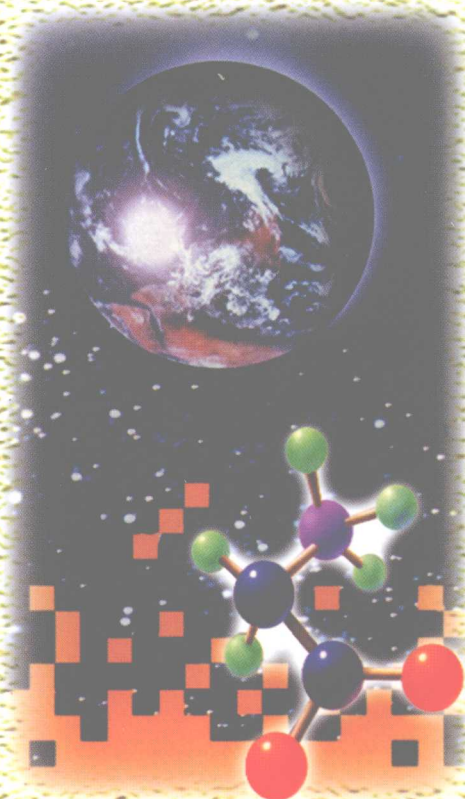




中国科学院研究生教学丛书



分子光化学与 光功能材料科学

樊美公 姚建年 佟振合 等 编著

 科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

中国科学院研究生教学丛书

分子光化学与光功能材料科学

樊美公 姚建年 佟振合 等 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书大致可分为三部分。第一部分和第二部分为现代分子光化学基础理论和典型的光化学反应机制综合分析与论述。包括分子光化学导论;分子激发态的产生及其分子内物理衰变理论;激发态的能量转移与电子转移理论;激发态反应动力学,特别侧重瞬态过程,涉及皮秒和飞秒过程动力学;光反应中间体和高级激发态的光化学;光氧化反应;光环合加成反应理论与中间体的捕获;双键的光异构化反应。第三部分是典型的光功能材料的综合论述。包括有机光致发光材料与电致发光材料以及荧光探针和传感器件;有机电致发光二极管(OLED)的研究及其进展;有机光致变色与电致变色材料;有机光折变材料的新进展;有机金属配合物光功能材料;非线性光学材料与微、纳米加工技术与工程;新型光信息存储材料、原理与器件;半导体、纳米材料与分子器件;绿色能源化学-光电转换原理、器件与太阳能的利用。

本书可供光化学、光物理、材料科学等光电子技术领域的科学家、科研人员、工程师使用,也可作为理工科相关专业高年级学生和研究生的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

分子光化学与光功能材料科学/樊美公,姚建年,佟振合等编著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-022439-2

(中国科学院研究生教学丛书)

I. 分… II. ①樊…②姚…③佟… III. ①高等化学:光化学-研究生-教材
②材料科学:功能材料-研究生-教材 IV. O644.1 TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 099278 号

责任编辑:杨 震 袁 琦 沈晓晶 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 1 月第一次印刷 印张:54

印数:1—2 200 字数:1 249 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

《中国科学院研究生教学丛书》总编委会

主 任：白春礼

副主任：何 岩 师昌绪 杨 乐 汪尔康

沈允钢 黄荣辉 叶朝辉

委 员：朱清时 叶大年 王 水 施蕴渝

余翔林 冯克勤 冯玉琳 高 文

洪友士 王东进 龚 立 吕晓澎

林 鹏

《中国科学院研究生教学丛书》化学学科编委会

主 编：汪尔康

副主编：朱清时

编 委：蒋耀忠 庞文琴 袁倬斌 张玉奎

于德泉

《中国科学院研究生教学丛书》序

在 21 世纪曙光初露,中国科技、教育面临重大改革和蓬勃发展之际,《中国科学院研究生教学丛书》——这套凝聚了中国科学院新老科学家、研究生导师们多年心血的研究生教材面世了。相信这套丛书的出版,会在一定程度上缓解研究生教材不足的困难,对提高研究生教育质量起着积极的推动作用。

21 世纪将是科学技术日新月异,迅猛发展的新世纪,科学技术将成为经济发展的最重要的资源和不竭的动力,成为经济和社会发展的首要推动力量。世界各国之间综合国力的竞争,实质上是科技实力的竞争。而一个国家科技实力的决定因素是它所拥有的科技人才的数量和质量。我国要想在 21 世纪顺利地实施“科教兴国”和“可持续发展”战略,实现邓小平同志规划的第三步战略目标——把我国建设成中等发达国家,关键在于培养造就一支数量宏大、素质优良、结构合理、有能力参与国际竞争与合作的科技大军,这是摆在我国高等教育面前的一项十分繁重而光荣的战略任务。

