



CRC Press
Taylor & Francis Group

智能传感技术丛书

Technologies for Smart Sensors
and Sensor Fusion

智能传感器 及其融合技术

[加] 凯文·亚鲁 (Kevin Yallup) 主编
克日什托夫·印纽斯基 (Krzysztof Iniewski)
王卫兵 徐倩 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



智能传感技术丛书

智能传感器及其融合技术

Technologies for Smart Sensors and Sensor Fusion

[加] 凯文·亚鲁 (Kevin Yallup) 主编
克日什托夫·印纽斯基 (Krzysztof Iniewski)
王卫兵 徐倩 等译



机械工业出版社

本书是一本全面介绍当今智能传感器及其融合技术的著作，以 24 章内容从 4 个方面对当今传感器及其融合技术进行了全面且细致的介绍，内容涵盖了微流体技术及生物传感器、化学及环境传感器、汽车及工业传感器以及与传感器相关的软件和传感器系统。这些内容深入展示了智能传感器及其融合领域丰富多彩的开发工作。通过本书希望读者能够及时、深入地了解未来传感器的工作，并能够继续开发自己的新型智能传感器及系统。

本书适合智能传感器研究人员、工程技术人员，智能设备、可穿戴设备研发人员阅读参考，也可供高等院校相关专业师生参考。

Technologies for Smart Sensors and Sensor Fusion/by Kevin Yallup and Krzysztof Iniewski/ ISBN: 978-1-4665-9550-7.

Copyright © 2014 by Taylor & Francis Group, LLC.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下，CRC 出版公司出版，并经其授权翻译出版。版权所有，侵权必究。

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-6386 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能传感器及其融合技术/(加)凯文·亚鲁 (Kevin Yallup),
(加)克日什托夫·印纽斯基 (Krzysztof Iniewski) 主编; 王卫兵
等译. —北京: 机械工业出版社, 2019. 2

(智能传感技术丛书)

书名原文: Technologies for Smart Sensors and Sensor Fusion
ISBN 978-7-111-61645-0

I. ①智… II. ①凯… ②克… ③王… III. ①智能传感器
IV. ①TP212.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 282390 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 任鑫 责任编辑: 吕潇 任鑫

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 马精明

责任印制: 孙炜

北京玥实印刷有限公司印刷

2019 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 28 印张 · 627 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-61645-0

定价: 139.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

译者序

本书是一本全面介绍当今智能传感器及其融合技术的著作，以 24 章内容从 4 个方面对当今传感器及其融合技术进行了全面且细致的介绍，内容涵盖了微流体技术及生物传感器、化学及环境传感器、汽车及工业传感器以及与传感器相关的软件和传感器系统。

从所介绍内容的覆盖面来看，本书既包括了诸如用于实时观测和遥感数据采集的集成地理信息系统、远程 RF 探测、传感器技术到医疗器械环境的转化等非常宏观的传感器技术，又包括了用于生物样本制备和分析的基于微滴的微流体技术、微流体技术中被动流体控制的润湿性裁剪、用于自动多步骤过程即时诊断的二维纸网络、碳纳米纤维作为硅兼容平台上的电流生物传感器、多区域表面等离子体谐振光纤传感器等非常微观的微型传感器技术，还包括了用于安全应用的电容式传感器，如汽车、消费和工业应用中的非接触角度检测方面的民用和工业传感器。此外，对于多传感器系统的集成可靠性、电磁污染环境中集成过温传感器的可靠性、走向无监督的智能化学传感器阵列等有关传感器应用和传感器系统方面的专题内容也有介绍。

从技术方面来看，本书的内容包括了纳米尺度的材料处理、材料的表面改性、微流体动力学、生物传感、化学反应特性表征以及电子、电磁、微机械加工等众多技术领域。其每一章，都对相关领域的技术背景和最新发展进行了详细、深入的介绍。作者首先通过文献综述对相关领域的发展过程及最新的研究现状进行全面、详细地分析，并给出该领域中尚未解决或者是需要继续改进的相关问题。在此基础上作者就拟解决的问题提出了相应的解决思路和设想，并由此展开了相应的理论分析，从而推导出了问题解决方案。其中包括了问题解决的理论依据、相应的数学模型以及必要的验证性分析。为了进一步验证问题解决方案的效果，作者进一步介绍了方案的具体实施过程，给出了详细的实际结果，并对实际结果进行深入、详尽的分析，以此为读者提供了一个全面、完整的传感器技术及其融合的研究、开发过程。

