



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

The
INTE
of TH



敏感材料

Sensitive Materials
and Sensors

与

传感器

蒋亚东 太惠玲 谢光忠 杜晓松 编著



科学出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

敏感材料与传感器

蒋亚东 太惠玲 谢光忠 杜晓松 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分为上、下两篇，共 19 章。上篇共分为 7 章，以功能型的敏感材料为主线，分别论述金属、半导体、无机陶瓷、有机高分子、复合材料和新型敏感材料的定义、结构和性能；下篇共分为 12 章，主要介绍敏感元件与传感器，在传感器概述基础上，分为物理量传感器、化学量传感器和生物量传感器三个部分，分章节介绍不同传感器的基本原理、制备方法、基本特性及其应用。

本书可作为高等院校电子科学与技术、测控技术与仪器、自动化、电气工程及其自动化、材料科学与工程等专业的本科生或研究生教材，也可作为从事功能材料、敏感材料、传感与信息检测相关领域应用和设计开发的研究人员及工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

敏感材料与传感器 / 蒋亚东等编著. —北京：科学出版社，2016.1
ISBN 978-7-03-046918-2

I. ①敏… II. ①蒋… III. ①传感器-教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 319233 号

责任编辑：杨 岭 黄 嘉 / 责任校对：杨悦蕾

责任印制：余少力 / 封面设计：墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张：27

字数：640 千字

定价：69.00 元

序

在敏感信息材料基础上发展起来的传感器技术，是当今世界令人瞩目、迅猛发展的新技术，正成为当代科学技术发展的重要标志之一。它与通信技术、计算机技术构成信息产业的三大支柱。随着微电子技术、计算机技术和信息处理技术的高速发展，传感器作为信息采集的前端和关键元器件，其重要性已变得越来越明显。

各种传感器的研究与开发，充分利用了导体、半导体、电介质、磁介质及金属、陶瓷、有机高分子等材料的功能特性；而各种功能材料的开发与进步，又反过来极大地推动了新型传感器的发展，成为传感器的重要基础。本书将直接应用于传感器中具有敏感功能作用的材料统称为敏感材料。可以看出，敏感材料与各种传感器之间有着十分密切的关系，二者互相促进、共同发展。

当前，无论是敏感材料与传感器的研究与发展，还是传感器技术的科学进步与工程应用，以及敏感材料与传感器研发人才的培养，都迫切需要敏感材料与传感器相结合的教材或专著。因此，该书的出版将满足广大读者的需要。

在编著本书时，作者结合了多少年的科研与教学经验，并总结了近年来在敏感材料与传感器方面的最新研究成果，同时参考了大量国内外相关专著和文献。该书分为敏感材料和敏感元件与传感器上、下两篇，全面系统地介绍了各类敏感材料的结构、性质和各类传感器的基本理论、器件特性、检测技术及其应用范例；同时为适应新时代信息技术发展的需要，该书还特别介绍了敏感材料和相关传感器的最新研究进展。该书侧重于讲解基本概念和基本理论，注重知识的系统性，循序渐进，由浅入深，便于初学者理解和掌握；同时便于读者举一反三，触类旁通。全书框架完整、语言流畅、图文清晰。

该书既可作为高等学校相关学科与专业的本科生或研究生教材，又可供从事敏感材料与传感器技术等相关领域的工程技术人员学习和参考。

中国工程院院士

涂铭旌

2015年12月1日于成都

前 言

自 20 世纪末人类进入信息社会以来,人们的一切活动都是以信息获取与信息交换为中心,作为信息技术的基础与三大支柱之一的传感器技术也进入高速发展的新时期。在各个学科领域,特别是现代高新工程技术中,需要获取的信息量越来越大,对信息检测的精度和准确度要求越来越高,检测的难度也越来越大,因此对传感器提出了更高更新的要求,传统的传感器已经不能满足新形势的需求。

