

无机功能材料

杨华明 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是介绍无机功能材料的一本专著，内容涉及无机功能材料结构、表征方法及应用、无机功能材料的主要制备方法；重点介绍超细功能粉体、催化功能材料、发光功能材料、半导体材料、高性能导电材料及功能矿物材料的制备、表征及性能，包括相关基础理论、制备技术、结构-性能关系等，并结合实例介绍了无机功能材料在现代许多领域的应用。

本书可供从事无机功能材料研究与应用的科技工作者参考，也可作为高等院校相关专业研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

无机功能材料/杨华明著. —北京: 化学工业出版社,
2007. 6
ISBN 978-7-122-00183-2

I. 无… II. 杨… III. 无机材料: 功能材料
IV. TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 041888 号

责任编辑: 窦臻 冯国庆

装帧设计: 张 辉

责任校对: 战河红

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 24 $\frac{1}{4}$ 字数 476 千字 2007 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

前 言

材料领域基础理论和技术的进步极大地促进经济和社会的发展，无机功能材料作为材料的重要组成部分，已日益渗透到各个行业，尤其是其独特的性能和广阔的应用前景成为材料领域的研究热门。

本书是作者结合在无机功能材料领域的研究经历和大量的研究工作，系统总结研究成果编写而成的，是材料领域的一大尝试。全书共分九章，第1章主要介绍无机功能材料的研究现状、结构表征及应用；第2章介绍无机功能材料的多种合成方法；第3章介绍超细功能材料的制备技术，机械法制备的助磨机理及动力学分析；第4章介绍超细粉体用于高性能陶瓷的制备、结构-性能关系等；第5章介绍纳米氧化钛材料的制备与表征，包括氧化钛功能材料用于有机污染物降解的实例以及其他多种纳米催化材料的合成、表征与性能；第6章介绍硫化物和氧化物纳米发光材料的合成、表征与性能；第7章介绍镍、钴氧化物及典型硫化物的制备与性能；第8章介绍高性能导电粉末的基体制备、掺杂复合技术及应用性能；第9章介绍基于资源-材料一体化基础理论的功能矿物材料加工技术与应用。

本书的研究工作得到了教育部新世纪优秀人才支持计划、国家自然科学基金项目、湖南省首批新世纪121人才工程的资助；在撰写过程中得到了很多前辈、单位领导和同事的热情鼓励与帮助；得到了国内许多兄弟单位同仁以及作者历年研究生（张光业、欧阳静、黄承焕、史蓉蓉、张科、周灿伟、张慧慧、苏晓晖、聂沙、肖愉、刘天成）的大力支持和帮助；欧阳静和杜春芳两位博士研究生为本书的出版做了大量整理和编辑工作，在此一并表示衷心感谢！

由于本书所涉及的领域较广，其内容又涉及许多复杂的科学问题，加之作者水平有限，书中不足之处恳请读者批评指正。

杨华明

2007年2月于长沙

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 功能材料	1
1.1.1 功能材料概述	1
1.1.2 光学材料	2
1.1.3 电学材料	6
1.1.4 磁性材料	12
1.1.5 声学材料	14
1.1.6 热性能材料	17
1.2 无机功能材料概述	20
1.2.1 无机功能材料的现状	20
1.2.2 无机功能材料的结构	20
1.2.3 无机功能材料的性能	24
1.3 无机功能材料的表征	25
1.3.1 材料结构表征	25
1.3.2 物理性能表征	35
1.3.3 化学性能表征	40
1.4 无机功能材料的应用	41
1.4.1 航空航天应用	41
1.4.2 光电子信息材料	42
1.4.3 能源材料	42
1.4.4 智能材料	43
1.4.5 交通运输产业	43
1.4.6 生物医用材料工程	43
1.4.7 功能陶瓷材料	44
1.4.8 环境保护材料	44
参考文献	44
第 2 章 无机功能材料合成方法	47
2.1 溶胶-凝胶法	47
2.1.1 基本原理和特点	48
2.1.2 反应过程	48
2.1.3 Sol-Gel 法的应用现状	50