作者所做工作及相关技术的介绍主要是从学术研究和技术开发角度进行的，其内容是全面、客观和严谨的，但同时也对相关领域的技术基础给出了相对完整的介绍，使得其内容更加具有通俗性和可读性。作者的宗旨是通过相关内容的介绍，使得读者能够对相关领域的基本概念、技术原理、发展历程以及最新的研究现状有一个全面的了解，并通过具体开发案例的深入介绍，使读者了解该领域中所采用的技术方法、技术手段以及分析问题和解决问题的技术路径。因此，本书不仅从内容的广度上给读者带来了一个全面的概览性视野，还从理论和技术深度

上带给读者一个深入的审视性透视，使读者通过本书的内容，全面了解和深刻领会相关领域的技术内容和技术问题。

此外，为提高传感器检测的准确度，提高传感器系统的可靠性和容错能力，提高传感器系统的智能化水平，作者从不同的技术领域、不同的技术方法上提出了各种解决问题的方案，包括大量的传感器布置、信号处理以及相关的技术分析等方面的内容，对读者的传感器应用和传感器融合技术能力和技术水平的提高是十分有益的。

本书由王卫兵、徐倩等翻译，其中的第1部分、第2部分和第3部分主要由王卫兵翻译，第4部分主要由徐倩翻译。张宏、刘瑞玲、张霁、张立超、郭文兰、张维波、代德伟、金胜利、孙宏、石林、白小玲、贾丽娟、韩再博、闫宏宇、田皓元、王卓参与了本书的翻译工作。全书由王卫兵统稿。在本书的翻译过程中，全体翻译人员为了尽可能准确地翻译原书的内容，对书中的相关内容进行了大量的查证和佐证分析，以求做到准确无误。鉴于本书的内容涵盖面广，覆盖的技术领域众多，专业性强，并且具有相当的深度和难度，因此，翻译中的不妥和错误之处也在所难免，望广大读者予以批评指正。

译者

2019年1月于哈尔滨

原书前言

微系统和微机电系统（Micro Electro Mechanical Systems, MEMS）已经彻底改变了传感器和检测器的世界。一系列小型化的传感器已经出现，可以为便携式设备增加各种功能。例如，基于 MEMS 的加速度计和陀螺仪可以为便携式设备增加许多运动感知功能，使运动能够用于设备的控制或在捕捉数字图像时进行抖动的校正。诸如 CCD 以及最近的 CMOS 图像光学传感器已经给摄影带来了变革，并为各种应用实现了低成本的图像获取。

到目前为止，大多数传感器应用都专注于单传感器及相对简单的处理，以从传感器提取特定的信息。然而，有两个激动人心的新发展使传感器超越了简单的运动感知或图像捕捉领域，从而提供更多信息以及应用，如建筑环境中的位置、触觉感知，以及诸如毒素或流感病原体等化学物质的存在感知。

这些新型传感器为机器提供了以更智能和更复杂的方式与周围世界进行交互的潜力，并可能导致诸如自主机器人那样更智能系统的出现，并能够独立完成复杂而艰巨的任务。本书旨在概述这些令人兴奋的新发展。

本书研究的第一个趋势是可以集成到阵列中的传感器数量和种类越来越多。不断增加的多样性意味着越来越多不同的刺激可以被可靠和准确地感知，从而形成更为复杂的环境感知方式。本书包含多种应用领域的传感器处理技术，例如生物技术、医学科学、化学检测、环境监测、汽车传感以及工业应用中的控制和感知等。这些领域传感能力的改进为传感器带来了许多令人兴奋的新应用。

第二个趋势是通信设备的可用性和计算能力的提升，它们都将支持降低来自多个传感器的原始传感器数据量的算法，并将原始传感转换为传感器阵列所需要的信息，从而能够将感测结果快速地传输到需求点。本书汇集了许多内容，以讨论软件和传感器系统以及传感器融合方面的问题。

