opportunities 2010-2020
- [2] Raghu Das and Dr Peter Harrop, Organic & Printed Electronics in North America.
- [3] NSF, Technological Challenges in Organic Electronics, Photonics and Magnetics.
- [4] NanoMarket, Organic Harvest: Opportunities in Organic Electronic Materials
- [5] Organic Electronics Association, OE -A Roadmap for Organic and Printed Electronics (3rd Edition)
- [6] Jim Tully, Martin Reynolds First Plastic Electronics Factory Heralds New, 8 January 2007
- [7] Department for Business Innovation & Skills, Plastic Electronics: A UK Strategy for success
- [8] NSF, Technological Challenges in Organic Electronics, Photonics and Magnetics Applications
- [9] National Nanotechnology Initiative Signature Initiative: Nanoelectronics for 2020 and Beyond, www.nano.gov/html/research/NNISigInitNanoelectronicsJul2010.pdf
- [10] 龚永林. 印制电子综述(1~3). 印制电路信息, 2009, (7~9)

The Development of Plastic Electronics in U.S.

WANG Jiacun

(Department of Science and Technology of Shandong Province, Jinan 250014)

Abstract: Plastic electronics industry has been a cutting-edge technology since the 21 century. This paper analyzes major experience and measures in plastic electronics development and innovation obtained by science and industry, and studies the important role that U.S. plays in technological revolution. The paper also points out that there is bright market prospects for U.S. plastic electronics industry.

Key words: United States; electronic revolution; plastic electronics; organic electronics; flexible manufacture; plastic electronics industry

① 电子纸专利技术分析. 先进制造与新材料科学研究动态监测快报, 2010, (21)