2.2 沉淀法	53
2.2.1 直接沉淀法	54
2.2.2 共沉淀	54
2.2.3 均匀沉淀法	55
2.2.4 水解沉淀法	55
2.3 水热法	57
2.3.1 基本原理	57
2.3.2 反应介质水的性质	58
2.3.3 水热合成设备	60
2.3.4 主要工艺流程	60
2.3.5 水热法制备无机粉体	61
2.4 溶剂热法	63
2.4.1 基本原理	63
2.4.2 有机溶剂的性质	63
2.4.3 溶剂热合成纳米材料	64
2.4.4 水热合成的特点	66
2.4.5 水热反应的基本类型	66
2.5 电化学法	68
2.5.1 模板电化学法	68
2.5.2 超声电化学法	70
2.5.3 稳定剂保护下的电化学法	70
2.5.4 电化学法的应用	71
2.6 微波法	73
2.6.1 微波及其特性	74
2.6.2 微波加热机理	75
2.6.3 微波促进反应的机理	77
2.6.4 微波在材料合成中的应用	77
2.7 浸渍法	83
2.7.1 基本原理及特点	83
2.7.2 浸渍法在材料制备中的应用	83
2.8 冷冻干燥法	86
2.8.1 冷冻干燥法的原理	86
2.8.2 冷冻干燥法在材料合成中的应用	87
参考文献	92

第3章 超细功能粉体材料的制备	95
3.1 超细功能粉体的特性	95

3.1.1	引言	95
3.1.2	超细粉体的特性	95
3.1.3	超细粉体的应用	97
3.2	超细功能粉体的制备技术	99
3.2.1	超细粉碎技术进展	99
3.2.2	搅拌磨超细粉碎技术	101
3.2.3	搅拌磨的新进展	107
3.3	超细粉体的制备工艺	108
3.3.1	引言	108
3.3.2	实验过程	109
3.3.3	实验结果与分析	110
3.4	搅拌磨超细粉碎的产品特性	112
3.4.1	产品的平均粒径	112
3.4.2	产品的 TEM 形貌	113
3.4.3	产品的白度	113
3.5	助磨剂作用机理的讨论	114
3.5.1	助磨剂对超细粉碎行为的影响	114
3.5.2	助磨剂对粉体表面的作用	114
3.5.3	助磨剂的吸附特性	116
3.5.4	助磨剂的吸附模型	116
3.6	搅拌磨超细粉碎行为的研究	117
3.6.1	基础方程	117
3.6.2	搅拌磨超细粉碎方程的建立	118
3.7	小结	119
	参考文献	119

第 4 章	超细功能粉体用于高性能陶瓷	123
4.1	概述	123
4.1.1	陶瓷材料的发展要求	123
4.1.2	超细粉体与新型陶瓷材料	123
4.2	实验方法	125
4.3	陶瓷粉末原料的制备	125
4.4	高强滑石瓷的制备	127
4.5	Al_2O_3 -SiC 陶瓷材料的制备	127
4.5.1	Al_2O_3 -SiC 陶瓷材料的性能	128
4.5.2	Al_2O_3 -SiC 陶瓷材料的显微结构	129
4.6	Talc-SiC 陶瓷材料的制备	130

4.6.1	Talc-SiC 陶瓷材料的性能	130
4.6.2	Talc-SiC 陶瓷材料的显微结构	130
4.7	Mullite-SiC 陶瓷材料的制备	131
4.7.1	Mullite-SiC 陶瓷材料的性能	132
4.7.2	Mullite-SiC 陶瓷材料的显微结构	132
4.8	超细粉体与陶瓷材料性能关系的讨论	133
4.8.1	粉末原料与陶瓷性能	133
4.8.2	有关陶瓷增韧的讨论	134
4.9	小结	135
	参考文献	136