现在,“没有传感器技术就没有现代信息科学技术”的观点已为全世界所公认。因此,敏感材料与传感器技术倍受各国特别是发达国家的重视。我国也将敏感材料与传感器技术列为重点发展的技术领域。目前,在世界范围内,利用现代科学技术,研究开发了一批又一批新型的敏感材料和传感器;同时,由于在制造中引进了微细加工技术与微电子集成技术等先进工艺,使得传感器技术得到飞速发展,并取得了可喜的成就。

但是,目前系统、全面、深入地介绍敏感材料与传感器的书籍较少,远不能满足教学与科研发展的需要。为此,作者对多年来从事敏感材料与传感器的科研成果与教学成果进行整理,并参考了大量十多年来国内外传感器技术的新成果与新技术,撰写了“十一五”国家级规划教材《敏感材料与传感器》,奉献给广大读者。本书自 2008 年 4 月出版第 1 版以来,承蒙相关领域教师、学生及科研与工程技术人员的厚爱,被多家兄弟单位选为传感器相关课程的教材,取得了良好的教学效果。近年来,随着国内外敏感材料与传感器的迅速发展,《敏感材料与传感器》的适时更新与不断完善势在必行。本次编著在保持第 1 版教材内容体系与结构特色不变的前提下,扩充了敏感材料与传感器的种类与范围,并在内容的时效性方面进行了更新与充实,以满足人们学习敏感材料与传感器技术的需要。

全书分为敏感材料(上篇)和敏感元件与传感器(下篇)两篇,以不同类别的敏感材料和不同类别的传感器分章编写,共 19 章。由于敏感材料与传感器的门类过于繁多,而本书所定篇幅有限,在内容的选定上,主要针对理论相对成熟、当前应用最广的材料与传感器类型进行编写;同时在新型敏感材料方面进行了扩充。由于传感器特性在本质上取决于敏感材料,而传感器自身较少有重大或特殊的结构设计,因此,本书的特色在于,以不同功能类型和新型的敏感材料为主线,重点介绍应用广泛和发展较快的传感器的基本原理、基本特性和应用实例。

全书共 19 章,分别论述了金属敏感材料、半导体敏感材料、无机陶瓷敏感材料、有机高分子敏感材料、复合敏感材料、新型敏感材料及力学量传感器、光电式传感器、红外传感器、光纤传感器、温度传感器、声学量传感器、磁学量传感器、气体传感器、湿度传感器、离子敏传感器、生物传感器等。内容新颖、先进、丰富,具有一定的深度与

广度。本书可作为电子科学与技术、测试计量与仪器仪表、自动控制、电子应用技术、电子元件与材料、自动化仪表专业及相关专业的本科教材，可供有关专业的研究生选用，也可供相关专业工程技术人员参考。

本书第1章、第2章、第4章、第5章、第8章、第10章由蒋亚东教授编写，第6章、第7章、第15章至第19章由太惠玲副教授编写，第3章、第11章、第12章、第13章由谢光忠教授编写，第9章、第14章由杜晓松教授编写。同时，本书的出版也得到国家自然科学基金委项目、教育部“新世纪优秀人才支持计划”等项目的支持，在此一并表示感谢。

本书在编写过程中，参考了兄弟院校、院所的教材及文献资料，参阅了大量有关敏感材料与传感器方面的专著，在此对这些文献及专著的作者表示衷心的感谢。在本书编辑与出版过程中，得到电子科技大学和科学出版社的支持与帮助，在此谨深表感谢。同时感谢苏元捷博士和龙吟、叶宗标、刘春华、袁震、袁欢、谢涛等同学为本书的文字和图表处理所做的有益工作。

由于编写本书引用的参考文献较多，难以一一列出，在此向原作者致敬。鉴于作者学识水平及掌握的资料有限，编辑出版时间仓促，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正，作者将不胜感激。

