

崔铮 等 编著

P 印刷电子学

——材料、技术及其应用

Printed Electronics:
Materials,
Technologies and
Applications



崔铮 等 编著

P 印刷电子学 —— 材料、技术及其应用

rinted Electronics:
Materials,
Technologies and
Applications

YINSHUA DIANZI XUE

图书在版编目(CIP)数据

印刷电子学：材料、技术及其应用 / 崔铮等编著

. 一北京：高等教育出版社，2012.3

ISBN 978-7-04-034129-4

I. ①印… II. ①崔… III. ①印刷工业-电子学

IV. ①TS8

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第008249号

策划编辑 刘剑波
插图绘制 尹 莉

责任编辑 刘剑波
责任校对 杨雪莲

封面设计 于 涛
责任印制 朱学忠

版式设计 余 杨

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街4号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	29	版 次	2012年3月第1版
字 数	480千字	印 次	2012年3月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	69.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 34129-00

前 言

熟悉我的人都知道,这些年来我一直活跃在微纳米加工技术领域:1989年到英国剑桥大学微电子研究中心开始微纳米加工技术方面的研究,1993年加入英国卢瑟福国家实验室微结构中心后继续从事这方面的研究,自2005年以来已出版了微纳米加工技术及其应用方面的两本中文专著和两本英文专著,在中国科学院物理研究所举办的每两年一期的“全国微纳米加工技术讲习班”上担任主讲,至今这个讲习班已经举办了4期。但我在2009年10月全职回国到中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所工作后,却在所里建立了一个印刷电子技术研究中心,开辟了一个新的研究领域。

有意转向研究印刷电子技术的想法在回国前就已经萌生。从事微纳米加工技术研究20年,我深知这一技术领域已经趋向成熟。只要有雄厚的资金,购买先进的微纳米加工设备,一般的技术人员通过培训都能做出漂亮的结果。但要实现批量化与产业化的加工则不是一般投资就能奏效的。看看现在全球还有几家公司能够批量生产最新一代的集成电路芯片,就可以明了微纳米加工技术的最后出路在哪里。微纳米加工技术与印刷电子技术看似无联系,但印刷电子技术的核心是将印刷作为一种电子制造技术,与目前通用的微纳米加工技术仅是形式与方法的不同,两者实际上是相通的。近年来各种纳米材料的发展为用印刷方法制作电子器件提供了极好的机遇。纳米材料在电子器件中的应用一般需要自上而下的传统微纳米加工方法结合自下而上的纳米材料自组装方法来实现,印刷则提供了一个非常简单的将纳米材料集成到电子器件中的途径。几年前我就开始对这种新的加工方法产生兴趣并做了大量调研。在2008年撰写《微纳米加工技术及其应用》(第二版)时将喷墨打印作为一种沉积式加工技术写进了书中。2009年4月回国参加国家自然科学基金委员会“纳米光电器件战略研讨会”,我在大会报告中首次提出“大面积印刷方式是低成本产业化纳米加工技术发展的一个有前途的方向”。2009年9月临回国前我专程访问了英国的国家印刷电子技术中心,为回国开展印刷电子这一新的研究领域做了充分准备。

得益于国家引进海外高层次人才的新政策,我有幸于2009年9月入选中共中央组织部第二批“千人计划”,为我国发展创造了绝好的机遇。在中国科学院、苏州纳米技术与纳米仿生研究所与苏州工业园区的大力支持下,我于2009年10月开始筹建“印刷电子技术研究中心”。在半年多时间内组建了10余人的研究团队,部署了“印刷电子材料合成”、“印刷晶体管技术与应用”、“印刷电子工艺与设备”、“印刷电子器件封装技术”4个研究方向,购置了印刷电子研究的关键设备,建成了包括千级超净实验室与化学实验室在内的300 m²的实验室,印刷电子技术的研究与开发在苏州纳米技术与纳米仿生研究所轰轰烈烈地开展起来。