第5章 催化功能材料的合成与性能

5.1	催化功能材料简介	137
5.1.1	催化材料的发展	137
5.1.2	催化材料的分类	137
5.1.3	催化材料的特性	141
5.2	纳米氧化钛结构与制备	142
5.2.1	TiO ₂ 的结构与性质	142
5.2.2	TiO ₂ 的光催化原理	144
5.2.3	TiO ₂ 的溶胶-凝胶法制备及表征	145
5.2.4	TiO ₂ 的冷冻法制备及表征	150
5.3	纳米氧化钛复合材料的制备及表征	154
5.3.1	CeO ₂ /TiO ₂ 的制备与表征	154
5.3.2	WO ₃ -V ₂ O ₅ /TiO ₂ 的制备与表征	157
5.3.3	SnO ₂ /TiO ₂ 的制备与表征	159
5.4	TiO ₂ 基功能材料用于污染治理	162
5.4.1	工业有机污染物	162
5.4.2	工业污染物的治理	163
5.4.3	掺杂纳米 TiO ₂ 用于催化降解有机污染物	166
5.5	纳米 CdS 的合成与性能	175
5.5.1	CdS 的合成	175
5.5.2	纳米 CdS 的光催化性能	176
5.6	纳米 Cu ₂ O 的合成与性能	179
5.6.1	Cu ₂ O 简介	179
5.6.2	纳米 Cu ₂ O 的电化学法合成及其光催化性能研究	181
5.6.3	纳米 Cu ₂ O 的化学还原法制备及其光催化性能研究	187
5.7	纳米 Bi ₂ O ₃ 的合成	192

5.7.1 纳米 Bi_2O_3 的合成	192
5.7.2 纳米 Bi_2O_3 的表征	192
参考文献	194

第 6 章 发光功能材料的合成与性能 198

6.1 发光材料概述	198
6.1.1 发光材料定义	198
6.1.2 基本概念	199
6.1.3 发光材料的分类	202
6.1.4 光致发光材料	204
6.2 纳米 CdS 的发光性能	205
6.3 纳米 ZnS 的合成与性能	206
6.3.1 纳米 ZnS 的合成与表征	206
6.3.2 纳米 ZnS 的发光性能	208
6.3.3 纳米 ZnS 的发光机理探讨	208
6.3.4 掺杂纳米 ZnS 的合成与性能	209
6.4 掺杂 ZrO_2 纳米材料的制备与性能	211
6.4.1 氧化锆的性质	211
6.4.2 Sm^{3+} 掺杂纳米 ZrO_2 的合成与表征	214
6.4.3 Y^{3+} 掺杂纳米 ZrO_2 的合成与表征	220
6.4.4 掺杂纳米 ZrO_2 的发光性能及其机理	225
参考文献	229

第 7 章 半导体材料的合成与性能 232

7.1 半导体材料简介	232
7.1.1 半导体材料简史	232
7.1.2 半导体导电的基本原理	233
7.1.3 半导体的主要性质	235
7.1.4 半导体材料的分类	236
7.1.5 半导体材料应用及其发展趋势	237
7.2 纳米 CoO 的合成	239
7.2.1 CoO 的性质	239
7.2.2 实验部分	240
7.2.3 结果与讨论	241
7.3 纳米 NiO 的合成与结构分析	251
7.3.1 NiO 的性质	251
7.3.2 纳米 NiO 的合成与结构分析	252

7.4 纳米 Co_3S_4 的合成与性能	257
7.4.1 Co_3S_4 的性质	257
7.4.2 纳米 Co_3S_4 的合成与表征	257
7.4.3 纳米 Co_3S_4 的性能	259
7.5 纳米 SnS_2 的合成与表征	260
7.5.1 简介	260
7.5.2 纳米 SnS_2 的合成	260
7.5.3 纳米 SnS_2 的表征	261
7.6 纳米 Sb_2S_3 的合成与性能	263
7.6.1 Sb_2S_3 的性质	263
7.6.2 纳米 Sb_2S_3 的合成与表征	263
7.6.3 纳米 Sb_2S_3 的电化学性能	266
参考文献	267

第8章 导电粉末的制备与性能	271
8.1 导电粉末简介	271
8.1.1 导电粉末现状与发展	271
8.1.2 导电粉末的分类	274
8.1.3 导电粉末的应用	278
8.2 超细基体材料的制备	279
8.2.1 基体材料的性能和要求	279
8.2.2 原料及实验过程	280
8.2.3 结果及分析	280
8.2.4 结论	282
8.3 锑锡复合导电氧化物	282
8.3.1 锑锡氧化物概述	282
8.3.2 SnO_2 纳米晶的合成	285
8.3.3 Sb 掺杂 SnO_2 的合成	286
8.3.4 纳米 Sb_2O_3 的合成与性能	288
8.4 复合导电粉末的制备	296
8.4.1 复合导电粉末的制备原理	296
8.4.2 Sb 掺杂 $\text{SnO}_2/\text{BaSO}_4$ 导电粉末的制备	297
8.4.3 锑掺杂氧化锡的缺陷与能级效应	302
8.5 导电粉末用于高性能材料	303
8.5.1 SSB 粉末在涂层中的导电机理	303
8.5.2 导电粉末的应用特性	304
8.5.3 导电涂层的制备	307