作 者

2015年12月1日

目 录

上篇 敏感材料

第1章 绪论	(3)
1.1 敏感材料的定义	(3)
1.2 敏感材料的类别	(3)
1.3 敏感材料的基本特性	(3)
思考题	(4)
第2章 金属敏感材料	(5)
2.1 金属材料概述	(5)
2.2 磁敏金属材料	(5)
2.2.1 各向异性磁阻效应型元件的基本结构	(6)
2.2.2 各向异性磁阻效应材料	(8)
2.3 温敏金属材料	(9)
2.3.1 物理量变换方式	(9)
2.3.2 双金属	(9)
2.3.3 金属薄膜温敏元件	(10)
2.4 形变金属材料	(11)
2.4.1 形变规	(11)
2.4.2 磁形变敏感元件	(12)
2.4.3 形状记忆材料	(12)
2.5 超导敏感材料	(15)
2.5.1 超导敏感材料	(15)
2.5.2 敏感元件用超导材料	(17)
思考题	(18)
第3章 半导体材料	(19)
3.1 半导体材料分类	(19)
3.1.1 元素半导体	(20)
3.1.2 化合物半导体	(20)
3.2 半导体基础物性	(21)
3.2.1 半导体内的电子特性	(21)

3.2.2	半导体的电导、载流子密度、迁移率机制	(22)
3.2.3	电学性质的温度依赖关系	(24)
3.2.4	影响半导体物性的外场效应	(26)
3.3	半导体压阻效应	(27)
3.4	半导体光电效应	(27)
3.5	半导体磁阻效应	(27)
	思考题	(28)
第4章	无机陶瓷敏感材料	(29)
4.1	无机陶瓷材料概述	(29)
4.2	无机陶瓷材料的物理、化学性质	(30)
4.2.1	陶瓷材料的离子导电性	(36)
4.2.2	金属氧化物材料的半导体性质	(38)
4.3	化学敏感元件用陶瓷材料	(40)
4.3.1	多孔陶瓷与物理吸附、毛细管凝结	(41)
4.3.2	氧化物表面物性与化学吸附、化学反应	(44)
4.4	物理敏感元件用陶瓷材料	(46)
4.4.1	陶瓷材料的温度特性及温敏元件材料	(47)
4.4.2	压电材料	(50)
4.4.3	压电材料参数	(51)
4.4.4	热释电材料	(56)
	思考题	(59)
第5章	有机高分子敏感材料	(60)
5.1	有机高分子材料基础	(60)
5.1.1	高分子材料的特点与分类	(61)
5.1.2	高分子材料的结构及理化性能	(62)
5.2	有机高分子材料的种类与特性	(68)
5.2.1	有机高分子材料的种类	(68)
5.2.2	有机高分子材料的信息转换功能	(69)
5.2.3	导电性高分子材料	(70)
5.2.4	光电导性高分子材料	(72)
5.2.5	压电性、热释电性高分子材料	(73)
5.2.6	感光性高分子材料	(75)
5.3	有机高分子材料薄膜技术	(77)
5.3.1	LB膜技术	(77)
5.3.2	自组装膜技术	(83)
	思考题	(85)
第6章	复合敏感材料	(86)
6.1	复合敏感材料定义	(86)

6.2 无机-无机复合敏感材料	(86)
6.2.1 制备方法	(86)
6.2.2 金属-金属氧化物复合材料	(89)
6.2.3 金属氧化物-金属氧化物复合材料	(92)
6.3 有机-无机复合敏感材料	(94)
6.3.1 概述	(95)
6.3.2 复合工艺	(95)
6.3.3 聚合物-金属复合纳米材料	(97)
6.3.4 聚合物-非金属复合纳米材料	(99)
6.4 有机-有机复合敏感材料	(101)
6.4.1 PPy 复合敏感材料	(101)
6.4.2 PANI 复合敏感材料	(102)
参考文献	(104)
第7章 新型敏感材料	(106)
7.1 碳系敏感材料	(106)
7.1.1 碳纳米管	(106)
7.1.2 石墨烯	(110)
7.2 纳米敏感材料	(116)
7.2.1 纳米敏感材料概述	(116)
7.2.2 无机纳米敏感材料	(117)
7.2.3 有机纳米敏感材料	(118)
7.3 超材料	(121)
7.3.1 超材料概述	(121)
7.3.2 超材料在传感领域的应用	(122)
7.4 智能材料	(124)
7.4.1 智能材料定义	(124)
7.4.2 智能材料特征	(125)
7.4.3 智能材料系统构成与基础材料	(125)
思考题	(126)
参考文献	(126)