回国后选择研究印刷电子技术除了与我原来的微纳米加工技术背景有密切联系外,另一个重要原因是国内科技界与工业界对这一新兴技术领域还没有给予足够重视。国内科技界在过去10多年中专注于有机电子技术的研究,在有机发光(OLED)技术方面投入较大,主要是材料合成方面的研究,参与的科研人员也以化学领域的专家为主。在印刷电子研究方面,除了有少数科研团队购买或自制喷墨打印设备做些零星实验之外,没有形成大的研究方向与系统的研究规划。与国内印刷电子技术研究遭遇冷落的局面形成强烈反差的是,国外尤其是中国周边国家与地区近年来大力开发印刷电子技术。韩国将印刷与柔性电子技术作为国家优先发展的新技术,新加坡也有政府的大力支持。我在2011年初到韩国参加印刷电子技术研讨会期间参观了韩国国家印刷电子中心(Korea Printed Electronics Center, KPEC),在该中心的大厅悬挂着一幅世界地图,凡是大力开发印刷电子技术的国家和地区都被标注在地图上,有英国、美国、德国、荷兰、芬兰等,亚洲有韩国、日本、新加坡以及中国台湾地区,唯独中国大陆是空白^①。在国外看来,中国没有国家层面上的印刷电子技术研究开发方面的活动。事实也的确如此,我回国后创建的印刷电子技术研究中心是国内首个专门从事印刷电子技术研究的中心。所以在过去两年中我除了领导我的印刷电子中心外,另一个任务就是利用各种场合宣传介绍印刷电子技术,包括在受邀的学术会议与讲座上介绍印刷电子技术,并在2010年7月举办了国内首届印刷电子技术研讨会。希望通过这些宣传吸引更多的研究者投入到印刷电子技术的研究中,同时希望引起政府与工业界的关注,增加投入力度,避免与国

^① 韩国政府官员在2011年11月召开的“国际柔性印刷电子会议”上宣布,从2012年开始的6年时间内,政府与工业界将联合投资1725亿韩元(相当于10亿人民币),大力发展印刷电子研发与产业。

外形成越来越大的差距。撰写本书的想法也正是在这一大背景下形成的。

要吸引更多的人关注印刷电子技术,首先要让更多的人了解印刷电子技术。中国还没有全面介绍印刷电子技术的专业书籍,中国需要这样一本书。我在2011年初形成了写书的想法,并得到了高等教育出版社的大力支持。但单凭我一个人无法完成撰写这本书的任务。虽然我过去曾独立撰写了多本微纳米加工技术方面的专著,但微纳米加工技术毕竟是我从事了20多年研究的领域。印刷电子学则是一个全新的领域,也是一个学科交叉性极强的领域。幸好我已经组建了一支年轻的、由多学科人才组成的专门研究印刷电子技术的科研团队,我和我的团队成员共同承担了撰写本书的任务。参加撰写的人员除了我本人外,还有苏州纳米技术与纳米仿生研究所印刷电子技术研究中心的邱松(第2章)、陈征(第3章)、林剑(第4章)、赵建文(第5章)、马昌期(第6章)、苏文明(第7章和第8章),我负责撰写了本书的第1章和第9章,并对全书做了统一检查修改,因此本书是我的研究团队集体努力的结晶。写作群体的成员都通晓各自领域的专业知识,并具有一定研究经验。他们大多在主持相关领域的国家自然科学基金研究项目,并在印刷电子技术研究中心负责各自领域的研究工作。撰写第2章的邱松博士具有有机合成化学的专业背景,在中心负责有机半导体材料的合成研究;撰写第3章的陈征博士具有无机纳米材料方面的研究经历,在中心负责开发新型可印刷无机纳米材料;撰写第4章的林剑博士在芬兰做博士后期间曾从事用喷墨打印技术制备电子器件的研究,在中心负责印刷工艺的改进研究;撰写第5章的赵建文博士曾在新加坡从事用碳纳米管墨水制备场效应晶体管的研究,在中心负责印刷晶体管技术特别是基于碳纳米管的印刷晶体管技术研究;撰写第6章的马昌期博士是有机化学领域的专家,曾在德国多年从事有机光伏材料与器件的研究,在中心负责可印刷有机薄膜太阳能电池技术的研究;撰写第7章和第8章的苏文明博士在博士研究生期间和后来的工作中一直从事有机发光材料与器件的研究,并对有机电子器件的封装技术有深入的了解,在中心负责开发柔性有机与印刷电子器件的封装技术。