参考文献 314

第 9 章 功能矿物材料的制备与应用 318

9.1 功能矿物材料简介 318

9.1.1 矿物资源制备功能材料 318

9.1.2 功能矿物材料结构与性能的关系 319

9.1.3 功能矿物材料的加工技术 321

9.2 超微细 SiO₂ 的制备与应用 323

9.2.1 SiO₂ 概述 323

9.2.2 超微细 SiO₂ 的制备 332

9.2.3 高纯 SiO₂ 的制备 339

9.2.4 超微细 SiO₂ 的表面改性 342

9.2.5 高纯超微细 SiO₂ 的应用 347

9.3 高纯 FeS₂ 粉体制备与应用 351

9.3.1 FeS₂ 的发展现状 351

9.3.2 高纯 FeS₂ 的制备与结构表征 351

9.3.3 高纯 FeS₂ 在热电池中的应用 357

9.4 矿物粉体的提纯与应用 359

9.4.1 矿物粉体提纯的物理化学基础 359

9.4.2 萤石的提纯与应用 370

9.4.3 锆英砂的提纯与应用 373

参考文献 376

材料是人类发展的基石，人类的发展根据使用工具的不同而被划分成“石器时代”、“青铜时代”、“铁器时代”和“信息时代”。可见，材料的不同决定了人类文明的发展水平，对不同材料的使用是标志人类进步的里程碑。今天，材料、能源与信息被并称为现代文明的三大支柱，其作用与意义是不言而喻的。

1.1 功能材料

1.1.1 功能材料概述

随着人类的进步和技术的发展，人们逐渐发展和利用某些具有抵抗外力作用而保持自己的形状、结构不变的优良力学性能（如强度和韧性）的材料，首先制造出了各种用具（如耕具、刀、剑等武器），由于工业文明的来临，这些材料被用于制造各种机器、车辆，修建房室和建造桥梁、铁路，这些材料统称为结构材料；另一方面，人们又利用某些材料优良的物理、化学、生物学性能来制造传导信息、储存或记录、转化或变换能量的功能元器件，这些材料统称为功能材料。

1.1.1.1 功能材料的概念

对功能材料的定义没有一个确切的提法。一般来说，功能材料是指在某一具体条件下表现出具有光、电、磁、声、热、化学、生化等特定功能的材料^[1]。在国外，常将这类材料称为功能材料（functional materials）、特种材料（special materials）或精细材料（fine materials）。功能材料涉及面较广，具体包括光功能、电功能、磁功能、声功能、热功能、分离功能、形状记忆功能等。这类材料相对于通常的结构材料而言，一般除了具有机械特性外，还具有其他的功能特性。

1.1.1.2 功能材料的特点

功能材料是目前材料领域发展最快的新领域。功能材料产品产量小，利润高，制备过程复杂，其主要原因是基于其特有的“功能性”。功能材料的结构与性能之间存在着密切的联系，材料的骨架、功能基团以及分子组成直接影响着材料的宏观结构与性能。研究功能材料的结构与性能之间的联系，可以指导开发更为先进、新颖的功能材料。

功能材料与结构材料相比，其最大的特点是两者性能上的差异和用途上的不同。另外，结构材料常以材料形式为最终产品，并对材料本身进行性能评价。与之相反，功能材料通常以元件形式对其物理性能进行评价，或者说材料元件“一体化”。功能材料的性能对最终产品、系统的功能特性起举足轻重的作用。正因为如此，功能材料的存在对国民经济的影响和贡献是非常大的。用功能材料制成的元器件对于保证像飞机、航天器、电子设备、汽车、武器等关乎国家切身利益的各级组织的正常运转至关重要。在如半导体材料、光电子材料、仪器仪表材料中的功能材料，还具有高功能、多功能、品种多、产量少、附加价值高、市场规模小、产品更新快等特点。