下篇 敏感元件与传感器

第8章 传感器概述	(131)
8.1 传感器基本概念	(131)
8.1.1 传感器的地位和作用	(131)
8.1.2 基本概念	(131)
8.1.3 传感器的构成	(134)

8.1.4 传感器的分类	(135)
8.2 传感器基本特性	(136)
8.2.1 传感器静态特性	(136)
8.2.2 传感器动态特性	(141)
8.2.3 传感器的可靠性	(150)
8.3 传感器技术发展动向	(154)
8.4 传感器研究方法	(156)
思考题	(156)
第9章 力学量传感器	(157)
9.1 概述	(157)
9.1.1 定义	(157)
9.1.2 力学量传感器分类	(157)
9.2 压电式力传感器	(158)
9.2.1 工作原理	(158)
9.2.2 压电式压力传感器	(159)
9.2.3 压电式加速度传感器	(162)
9.3 压阻式力传感器	(165)
9.3.1 基本工作原理	(166)
9.3.2 压阻式压力传感器	(167)
9.3.3 压阻式加速度传感器	(173)
9.4 其他力学量传感器	(174)
9.4.1 谐振式压力传感器	(174)
9.4.2 电感式压力传感器	(175)
9.4.3 光纤力学量传感器	(176)
9.5 力学量传感器应用	(178)
9.5.1 力学量传感器在消费电子中的应用	(178)
9.5.2 力学量传感器在汽车上的应用	(178)
9.5.3 力学量传感器在医疗领域的应用	(180)
思考题	(181)
第10章 光电式传感器	(182)
10.1 光电管	(182)
10.2 光电倍增管	(183)
10.3 光敏电阻	(184)
10.3.1 光敏电阻的工作原理	(184)
10.3.2 光敏电阻的结构	(184)
10.3.3 光敏电阻的主要参数	(185)
10.3.4 光敏电阻的基本特性	(185)
10.4 光敏二极管和光敏晶体管	(187)

10.4.1	工作原理	(187)
10.4.2	基本特性	(188)
10.5	光电池	(190)
10.5.1	工作原理	(190)
10.5.2	基本特性	(191)
10.6	新型光电式传感器	(192)
10.6.1	太赫兹微测辐射热计	(192)
10.6.2	黑硅近红外光电传感器	(196)
10.7	光电式传感器的应用	(199)
10.7.1	模拟式光电传感器的应用	(199)
10.7.2	脉冲式光电传感器的应用	(201)
	思考题	(201)
第 11 章	红外传感器	(202)
11.1	红外辐射基本知识	(202)
11.1.1	红外辐射	(202)
11.1.2	红外辐射源	(204)
11.2	红外探测器	(205)
11.2.1	热探测器	(205)
11.2.2	光子探测器	(208)
11.2.3	红外探测器的性能参数	(209)
11.2.4	红外探测器使用中应注意的问题	(211)
11.3	非制冷红外焦平面探测器	(212)
11.3.1	微测辐射热计模型与机理	(212)
11.3.2	微测辐射热计热学参数	(214)
11.3.3	非制冷红外焦平面探测器读出电路	(217)
11.3.4	非制冷红外焦平面探测器封装	(219)
11.3.5	非制冷红外热成像仪	(222)
11.4	红外技术应用	(222)
11.4.1	红外测温	(222)
11.4.2	红外成像	(224)
11.4.3	红外分析仪	(226)
11.4.4	红外无损检测	(227)
11.4.5	红外传感器在军事上的应用	(228)
	思考题	(229)
第 12 章	光纤传感器	(230)
12.1	引言	(230)
12.1.1	光纤传感器技术的特点	(230)
12.1.2	光纤传感器的组成与分类	(230)