中国科学院作为我国自然科学与高新技术的综合研究与发展中心,在建院之初就明确了出成果出人才并举的办院宗旨,长期坚持走科研与教育相结合的道路,发挥了高级科技专家多、科研条件好、科研水平高的优势,结合科研工作,积极培养研究生;在出成果的同时,为国家培养了数以万计的研究生。当前,中国科学院正在按照江泽民同志关于中国科学院要努力建设好“三个基地”的指示,在建设具有国际先进水平的科学研究基地和促进高新技术产业发展基地的同时,加强研究生教育,努力建设好高级人才培养基地,在肩负起发展我国科学技术及促进高新技术产业发展重任的同时,为国家源源不断地培养输送大批高级科技人才。

质量是研究生教育的生命,全面提高研究生培养质量是当前我国研究生教育的首要任务。研究生教材建设是提高研究生培养质量的一项重要的基础性工作。由于各种原因,目前我国研究生教材的建设滞后于研究生教育的发展。为了改变这种情况,中国科学院组织了一批在科学前沿工作,同时又具有相当教学经验的科学家撰写研究生教材,并以专项资金资助优秀的研究生教材的出版。希望通过数年努力,出版一套面向 21 世纪科技发展、体现中国科学院特色的高水平的研究生教学丛书。本丛书内容力求具有科学性、系统性和基础性,同时也兼顾前沿性,使阅读者不仅能获得相关学科的比较系统的科学基础知识,也能被引导进入当代科学研究的前沿。这套研究生教学丛书,不仅适合于在校研究生学习使用,也可以作为高校教师和专业研究人员工作和

学习的参考书。

“桃李不言，下自成蹊。”我相信，通过中国科学院一批科学家的辛勤耕耘，《中国科学院研究生教学丛书》将成为我国研究生教育园地的一丛鲜花，也将似润物春雨，滋养莘莘学子的心田，把他们引向科学的殿堂，不仅为科学院，也为全国研究生教育的发展作出重要贡献。

钱阳群

前 言

我国分子光化学的系统研究与教学已有近三十年。从 20 世纪 80 年代开始,中国科学院感光化学研究所、中国科学院理化技术研究所和中国科学院化学研究所等陆续开展了分子光化学与功能材料,特别是光功能材料的研究。在国家高技术研究发展计划(“863”计划)和国家重点基础研究发展计划(“973”计划)、国家自然科学基金委员会和中国科学院的支持下取得了一系列基础性、创新性和前沿性成果。本书从分子光化学的现代理论出发,着眼于当代材料科学的发展趋势和前沿状况;以光功能材料科学的研究成果为中心,从材料分子的微观物理化学性质出发,着眼于材料的综合功能和光、电等多功能集成性质开展论述,同时,还简明地介绍了相关光、电子器件的基本原理和构建方法。

本书由佟振合院士、姚建年院士、徐建华教授、朱晋昌研究员和樊美公研究员等二十余位学者专家执笔撰写。本书既是一本现代分子光化学理论的比较全面的综合论述,又是光功能材料科学前沿研究成果的系统总结和评述。

近几年国内已经出版了光化学和功能材料领域的一些专著、译著和教学用书。例如,樊美公等著,《光化学基本原理和光子学材料科学》,2001,科学出版社;吴世康编著,《超分子光化学导论》,2005,科学出版社;张建成、王元夺编著,《现代光化学》,2006,化学工业出版社;朱道本主编,《功能材料化学进展》,2005,化学工业出版社。将分子光化学与光功能材料科学相结合的专著、高等教育教材和参考书在国内外实属创新之举。