1.1.1.3 功能材料的分类

目前对功能材料还没有一个公认的分类方法，这其中的原因当然是由于材料的多样性和应用领域的广泛性引起。

功能材料的分类方法可依据材料实质上的差异、材料形式上的不同和材料的服务技术领域来分类。如基于材料的功能性进行分类，即按材料的物理性质和功能来分类时，可将功能材料分为九大类：力学材料、光学材料、电学材料、磁学材料、声学材料、热学材料、化学材料、生物医学材料、核功能材料。这些功能材料还可以按其具体应用范围而再细分成很多小类。

本书从传统的功能材料的分类出发，并结合与本书相关的研究内容，对五类主要功能材料的基本特点和类型作简要介绍，涉及的具体细节读者可参考相关的文献。

1.1.2 光学材料

光学材料包括光学玻璃、光学晶体、光学薄膜和光学塑料^[2]，是功能材料中一个重要的组成部分。

1.1.2.1 光学玻璃

人类发现、使用和制作玻璃的历史悠久。20 世纪初，玻璃工业化生产工艺的成熟，使光学玻璃（optical glass）和光学仪器得到迅速发展。随着激光的出现和光通讯技术的发展，各种特殊的功能玻璃，如激光玻璃、声光玻璃、磁光玻璃及玻璃光纤被发现和应用，玻璃已成为重要的光电子功能材料。均匀而透明的玻璃被人们用于光学领域而被称为光学玻璃。光学玻璃可用于制作各种光学元件，如各类透镜及透镜组、各种形状的棱镜等，这些光学元件是现代各种光学仪器的核心。光学玻璃品种很多，性能应用各不相同，有无色光学玻璃、滤色玻璃、耐辐照玻璃和变色玻璃等，其中最常用的还是无色光学玻璃。

含有铅的玻璃对 X 射线及 γ 射线具有大的阻挡能力，长期照射后变色少，保存也容易，并具有优越的透明性，可用于 γ 射线照射室、强放射性的实验箱、加速器的窥视窗、X 射线的阻挡屏等。还有一些新品种的光学玻璃，如特高折射

率玻璃 ($n_D > 2$)、特高折射率和低色散玻璃 ($n_D > 1.8$)、特低折射率玻璃 ($n_D < 1.45$)、特殊色散玻璃等。还有近红外光学玻璃 (能透过 $5\mu\text{m}$ 以内的红外光), 如 BaO-PbO-GeO_2 和 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 系统; 中红外光学玻璃 (可透过 $1\sim 15\mu\text{m}$ 红外光), 如 As-Ge-Si-S(Se,Te) 系统等。

近年来, 光学玻璃的新品种及用途发展较快。如高纯、高透明的光通信纤维玻璃, 用这种玻璃制成的纤维对工作频率的吸收低达光学玻璃的万分之几, 使远距离光通信成为可能。光学纤维也可用于传像、传光和制造胃镜、膀胱镜、工业内窥镜等。采用离子交换法也能制成自聚焦纤维或自聚焦透镜, 这种渐变折射率透镜的像质量远远超过了同类最好的、均匀介质的单透镜。而采用特殊氧化物如氧化钼制成的激光玻璃, 是最有希望的、固体受激发射的工作物质。光学玻璃的品种、性能、质量以及工艺方法均在迅速地增多和提高, 所用原料的范围也在不断扩大。