12.2 光纤及光的传输	(231)
12.2.1 光纤的传光原理	(231)
12.2.2 光在光纤内的传输	(232)
12.2.3 光在特殊光纤内的传输	(233)
12.3 光纤传感器的光源	(234)
12.4 光纤传感器中的光探测器	(237)
12.5 光调制技术	(237)
12.5.1 相位调制	(238)
12.5.2 频率调制	(239)
12.6 光纤位移传感器	(240)
12.6.1 光纤开关与定位装置	(240)
12.6.2 传光型光纤位移传感器	(242)
12.7 光纤速度、加速度传感器	(243)
12.7.1 光纤激光渡越速度计	(243)
12.7.2 利用马赫-泽德干涉仪的光纤加速度计	(244)
12.8 其他光纤传感器	(245)
12.8.1 光纤振动传感器	(245)
12.8.2 光纤温度传感器	(246)
12.8.3 光纤应变传感器	(247)
思考题	(249)
第13章 温度传感器	(250)
13.1 温度传感器概述	(250)
13.2 热电偶	(250)
13.2.1 热电偶的基本原理	(250)
13.2.2 热电偶的类型及结构	(253)
13.2.3 热电偶的传热误差和动态误差	(257)
13.3 热敏电阻	(260)
13.3.1 金属热敏电阻	(260)
13.3.2 半导体热敏电阻	(263)
13.4 集成温度传感器及应用	(266)
13.4.1 概述	(266)
13.4.2 工作原理	(266)
思考题	(268)
第14章 声学量传感器	(269)
14.1 声学基本概念	(269)
14.1.1 声波与声音	(269)
14.1.2 声速、波型、波长和频率	(269)
14.1.3 声压、声强、声功率及相应的“级”	(270)

14.1.4	反射、折射、衍射、干涉	(273)
14.1.5	声波的衰减	(276)
14.2	声学量传感器特性参数	(276)
14.2.1	灵敏度	(276)
14.2.2	频率响应	(277)
14.2.3	指向性	(277)
14.2.4	输出阻抗、最大声压级	(278)
14.2.5	等效噪声级、失真度和动态范围	(278)
14.3	超声传感器	(278)
14.3.1	超声波及其基本特性	(279)
14.3.2	超声波传感器分类与基本结构	(280)
14.3.3	超声波传感器工作原理	(281)
14.3.4	超声波传感器的应用	(282)
14.4	声表面波传感器	(288)
14.4.1	SAW 波型种类	(288)
14.4.2	SAW 传感器基本器件结构	(290)
14.4.3	典型 SAW 传感器	(292)
14.4.4	SAW 传感器的特点	(297)
14.4.5	SAW 传感器的发展趋势	(298)
14.5	声压传感器	(298)
14.5.1	电阻变换式声压传感器	(298)
14.5.2	压电式声压传感器	(299)
14.5.3	电容式声压传感器	(299)
	思考题	(300)
第 15 章	磁敏传感器	(301)
15.1	霍尔式磁传感器	(301)
15.1.1	霍尔元件的原理	(301)
15.1.2	霍尔元件的特性	(302)
15.1.3	霍尔开关集成传感器	(303)
15.1.4	霍尔线性集成传感器	(304)
15.2	结型磁敏器件	(304)
15.2.1	磁敏二极管	(304)
15.2.2	磁敏三极管	(307)
15.2.3	CMOS 磁敏器件	(308)
15.3	磁阻式磁传感器	(309)
15.3.1	半导体磁阻传感器	(310)
15.3.2	韦根德器件	(312)
15.3.3	铁磁性金属薄膜磁敏电阻	(314)