本书中各章节的内容，均为从工作在传感器技术前沿的作者那里收集并加以整理的，这些内容展示了智能传感器和传感器融合领域丰富多彩的开发工作。通过本书，希望读者能够及时、深入地了解未来传感器的工作，并能够继续开发自己的新型智能传感器和传感器系统。

目 录

译者序

原书前言

第1部分 微流体技术及生物传感器

第1章 用于生物样本制备和分析的基于微滴的微流体技术	1
1.1 引言	1
1.2 基于微滴的操作	2
1.2.1 微滴的产生	2
1.2.2 微滴内试剂的组合及混合	4
1.2.3 微滴的培养	6
1.2.4 微滴的读出策略	6
1.3 基于微滴的微流体的前景	9
1.3.1 基于LC/MS的蛋白质组增强分析	9
1.3.2 单细胞化学分析	13
1.4 结论	13
参考文献	13
第2章 微流控技术中被动流体控制的裁剪润湿性	17
2.1 引言	17
2.2 润湿理论	18
2.2.1 热力学平衡	18
2.2.2 润湿迟滞	19
2.2.3 动态润湿	21
2.3 微通道的润湿性裁剪	22
2.4 微通道中的流体控制	25
2.4.1 毛细管流	25
2.4.2 毛细管拉普拉斯阀	28
2.4.3 润湿性流导引	30
2.4.4 分散相微流体	34
2.5 总结与展望	38
参考文献	39
第3章 用于自动多步骤过程即时诊断的二维纸网络	46
3.1 低资源环境下性能改进试验的需求	46

3.2	纸基的诊断是一个潜在的解决方案	46
3.3	用于自动多步样品处理的纸网络	47
3.4	纸流体工具箱: 纸网络中的泵控制和阀	48
3.5	二维纸网络 (2DPN) 的应用	52
3.5.1	样本稀释和混合	53
3.5.2	小分子提取	53
3.5.3	信号扩增	54
3.5.4	与纸基微流体技术互补的特定技术进展	55
3.6	总结	57
	参考文献	57
第 4 章	碳纳米纤维作为硅兼容平台上的电流生物传感器	60
4.1	引言	60
4.2	背景	60
4.2.1	第一代电流传感器	61
4.2.2	第二代电流传感器	61
4.2.3	第三代电流传感器	61
4.3	碳纳米纤维作为生物传感器的电极	62
4.3.1	碳纳米纤维生长技术	62
4.3.2	纳米纤维电极的功能化	64
4.4	基于碳纳米纤维的生物传感器的具体应用	67
4.5	与传感器结构的集成	68
4.6	硅的兼容性	68
4.7	相关挑战	69
4.8	结论	69
	参考文献	70
第 5 章	传感器技术到医疗器械环境的转化	73
5.1	引言	73
5.2	医疗器械的 FDA 监管控制过程	73
5.2.1	器械如何使用	74
5.2.2	安全性和有效性	74
5.2.3	实质等效比较的建立	74
5.2.4	监管途径	75
5.2.5	独立的器械测试	76
5.2.6	引起监管决策点的传感器特性的一些具体实例	76
5.3	葡萄糖传感器	78
5.4	胶囊内窥镜	80
5.5	人工耳蜗植入	80
5.6	FDA 监管的当前趋势	81