1.1.2.2 光学晶体

光学晶体 (optical crystal) 是指作为传统光学介质用的晶体或多晶材料, 如用于制作棱镜、透镜、偏光元件、相位补偿器件或作为窗口材料。单晶可由不同元素与不同化合物组成并具有不同的结晶对称性, 因而具有各种各样的光学特性、物化特性和使用特性。方解石 (CaCO_3) 是用作偏振光学器件最多的天然晶体材料。除此之外, 目前绝大多数光学晶体是人工晶体。按应用光谱波段区分, 有紫外光学晶体、红外光学晶体; 按化学组分区分, 光学晶体可分为金属卤化物单晶、氧化物单晶、含氧盐单晶、半导体单晶和多晶等若干种类。光学晶体有各种各样的光学特性, 如对紫外线和红外线有极好的透过特性, 要比光学玻璃 (紫外和红外透过均有一定限度) 优越得多; 而且透过的范围大、透过率高, 因此有特殊的用途, 尤其是利用晶体折射率和色散的特性可以消除像差和色差。光学介质材料主要用作光学仪器的透镜、棱镜和窗口材料。非线性光学材料用作光学倍频、声光、电光及磁光材料。但是, 光学晶体有易划伤、潮解、热稳定性差等缺点。目前虽有很多方法生长晶体, 如梯温法、热交换法、气相沉积法或化学气氛反应法等, 但要生长出满足要求的大尺寸、光学均匀性好、光吸收损耗极小的晶体还有一定的困难。因此, 改进晶体生长工艺、减小散射颗粒及晶界损耗、探索新的光功能晶体、开拓新的中红外非线性晶体等是今后的方向和任务。

1.1.2.3 光学塑料

在加热加压条件下, 能产生塑性流动并能成形的透明有机合成材料可以作为光学材料使用, 用作光学介质的塑料称作光学塑料 (optical plastic)。光学塑料已有很多用途, 如日常用的塑料眼镜片和隐形眼镜, 一些照相机镜头中的透镜片、有机光导纤维、照相机镜头等。

光学塑料依其加工性能可以分为热塑性和热固性两种。热塑性光学塑料 (thermal plastical optical plastic) 可以反复加热软化而不发生成分变化, 可重复使用; 热固性光学塑料 (thermal shaped optical plastic) 受热后发生化学变化,

固化后不可反复使用。

光学塑料有许多优点，如可模压成形，无需切割研磨甚至抛光，色散比相同折射率光学玻璃高，紫外、红外透过性能好，密度小，成本低，不易破碎，安全性好。缺点是硬度和强度低，易划伤起毛，使用寿命短，膨胀系数和折射率温度系数大，均匀性和高温性能较差，不宜作高级精密仪器用。塑料光纤柔软，可制作大直径光纤，但光损耗大。

1.1.2.4 激光材料

自 1960 年梅曼 (Mainmam) 采用掺铬红宝石 (Cr^{3+} : Al_2O_3) 第一次成功形成激光以来，经典的光学获得了新的发展机遇和动力。激光材料 (laser material) 是指在光或其他方式激励下可能产生受激放大形成激光的材料。按其类型划分，有固体、液体、气体 (原子、离子、分子、准分子) 和半导体等不同类型的激光工作物质。其中，固体激光材料使用最为广泛和普遍。到目前为止，能够产生激光的固体激光材料已逾百种，几乎全部固体激光材料都是人工制备的材料，这些材料主要包括激光玻璃和激光晶体两大类。

1.1.2.5 非线性光学材料

光在介质中传播时，介质中的价电子在光电场作用下产生相对于原子的电荷转移，引起介质极化，并产生受迫振动，产生光场的二次谐波、三次谐波等。极化强度表达为光电场强度作用各项之和。

$$P = \alpha E + \beta E^2 + \gamma E^3 + \dots \quad (1-1)$$

式中，第一项是线性质，它所决定的光波在透明介质中的行为没有频率的改变和光束间的能量耦合，由此可导出光的独立传播原理和线性叠加原理；第二项或更高次的项，即与光电场强度 E^2 或 E 的高次方有关的效应称为非线性光学效应，具有非线性光学效应的材料称为非线性光学材料 (nonlinear optical material)。

1.1.2.6 电光材料

在电场作用下，光学材料的光学性质可能会发生变化，由外加电场 (直流或射频电场) 所引起光学材料折射率的变化称为电光效应，具有电光效应的材料称作电光材料 (electrooptical material)。尽管在电场作用下，一些材料折射率变化不大，但已足够影响光在材料中的传播特性。因此，光电效应在光电子技术中有着广泛的应用，如制作光调制器、光开关、光显示器、光波导器件及光双稳态器件等。传统的电光材料多为无机电光晶体。近年来，发现一些超晶格结构的半导体以及非线性有机晶体和聚合物也具有电光效应，从而成为可能有重要应用前景的新型光电材料。此外，还发现了一些新的电光效应，如在半导体材料中发现的 Fraz-keldysh 效应和量子限制 Stark 效应 (QCSE)，有可能产生一些新的电光器件。在未来的光电子技术中，电光材料将占有十分重要的地位。