考虑到印刷电子学本身的多学科性与学科交叉性,读者群可能来自不同学科背景。因此本书各章均以描述基本原理为主,辅以大量实例与图表,避免烦琐的数学描述。作为中国第一本专门介绍印刷电子学的书籍,本书既是一本印刷电子学的入门读物,也具有一定的专业知识深度,适于具备大学物理、化学、电子学基础的读者。每章都附有相关参考文献与网址,可供

读者进一步获取详细信息。

需要指出的是,印刷电子技术对我们大家都是一个新领域。我的印刷电子技术研究中心成立也不过一年多时间,参加撰写本书的研究人员还没有积累足够多的自己的研究成果。因此,本书除了包含一些我们自己的研究成果外,主要是介绍与印刷电子相关的一些技术的基本原理,以及国外在这一领域公开发表的研究成果。在内容方面难免挂一漏万,或有谬误之处,真诚希望相关领域的专家与广大读者给予批评指正。

印刷电子产业是一个新兴产业。中国是全球最大的电子产品生产国,也是全球最大的电子产品消费国。可以预见,未来印刷电子产品最大的市场在中国。但我们不能等待国外将技术开发成熟后大举占领中国市场。中国科技界与工业界应当积极行动起来,发展中国自己的印刷电子技术与产业。希望本书能为推动这一进程做出贡献。



2011年9月5日于苏州

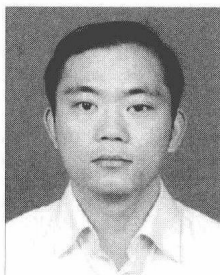
作者简介



崔铮,毕业于东南大学(原南京工学院),获学士(1981年)、硕士(1984年)、博士(1988年)学位。1989年受英国科学与工程研究委员会访问研究基金资助,到英国剑桥大学微电子研究中心做博士后研究。1993年到英国卢瑟福国家实验室微结构中心任高级研究员,自1999年起任微纳米技术首席科学家(Principal Scientist)、微系统技术中心负责人(Group Leader)。2004年入选英国工程技术学会(IET)会士(Fellow)。主要从事微纳米加工技术及其应用方面的研究,先后独立与合作发表学术论文190余篇。自2005年以来先后独立撰写出版微纳米加工技术方面的中英文专著4部。2009年入选中共中央组织部第二批“千人计划”(创新类),同年10月全职到中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所工作,创建了国内首个印刷电子技术研究中心。目前主持中国科学院知识创新工程方向性项目“大面积印刷电子技术及其应用基础研究”,2011年获国家自然科学基金纳米制造重大研究计划重点项目支持,主持“纳米材料印刷技术的基础研究”。2011年创办苏州纳格光电科技有限公司,推动印刷电子技术向产业的转化。



邱松,2000年本科毕业于吉林大学化学系,2005年于吉林大学超分子结构与材料重点实验室获理学博士学位。主要研究宽禁带有机聚合物光电材料。2005年进入德国 Wuppertal 大学 U. Scherf 教授研究组从事博士后工作,主要进行聚合物场效应晶体管与水溶性聚电解质的研究工作。2010年4月加入中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所,受聘为副研究员。现从事高迁移率有机/聚合物可印刷电子材料的研究。2011年获国家自然科学基金青年基金资助项目“可印刷高迁移率有机/聚合物半导体材料的合成与器件研究”。



陈征,助理研究员,2002年获得中国科学技术大学材料物理专业学士学位,2007年获得该校凝聚态物理专业博士学位,期间主要从事宽禁带半导体薄膜的生长、物性研究。2007年进入中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所生物医学部工作,从事无机纳米半导体的制备、光催化、光物理研究;2010年加入印刷电子技术研究中心,主要从事可印刷无机半导体、介电层及其高性能场效应晶体管研究。目前主持1项国家自然科学基金青年基金项目。