5.7 总结	83
参考文献	83
第2部分 化学及环境传感器	
第6章 多区域表面等离子体谐振光纤传感器	85
6.1 引言	85
6.2 平面 SPR 理论概述	85
6.3 光纤标准	90
6.4 光纤 SPR 理论	91
6.5 建模结果	93
6.6 实验	94
6.6.1 纤维制备	94
6.6.2 MATLAB 算法	97
6.6.3 GAS 样品生成	97
6.7 结果	97
6.7.1 Pd/H ₂	97
6.7.2 Ag/H ₂ S	98
6.7.3 SiO ₂ /H ₂ O	100
6.8 多功能 SPR 纤维	101
6.9 结论	103
参考文献	103
第7章 有源纤芯光纤化学传感器及应用	105
7.1 AC-OFCS 和 EW-OFCS 的原理	105
7.1.1 用光纤芯作为传感器的 OFCS	106
7.1.2 用定制包层作为传感器的 OFCS	106
7.2 AC-OFCS 与 EW-OFCS 的比较	107
7.3 AC-OFCS 和应用	107
7.3.1 用裁剪定制的 PSOF 作为传感器的 AC-OFCS	107
7.3.2 用 LCW 作为传感器的 AC-OFCS	111
7.3.3 用 HWG 作为传感器的 AC-OFCS	116
参考文献	117
第8章 全聚合物柔性平板波装置	119
8.1 引言	119
8.1.1 动机	119
8.1.2 声波微传感器	120
8.1.3 重量测量	121

8.2 柔性平板波	121
8.2.1 背景	121
8.2.2 灵敏度	122
8.2.3 低刚度衬底效应	123
8.2.4 传感限制	124
8.3 制造	124
8.3.1 材料、制备和表征	124
8.3.2 封装	127
8.3.3 喷墨打印	127
8.3.4 FPW 设备测试	128
8.4 FPW 设备性能	128
8.4.1 质量加载	129
8.4.2 气体传感	130
8.4.3 聚合物表征	131
8.4.4 FPW 设备的性能极限	132
8.5 结论	132
参考文献	133
第9章 耳语画廊微腔传感	135
9.1 引言	135
9.2 耳语画廊微谐振器的基础	135
9.3 微腔的材料	138
9.4 微腔的结构	138
9.4.1 二氧化硅微球	140
9.4.2 微盘	140
9.4.3 二氧化硅微型环芯	141
9.4.4 双盘微型谐振器	141
9.4.5 硅环谐振器	141
9.4.6 液芯光环谐振器	141
9.4.7 瓶颈微谐振器	141
9.4.8 二氧化硅微泡谐振器	142
9.5 反应敏感	142
9.6 参考干涉仪检测	144
9.7 分频检测	145
9.8 等离子体激增	147
9.9 光机械传感	148
9.10 利用二次谐波生成进行感测	149
9.11 结论和未来研究	149
参考文献	150

第 10 章 动态纳米约束的耦合化学反应：III 蚀刻轨道及其前体结构中 Ag₂O 膜的电子表征	153
10.1 引言	153
10.2 试验	153
10.2.1 形成具有嵌入式 Ag ₂ O 膜的蚀刻轨道	153
10.2.2 电子表征	154
10.3 电子表征在 PET 箔蚀刻轨道内的 Ag ₂ O 膜的形成过程：结果和讨论	155
10.3.1 电流/电压谱	155
10.3.2 伯德图	160
10.3.3 傅里叶光谱	161
10.3.4 四极参数	162
10.4 总结	165
参考文献	166
第 11 章 走向无监督的智能化学传感器阵列	168
11.1 引言	168
11.2 智能化学传感器阵列	169
11.2.1 电位传感器	169
11.2.2 电位传感器的选择性问题	169
11.2.3 化学传感器阵列	170
11.3 盲源分离	170
11.3.1 问题描述	171
11.3.2 盲源分离的执行策略	171
11.3.3 非线性混合	173
11.4 盲源分离方法在化学传感器阵列中的应用	174
11.4.1 第一个结果	174
11.4.2 不同价情况下的基于独立成分分析的分析方法	174
11.4.3 使用先验信息估计电极的斜率	176
11.4.4 贝叶斯分离在化学传感器阵列中的应用	176
11.5 实用问题	178
11.5.1 尺度歧义的处理	178
11.5.2 ISEA 数据库	179
11.6 结论	179
参考文献	179
第 12 章 金属氧化物半导体气体鉴别传感器中的沸石转化层	181
12.1 引言	181
12.1.1 MOS 简介	181
12.1.2 气体相互作用模型：p 型传感器响应	182