1.1.2.7 光折变材料

光折变效应是光致折射率变化效应的缩称，它并不泛指所有由光感生折射率

变化,而特指材料在光辐射下,由光电导效应形成电荷场,再由光电效应引起折射率随光强空间分布而发生变化的效应。光折变效应自 20 世纪 60 年代中期被发现以来,逐步形成了非线性光学的一个分支——光折变非线性光学。

光折变效应是由三个基本过程形成的:光折变材料 (photorefractive material) 吸收光子而产生自由载流子 (空间电荷),这种电荷由于相干光束干涉,强度的分布是不均匀的;自由载流子在介质中的漂移、扩散和重新俘获形成了空间电荷的重新分布并产生空间电荷场;调制的空间电荷场再通过线性电光效应引起折射率的调制变化,即形成折射率的光栅。光折变材料是具有光折变性能的非线性光学材料,作为一种光折变材料,必须具备的条件是能够吸收入射光子并因此产生可以迁移的光生载流子,即具有光电导性能,材料本身具有非零的电光系数。

在光折变效应研究中,一个很重要的课题是关于光折变机理的描述。最早提出的有电荷转移模型,被人们普遍接受的是带输运模型,这一模型同时考虑了光激发载流子在晶体中扩散、漂移和光生伏特效应等三种可能迁移过程产生的光电流,分析了光折变效应的微观过程,不但对稳态光折变现象做出合理解释,并可描述光折变效应瞬态和随时间演化过程以及非静态记录等各种情况。此外“跳迁模型”机制物理图像清晰直观,也在一定程度上为人们接受。目前,仍有不少新的模型被提出,来探索和描述光折变效应的机理。

1.1.2.8 声光材料

声光效应就是由超声波 (弹性波) 使某些介质的光学性质 (如折射率) 发生周期性变化,形成折射率光栅,并使通过折射率光栅的光发生衍射,从而使光的传播方向、频率和强度发生改变的一种物理效应。声光材料 (sono-optical material) 在超声波场作用下形成光学各向异性,利用声光材料可实现对光波的控制,广泛用作调制器、滤波器、偏转器、移频器等,并在信息技术中有新的发展和应用。

大多数在可见光波段的声光器件所用的声光材料为声光晶体 (sono-optical crystal),多为氧化物晶体,与声光玻璃相比,它的声吸收系数小,适用于高频波段。目前所用的声光晶体为二氧化碲 (TeO_2)、钼酸铅 (PbMoO_4)、硅酸铋 ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, BSO)、锆酸铋 ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, BGO) 等。

1.1.2.9 磁光材料

在外加磁场作用下,材料呈现光学各向异性,使通过这种材料的光波的偏振态发生改变的效应称为磁光效应,具有磁光效应的材料称为磁光材料 (magneto-optical material)。磁光效应的本质是在外加磁场和光波电场共同作用下的非线性极化过程,具有独特光学非互易性,即磁致旋光现象具有不可逆性。这是磁光材料的旋光性和自然旋光现象的根本区别。传统的磁光材料主要是铁磁晶体,近年来,发现其他一些材料,包括半导体多量子阱材料也具有很强的磁光效应。

目前所研究的磁光材料多为各向同性光学材料（如气体、液体、玻璃）和高于正交晶系对称性的晶体，而实用的磁光晶体主要为立方晶体。目前经常遇到的磁光材料有磁光玻璃、磁光晶体和其他磁光材料。

1.1.3 电学材料

1.1.3.1 电介质材料

（1）电介质的极化 两个相距很近（距离 l 很小）、电量分别为 $+q$ 和 $-q$ 的点电荷，称为一个电偶极子（electric dipole）。电偶极子用电偶极矩 p 来表征。

$$p = ql \quad (1-2)$$

l 的方向规定为从负电荷指向正电荷。显然 p 是一个矢量，单位体积内电偶极矩的矢量和定义为极化（或极化强度）。对体积 V 中全部电偶极子进行求和

$$P = \sum_i \frac{p_i}{V} \quad (1-3)$$

在电场作用下，出现极化或极化发生变化的物质称为电介质（dielectrics）。基于电介质性质随外界条件的变化，发展了一系列功能材料，这就是介电功能材料（dielectric functional materials）^[3]。