林剑,2003年本科毕业于东南大学,同年进入中国科学院长春应用化学研究所高分子物理与化学国家重点实验室,并于2008年7月获得博士学位。随后在芬兰奥博学术大学(Åbo Akademi University)进行博士后研究(2008年8月—2009年年底)。2010年1月加入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研究中心。硕博连读期间主要从事有机电子器件的器件物理研究,特别是不同制备工艺对器件微结构与电性能的影响;在芬兰做博士后期间参加了由芬兰国家技术创新局(TEKES)牵头的大型印刷电子综合研究项目,参与墨水试用与改良、高分辨率喷印、承印材料表面能对印刷薄膜效果的影响、多层器件结构

打印等子课题的研究;自 2008 年以来广泛接触了包括喷墨、凹版、微接触、柔版等多种印刷电子工艺以及相关的电子器件制备和处理方法。目前主持国家自然科学基金项目“印刷金属纳米线薄膜的结构及其透光率和电学性能”。



赵建文, 2008 年 7 月于中国科学院理化技术研究所获博士学位, 研究基于化学气相沉积法掺杂碳基功能材料可控制备及相关应用。2009 年 1 月—2010 年 8 月在新加坡南洋理工大学材料科学与工程学院从事博士后研究, 从事碳纳米管和石墨烯可控生长、功能化修饰、半导体碳纳米管墨水制备以及高性能场效应晶体管器件构建及其相关应用研究。2011 年 1 月加入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研究中心, 受聘为副研究员, 主要从事碳基可印刷墨水制备、可印刷碳基高性能薄膜晶体管器件构建及在逻辑电路、化学和生物传感等相关领域的应用研究。已在国内外著名刊物发表相关研究论文 20 多篇。2011 年获国家自然科学基金资助项目“印刷碳纳米管薄膜晶体管器件构建及电性能研究”。



马昌期, 1998 年 8 月毕业于北京师范大学化学系, 获理学学士学位。2003 年 5 月在中国科学院理化技术研究所(原感光化学研究所)获理学博士学位。2003 年 6 月—2004 年 1 月在英国 Heriot-Watt 大学从事博士后研究。2004 年 2 月得到德国洪堡基金会资助在德国乌尔姆大学有机化学 II 及先进功能材料研究所做合作研究, 2007 年 1 月起做 Habilitand, 任树形共轭分子及有机薄膜光伏研究组组长。长期从事有机光电功能材料的设计、合成、表征及应用研究, 主要侧重于具有大共轭体系的寡聚、高聚功能材料的分子设计

合成及其在有机太阳能电池、有机非线性光等方面的应用。2011年6月回国,受聘中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所研究员,任印刷电子技术研究中心有机薄膜光伏技术课题组组长。



苏文明,2007年毕业于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,获理学博士。硕博连读期间曾先后两次赴新加坡 SIMTech(15个月)进行培训并从事 OLED 平板显示器件方面的国际合作项目研究,在 *Appl. Phys. Lett.* 杂志上发表第一作者论文两篇。目前在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研究中心从事 OLED 器件与照明、OPV 器件及其印刷器件柔性薄膜封装等相关研究工作。负责执行江苏省科技攻关工业支撑项目(OLED 照明)1项;申请 OLED 器件与柔性薄膜封装相关发明专利4项,专利授权1项。目前主持国家自然科学基金青年基金项目“气溶胶喷墨打印光散射微周期栅格结构对白光 OLED 器件光提取的应用研究”。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 什么是印刷电子学	(2)
1.2 发展印刷电子学的重要性	(9)
1.3 印刷电子学的多学科性	(13)
1.4 本书的内容与结构	(16)
参考文献	(19)
第 2 章 有机印刷电子材料	(21)
2.1 引言	(22)
2.2 有机导体材料	(23)
2.2.1 发展历程	(23)
2.2.2 导电高分子(导电聚合物)	(24)
2.3 可印刷有机小分子高迁移率半导体材料	(29)
2.3.1 稠环类芳香化合物	(30)
2.3.2 含硫杂环化合物及噻吩齐聚物	(33)
2.3.3 其他高迁移率材料	(36)
2.4 可印刷聚合物高迁移率半导体材料	(37)
2.4.1 p 型聚合物材料	(38)
2.4.2 n 型聚合物材料	(44)
2.4.3 双极型晶体管及其高迁移率聚合物材料	(46)
2.4.4 存在的问题	(48)
2.5 其他有机印刷电子材料	(49)
2.5.1 有机介电材料	(49)
2.5.2 有机传感材料	(53)
2.6 小结	(55)
参考文献	(56)