12.1.3	等效电路模型	182
12.1.4	丝网印刷	183
12.1.5	什么是沸石	183
12.1.6	在该领域工作的其他团体	184
12.2	实验准备	184
12.2.1	材料的制作	184
12.2.2	材料表征	185
12.2.3	传感器特性和测试	186
12.2.4	相关理论: 扩散反应建模	187
12.3	测试结果	188
12.3.1	增加识别度	188
12.3.2	分析物调谐的气体传感器: 乙醇	189
12.3.3	分析物调谐的气体传感器: 二氧化氮	190
12.3.4	测试结果的扩散反应建模	191
12.4	讨论	192
12.4.1	实验结果	192
12.4.2	实验结果的扩散反应建模	194
12.5	结论	196
	参考文献	196

第3部分 汽车及工业传感器

第13章	微机械非接触式悬浮装置	198
13.1	引言	198
13.2	基于非接触式悬浮的微机械动力调谐陀螺仪	201
13.2.1	动力学模型及工作原理	201
13.2.2	数学模型	203
13.2.3	特定情况下的模型分析	205
13.3	零性系数的悬浮	209
13.3.1	悬浮的运动学特性及工作原理	209
13.3.2	数学模型	210
13.3.3	稳定悬浮的条件	212
13.3.4	弹性系数的补偿	215
	参考文献	217
第14章	汽车、消费和工业应用中的非接触角度检测	219
14.1	引言	219
14.2	非接触式电位计的应用	220
14.2.1	汽车行业中的应用	220
14.2.2	工业应用	221

14.2.3 消费应用	221
14.3 非接触角度检测技术	222
14.3.1 光学传感器	222
14.3.2 电容传感器	222
14.3.3 感应传感器	223
14.3.4 霍尔效应传感器	223
14.3.5 磁敏感晶体管 and MAGFET	223
14.3.6 磁阻	223
14.3.7 各向异性磁阻传感器	224
14.3.8 巨磁阻传感器	224
14.4 案例研究: 基于巨磁阻传感器的非接触式电位计	224
14.4.1 非接触式电位计的物理布置	225
14.4.2 巨磁阻传感器桥	226
14.4.3 传感器误差和温度补偿	227
14.4.4 放大和电气误差补偿	228
14.4.5 传感器信号线性化	230
14.4.6 测量结果和性能比较	235
14.5 结论	238
参考文献	239
第 15 章 用于安全应用的电容式传感器	241
15.1 引言: 目的、目标和现状	241
15.2 电容测量	242
15.2.1 电容测量中的物理学特性	242
15.2.2 应用示例	242
15.2.3 在开放环境中的寄生效应	246
15.2.4 屏蔽与耦合	248
15.3 测量电路及模式	249
15.3.1 应用示例中的测量系统	250
15.3.2 不同的方法: 电容层析成像	252
15.4 测量系统	254
15.4.1 评估电路的设计	254
15.4.2 与最先进的电容式传感器的比较	255
15.4.3 机器手臂上高反应性接近度检测传感器的测量	258
15.5 结论	260
参考文献	261
第 16 章 保形微机电传感器	265
16.1 引言	265
16.2 保形微机电传感技术	266

16.3	制造方法	267
16.4	封装	268
16.5	设计和特殊考虑	270
16.6	保形微机电传感器的例子	270
16.6.1	温度传感器	270
16.6.2	压力/力/触觉传感器	271
16.6.3	绝对压力传感器	273
16.6.4	加速度计	273
16.7	结论和未来的方向	275
	参考文献	275
第 17 章 射频毫米波模拟电路的嵌入式温度传感器表征		279
17.1	引言	279
17.2	用于射频电路测试的温度监测的物理原理	280
17.3	模拟电路的电气性能与温升产生之间的关系	285
17.4	温度感测策略: 差分温度传感器	287
17.5	实验例子	291
17.6	结论	294
	参考文献	295
第 4 部分 软件和传感器系统		
第 18 章 多传感器系统的集成可靠性		298
18.1	背景和相关工作	299
18.2	容错筛选过程	300
18.3	最佳线性数据融合	302
18.3.1	问题描述	302
18.3.2	问题的确定解	303
18.3.3	精确度分析	304
18.4	实验设置和结果	305
18.4.1	具有温度传感器的系统配置	305
18.4.2	具有加速度计的系统配置	306
18.4.3	温度传感器的校准	306
18.4.4	加速度计的校准	309
18.4.5	准确度比较	310
18.5	总结和讨论	313
	参考文献	313
第 19 章 非静态干扰破坏信号模型的可用信号处理构建 及干扰的检测与消除		315
19.1	可用信号段的一般统计分析	315