描写电介质的基本参量是介电常数，它是电位移对电场的变化率。

$$\epsilon = \frac{\partial D}{\partial E} \quad (1-4)$$

式中 D ——电位移；

E ——电场强度。

对于线性电介质， D 与 E 的关系是一条过原点的直线，所以 $\epsilon = D/E$ 。

电介质被极化的难易程度可用极化率来表示，即

$$\chi = \frac{\partial P}{\epsilon_0 \partial E} \quad (1-5)$$

式中 ϵ_0 ——真空介电常数，在 SI 单位制中， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

对于线性电介质

$$\chi = \frac{P}{\epsilon_0 E}$$

电介质中任一点的电位移决定于该点的电场强度和极化强度。

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (1-6)$$

所以由极化率和介电常数的定义可得

$$D = \epsilon_0 (1 + \chi) E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (1-7)$$

式中 ϵ_r ——相对介电常数， $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 = 1 + \chi$ 。

显然极化率和相对介电常数都是无量纲的纯数。由式(1-7)可知，电介质就是极化率大于零或相对介电常数大于 1 的物质。

（2）电介质的功能效应 在各种外界条件作用下，电介质的性质发生变化，

这就是电介质的功能效应。正是基于这些功能效应，发展了多种实用的介电功能材料，如表 1-1 所示的介电功能材料及其所依赖的功能效应。在电场作用下，介质中出现极化且极化发生变化，介质对直流电起隔离作用，但交流电特别是高频交流电可顺利通过，介电常数越大，电极表面出现的电荷就越多，介质内储存的能量也越多。大量使用的电容器材料就是直接利用了介质的极化特性。在铁电体中，自发极化取向相反的状态是两个稳定的状态，足够强的交变电场可引起自发极化反转，从而在电极上交替出现数量相等的正负电荷，这是当前广为研究的铁电存储器材料的基础。一些非中心对称的晶体中，电场可诱发与之成正比的应变，应力可诱发与之成正比的极化。在换能和传感等技术中占重要地位的压电材料就是据此发展起来的。在任何电介质中，电场均可导致与其平方成正比的应变，有的应变相当大，有实用价值，于是发展了电致伸缩材料。电介质的自发极化是温度的函数，温度改变时，极化的变化将使外电路中出现电荷的释放和吸收，这是热释电材料的基础。

表 1-1 主要的介电功能材料

外场	响应	功能材料	外场	响应	功能材料
电场	极化	电容器材料	应力	极化(线性)	压电材料
电场	自发极化反转	存储器材料	温度	自发极化变化	热释电材料
电场	应变(线性)	压电材料	电场		电绝缘材料
电场	应变(二次方)	电致伸缩材料			

在光频电场作用下，极化表现为电子相对于原子核的光频振动，于是被极化的物质成为电磁波（光波）的发射源。如果入射光频电场很强，将引起非线性极化，即发射的光波中有两倍于或多倍于入射光频率的成分。这是非线性光学材料的基础。光频范围极化的难易程度用折射率来表示，它等于光频介电常数的平方根。折射率可因各种外场发生变化。在强电场作用下折射率的变化称为电光效应，在应力作用下折射率的变化称为声光效应，在强光频电场作用下折射率的变化称为光折变效应。基于这些效应，分别发展了电光材料、声光材料和光折变材料。

1.1.3.2 电绝缘材料

电绝缘材料（electric insulation materials）与上述各种材料不同，特点是在电场作用下性能基本上保持不变。其主要性能指标是电击穿强度。电击穿是强电场下空间电荷的大量激发、强烈转移并导致结构破坏的现象。由于电的使用离不开电绝缘材料，所以它是最早实用的电介质，而且在电介质的多种功能效应发现以前，电绝缘材料是唯一实用的电介质材料，过去人们通常把绝缘体和电介质作为同义词，其实电绝缘材料只是多种介电功能材料之一。

广义而言，凡是利用物质的固有电阻特性来制造不同功能元件的材料均称为电绝缘材料。如制作发热体的电热材料；绕制标准电阻器的精密电阻材料以及制作力敏、热敏传感器的应变电阻材料和热敏电阻材料等。