15.4	SQUID 磁传感器	(316)
15.4.1	SQUID 磁传感器的基本原理	(317)
15.4.2	SQUID 磁传感器的构成类型	(320)
15.5	其他磁传感器	(323)
15.5.1	光纤磁传感器	(323)
15.5.2	机械式磁传感器	(325)
15.5.3	感应式磁传感器	(326)
	思考题	(328)
第 16 章	气体传感器	(329)
16.1	气体传感器概述	(329)
16.1.1	气体传感器定义与分类	(329)
16.1.2	气体传感器特性参数	(331)
16.2	无机半导体气体传感器	(331)
16.2.1	无机半导体气体传感器及其分类	(331)
16.2.2	气敏机理	(332)
16.2.3	半导体气体传感器的主要特性	(334)
16.2.4	表面控制型电阻式传感器	(336)
16.2.5	体控制型电阻式传感器	(339)
16.2.6	非电阻式半导体气体传感器	(340)
16.3	电子聚合物气体传感器	(342)
16.3.1	概述	(342)
16.3.2	电阻型气体传感器	(342)
16.3.3	质量敏感型气体传感器	(347)
16.3.4	场效应管型气体传感器	(351)
16.4	电子鼻	(355)
16.4.1	电子鼻工作原理	(355)
16.4.2	电子鼻系统组成	(356)
16.4.3	电子鼻的研究现状与应用	(358)
	思考题	(360)
	参考文献	(360)
第 17 章	湿度传感器	(361)
17.1	湿度传感器的特性参数与分类	(361)
17.1.1	湿度传感器的定义及湿度检测的重要性	(361)
17.1.2	湿度的定义	(362)
17.1.3	湿度传感器的主要特性参数	(362)
17.1.4	湿度传感器的分类	(364)
17.2	半导体陶瓷湿度传感器	(364)
17.2.1	涂覆膜型	(365)

17.2.2	烧结体型	(365)
17.2.3	薄膜型	(367)
17.2.4	MOSFET 湿度传感器	(368)
17.2.5	二氧化锡湿敏二极管	(368)
17.3	高分子聚合物湿度传感器	(368)
17.3.1	电阻式高分子聚合物湿度传感器	(369)
17.3.2	电容式高分子湿敏元件	(373)
	思考题	(376)
第 18 章	离子敏传感器	(377)
18.1	离子敏传感器概述	(377)
18.2	离子选择电极	(378)
18.2.1	离子选择电极定义与特点	(378)
18.2.2	离子选择电极结构与基本原理	(379)
18.2.3	离子选择电极的分类	(380)
18.3	离子敏场效应管	(383)
18.3.1	离子敏场效应管定义与特点	(383)
18.3.2	离子敏场效应管结构与基本原理	(384)
18.3.3	离子敏场效应管设计原则	(386)
18.3.4	离子敏场效应管的分类	(389)
18.3.5	集成化 ISFET 传感器	(392)
18.4	离子敏传感器的应用	(394)
18.4.1	离子选择电极的应用	(394)
18.4.2	离子敏场效应管的应用	(396)
	思考题	(397)
	参考文献	(397)
第 19 章	生物传感器	(398)
19.1	生物传感器及其基本构成	(398)
19.1.1	生物传感器的发展	(398)
19.1.2	生物传感器的基本构成和工作原理	(399)
19.1.3	生物传感器的分类	(401)
19.1.4	生物传感器的特点	(401)
19.2	场效应晶体管型生物传感器	(402)
19.2.1	酶场效应晶体管	(402)
19.2.2	免疫场效应晶体管	(403)
19.2.3	FET 型生物传感器的新进展	(404)
19.3	光生物传感器	(405)
19.4	热生物传感器	(407)
19.5	生物芯片	(409)

19.5.1	概述	(409)
19.5.2	生物芯片的分类	(410)
19.5.3	基因芯片	(410)
19.5.4	蛋白质芯片	(412)
19.5.5	组织芯片	(414)
19.6	生物传感器的应用及发展动向	(414)
19.6.1	临床诊断用生物传感器和测定仪	(414)
19.6.2	生物传感器在发酵工业中的应用	(415)
19.6.3	生物传感器在环境监测中的应用	(415)
19.6.4	生物传感器在食品领域中的应用	(415)
	思考题	(416)



敏感材料