19.1.1	引言	315
19.1.2	段长度建模	315
19.1.3	语音音素段相关性的建模	320
19.1.4	语音音素段的目标干扰比建模	324
19.1.5	结论	328
19.2	鲁棒信号段干扰的物理建模实例	328
19.2.1	引言	328
19.2.2	语音的分类	329
19.2.3	语音分割特征	330
19.2.4	主成分分析	339
19.2.5	语音音素段分类	342
19.2.6	结论	348
19.A	附录 TIMIT 数据库	348
	参考文献	350
第 20 章 用于实时观测和遥感数据采集的集成地理信息系统		352
20.1	引言	352
20.2	相关工作	353
20.3	地理环境的建立	354
20.3.1	传感器网络	354
20.3.2	网格计算	355
20.3.3	网络实现	356
20.4	架构的必要性	356
20.5	环境网络实现和遥感方案	357
20.5.1	空气质量监测系统	359
20.5.2	空气污染预防模型	360
20.6	实验结果	362
20.7	结论	364
	参考文献	364
第 21 章 基于 Haar-Like 特征的人体感知多功能识别		366
21.1	引言	366
21.1.1	传感器网络	366
21.1.2	潜在的应用	366
21.1.3	上下文识别中的常规方法	368
21.1.4	方法概述: 多功能识别	371
21.2	为声音设计 Haar-like 特征	373
21.2.1	声音信号的特征	373
21.2.2	设计一维 Haar-Like 特征	373
21.2.3	Haar-Like 特征值的计算	377

21.2.4 Haar-Like 特征计算成本的降低	378
21.2.5 用于评估的声音数据集	378
21.3 加速度信号的 Haar-like 特征的设计	379
21.3.1 引言	379
21.3.2 人类活动识别的传统研究	380
21.3.3 传感器的技术参数和人类活动数据集	381
21.3.4 评估标准	381
21.3.5 统计特征的集成	381
21.4 紧凑型分类器的设计	384
21.4.1 引言	384
21.4.2 正向估计	386
21.4.3 冗余特征选择	388
21.4.4 动态查找表	388
21.4.5 性能评估	390
21.5 结论和讨论	393
参考文献	393
第 22 章 远程 RF 探测信息学	398
22.1 引言	398
22.2 背景	398
22.2.1 Shannon 和 Weaver 的总体框架	398
22.2.2 互信息	399
22.2.3 可观测量、观测和逻辑推理	400
22.3 远程 RF 探测模式	402
22.3.1 有效性问题和查询方	403
22.3.2 语义问题是有效性和技术问题之间的接口	404
22.3.3 技术问题	405
22.3.4 应用信息理论来分析问题的各个方面	407
22.4 讨论	408
22.5 未来展望	409
参考文献	410
第 23 章 电磁污染环境中集成过温传感器的可靠性	411
23.1 引言	411
23.2 热关断过温保护电路: 正常工作状态	412
23.3 无线电频率干扰环境下的热关断过温保护电路	414
23.4 试验结果	418
23.5 结论	420
参考文献	421

第 24 章 动态纳米约束的耦合化学反应：II 蚀刻轨道中 Ag ₂ O 膜的制备条件	423
24.1 引言	423
24.2 实验：嵌入 Ag ₂ O 膜蚀刻轨道的形成	424
24.2.1 预蚀刻步骤	424
24.2.2 膜形成步骤	424
24.2.3 电子表征	424
24.2.4 膜形成的细节	425
24.3 结果与讨论	426
24.3.1 预蚀刻时间对蚀刻轨道内 Ag ₂ O 膜形成的影响	426
24.3.2 PET 箔蚀刻轨道中 Ag ₂ O 膜的去除	430
24.4 总结	430
参考文献	431