第3章 无机印刷电子材料	(65)
3.1 引言	(66)
3.2 金属材料	(68)
3.2.1 金属墨水的制备	(69)
3.2.2 金属墨水的热处理工艺	(71)
3.2.3 金属墨水的热稳定性	(73)
3.3 透明氧化物	(73)
3.3.1 透明氧化物 sol-gel	(74)
3.3.2 透明导电氧化物(TCO)	(75)
3.3.3 透明氧化物半导体(TOS)	(77)
3.4 单壁碳纳米管	(81)
3.4.1 单壁碳纳米管的制备和选择性化学	(82)
3.4.2 单壁碳纳米管的纯化	(84)
3.4.3 金属型碳纳米管薄膜	(86)
3.4.4 半导体型单壁碳纳米管	(87)
3.5 石墨烯	(88)
3.6 硅和锗	(90)
3.6.1 溶液型硅墨水	(91)
3.6.2 硅颗粒型墨水	(91)
3.6.3 衬底	(98)
3.7 金属硫族化合物半导体	(98)
3.8 硅氧材料	(100)
3.9 纳米颗粒/聚合物复合介电材料	(101)
3.10 小结	(107)
参考文献	(108)
第4章 印刷电子制造工艺与相关设备	(127)
4.1 引言	(128)
4.2 喷墨式印刷	(131)
4.2.1 喷墨式印刷的分类和应用优势	(131)
4.2.2 喷墨打印	(132)
4.2.3 气流喷印	(143)
4.2.4 电流体动力学喷印	(147)

4.2.5 喷墨式印刷的图案载体制作	(148)
4.3 孔版印刷工艺及设备	(149)
4.3.1 网版印刷的工作原理和优势	(150)
4.3.2 网版印刷在印刷电子制造中的应用和挑战	(152)
4.3.3 网版的结构与制作	(153)
4.4 凹版印刷工艺及设备	(154)
4.4.1 凹版印刷的工作原理和优势	(155)
4.4.2 凹版印刷在印刷电子制造中的应用和挑战	(156)
4.4.3 凹印版的结构与加工	(157)
4.5 凸版式印刷工艺及设备	(158)
4.5.1 柔版印刷	(159)
4.5.2 微接触印刷	(161)
4.6 间接式印刷工艺及设备	(162)
4.6.1 平版胶印	(163)
4.6.2 凹版胶印	(163)
4.6.3 烫印	(165)
4.7 印前处理工艺及设备	(166)
4.7.1 印前图案设计	(166)
4.7.2 表面能处理	(167)
4.7.3 涂层处理	(168)
4.7.4 表面压印	(170)
4.8 印后处理工艺及设备	(171)
4.8.1 加热烘干与烧结	(172)
4.8.2 紫外线固化	(173)
4.8.3 退火处理	(173)
4.9 小结	(174)
参考文献	(176)
第5章 印刷晶体管:原理、结构与制造技术	(191)
5.1 引言	(192)
5.2 晶体管分类	(193)
5.3 晶体管基本原理	(194)
5.3.1 金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)的	

基本原理	(194)
5.3.2 载流子及其迁移率	(197)
5.3.3 晶体管的基本参数	(199)
5.4 薄膜晶体管结构与制造技术	(214)
5.4.1 薄膜晶体管的结构	(214)
5.4.2 薄膜晶体管的特点	(217)
5.4.3 薄膜晶体管制造技术	(219)
5.5 全印刷晶体管的制造技术	(239)
5.5.1 晶体管基本材料的可印刷性	(240)
5.5.2 印刷晶体管的表面形貌效应	(242)
5.5.3 印刷晶体管的界面效应	(243)
5.5.4 印刷晶体管的沟道长度对器件性能的影响	(247)
5.5.5 印刷晶体管存在的问题及其改进	(249)
5.6 印刷逻辑电路基础	(251)
5.6.1 与门和或门	(252)
5.6.2 反相器	(252)
5.6.3 环形振荡器	(254)
5.6.4 触发器	(254)
5.7 小结	(256)
参考文献	(257)

第6章 印刷有机薄膜太阳能电池:原理、结构、材料与制造

技术	(263)
6.1 引言	(264)
6.1.1 太阳能与太阳能的利用	(264)
6.1.2 太阳能光伏电池的分类	(264)
6.1.3 有机薄膜光伏电池发展简史	(266)
6.2 有机薄膜光伏器件的工作原理与性能表征	(269)
6.2.1 有机薄膜光伏器件的工作原理	(269)
6.2.2 有机薄膜光伏器件的基本结构	(270)
6.2.3 有机薄膜光伏器件的性能表征	(272)
6.2.4 影响有机薄膜光伏器件性能的主要因素	(274)
6.3 有机薄膜光伏电池材料	(279)

6.3.1	透明衬底材料	(279)
6.3.2	透明导电电极	(279)
6.3.3	有机半导体材料	(283)
6.3.4	无机半导体材料	(291)
6.3.5	功能辅助材料	(291)
6.4	结构倒置有机光伏电池与叠层有机光伏电池	(293)
6.4.1	结构倒置有机光伏电池	(293)
6.4.2	叠层有机光伏电池	(295)
6.4.3	结构倒置叠层有机光伏电池	(297)
6.5	有机薄膜光伏器件的制备技术	(299)
6.5.1	旋涂技术	(299)
6.5.2	刮刀涂布	(300)
6.5.3	丝网印刷	(301)
6.5.4	喷墨印刷	(302)
6.5.5	有机薄膜光伏器件的其他印刷制备工艺	(303)
6.6	有机薄膜光伏器件的连续制备工艺技术现状与发展 展望	(303)
6.6.1	有机薄膜光伏器件的连续制备工艺技术现状	(303)
6.6.2	从事有机薄膜光伏技术的公司企业介绍	(305)
6.7	小结	(307)
	参考文献	(308)
第7章	印刷发光与显示器件:原理、结构与制造技术	(323)
7.1	引言	(324)
7.1.1	发光与显示技术简介	(325)
7.1.2	OLED 显示技术与照明概况	(327)
7.1.3	OLED 技术发展历程	(328)
7.2	OLED 发光与显示及其原理	(331)
7.2.1	电荷注入与传输	(332)
7.2.2	激子形成与发光	(332)
7.2.3	OLED 基本性能与评测	(333)
7.3	OLED 器件结构与制造	(336)
7.3.1	有机小分子 OLED 器件结构设计及发展	(337)

7.3.2	聚合物有机电致发光器件	(340)
7.3.3	有机电致发光器件功能层材料	(341)
7.4	OLED 白光照明技术	(346)
7.4.1	OLED 白光产生原理及实现方式	(346)
7.4.2	白光 OLED 照明技术重要参数	(347)
7.4.3	OLED 白光照明产业现状与前景	(350)
7.5	印刷 OLED 技术	(352)
7.5.1	印刷技术与 OLED 的发展	(352)
7.5.2	印刷 OLED 产业技术现状	(355)
7.6	其他可印刷显示技术	(357)
7.6.1	电子纸	(357)
7.6.2	电致变色	(359)
7.7	小结	(361)
	参考文献	(362)
第 8 章	印刷电子器件的封装技术	(371)
8.1	引言	(372)
8.1.1	印刷电子器件的特征	(373)
8.1.2	印刷电子器件的封装要求	(375)
8.1.3	封装技术概述与发展现状	(376)
8.2	印刷电子器件的老化	(377)
8.2.1	印刷电子器件老化衰减	(377)
8.2.2	印刷电子器件老化特征及原理	(378)
8.3	印刷电子器件封装原理与检测	(380)
8.3.1	封装薄膜结构与水氧渗透	(380)
8.3.2	柔性衬底的防水氧渗透处理	(380)
8.3.3	封装结构对水氧的渗透机理	(381)
8.3.4	水氧渗透阻挡性能的测试	(383)
8.4	薄膜封装技术与柔性薄膜封装	(387)
8.4.1	封装及材料的发展历程	(387)
8.4.2	柔性器件薄膜封装及技术	(388)
8.4.3	封装薄膜常用生长技术及原理	(398)
8.5	印刷电子器件的薄膜封装	(403)