本书内容大致分为三部分。第一部分,现代分子光化学基础理论综合分析与论述,共分五章:分子光化学导论;分子激发态的产生及其分子内物理衰变理论;激发态的能量转移(也称能量传递)与电子转移理论;激发态反应动力学,特别侧重瞬态过程,涉及皮秒和飞秒超快过程动力学;光反应中间体和高级激发态的化学,特别侧重分步和同步多光子光解过程的实验方法和相关理论分析。第二部分,典型的光化学反应机制讨论,只选择三个重要反应:光氧化反应,这是一个既具有重要理论意义,又具有广泛应用价值,与国民经济和人民生活密切相关的科学问题;光环合加成反应理论和中间体的捕获,涉及有机化学中的重要理论问题,特别侧重分步光环合加成反应;双键的异构化反应,它是众多高技术、新材料的基础。第三部分,典型光功能材料的综合论述。讨论这部分内容时,既强调不同材料的特点,又关注不同类型材料的共性,试图将不同类型的材料,彼此又有密切联系的材料放在一起进行讨论,共有九章。主要包括了有机光致发光材料与电致发光材料;光致发光涉及分子激发态的形成和衰变,激发态的能量传递、电子转移和分子开关,荧光探针和传感器件等。高性能光致发光分子,往往在电致发光材料中获得应用,电致发光材料的应用已经出现了十分诱人的前景。有机光致变色与电致变色材料对于有效调控材料的颜色,开发新型器件具有重要意义,这种讨论方式是在其他专著中没有见过的。有机光折变材料在全息实时存储器、光像放大器、振荡器、相位共轭器、空间调制器以及在光学信息处理和光学计算技术方面具有重要应用前景。另一个新领域是有机金属配合物光功能材料的论述。最后几章是对于近十余年来出现的若干新型光功能材料与器件的讨论与评述。

其中包括非线性光学材料与微、纳米加工技术与工程,新型光信息存储材料、原理与器件,半导体、纳米材料与分子器件,有机电致发光二极管(OLED)的研究及其进展,绿色能源化学-光电转换原理、器件与太阳能的利用。总之,本书对于从事光化学基础理论教学与研究的工作者而言,不仅提供了系统而简明的理论分析,而且可以使他们清晰地看出基础理论的应用前景;本书对于从事光功能材料与器件的教学与研究的工作者而言,不仅提供了系统而简明的前沿研究状况,而且可以使他们进一步了解相关的基础理论,对于开发新材料、新器件具有重要的参考价值。

本书的所有作者衷心感谢国家科学技术学术著作出版基金的支持。感谢科技部、国家自然科学基金委员会和中国科学院对我们研究工作的支持、关心与帮助。感谢中国科学院理化技术研究所刘新厚所长对本书出版的关心与资助。感谢梁敬魁院士、张希院士和席振峰教授给予的关心支持与帮助。感谢科学出版社杨震和袁琦先生的支持与帮助。感谢一切给予本书关心、支持与帮助的同事们和学生们。

樊美公

二零零八年三月于北京,中国科学院理化技术研究所

目 录

序

前言

第1章 分子光化学导论

1.1 分子轨道

1.1.1 n 轨道

1.1.2 π 轨道和 π^* 轨道

1.1.3 σ 轨道和 σ^* 轨道

1.2 电子激发态

1.2.1 激发态的电子组态

1.2.2 激发态的多重态

1.2.3 激发态的能量

1.3 激发态的产生

1.3.1 Lambert-Beer 定律

1.3.2 Stark-Einstein 定律

1.3.3 吸收光谱

1.3.4 选择定则

1.4 激发态的衰减

1.4.1 Kasha 规则

1.4.2 辐射跃迁

1.4.3 无辐射跃迁

1.4.4 能量传递

1.4.5 电子转移

1.4.6 化学反应

1.4.7 Jablonski 图解

1.5 光化学发展的趋势

参考文献

第2章 激发态的产生及其分子内物理衰变理论

2.1 激发态的产生及相关问题

2.1.1 构造原理

2.1.2 光和分子的相互作用

2.1.3 选择规则

2.1.4 跃迁及激发态的表示方法

2.1.5 单重态与三重态的性质比较

2.1.6 $n \rightarrow \pi^*$ 跃迁和 $\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁

2.1.7 激发态与基态的性质比较

2.1.8 激发态的寿命	26
2.1.9 量子产率	28
2.2 激发态的衰变概述	29
2.3 辐射跃迁与光吸收的关系	30
2.4 荧光	32
2.4.1 荧光产生的条件	32
2.4.2 影响荧光的主要因素	33
2.4.3 荧光速率常数、强度、量子产率和荧光寿命	36
2.4.4 荧光光谱和斯托克斯频移	38
2.4.5 高级激发态发射的荧光	39
2.5 磷光	40
2.5.1 磷光的产生及磷光速率常数	40
2.5.2 磷光量子产率	41
2.5.3 磷光光谱	42
2.5.4 室温下液态溶液中的磷光	42
2.6 延迟荧光	42
2.6.1 E型延迟荧光	43
2.6.2 P型延迟荧光	43
2.7 激基缔合物和激基复合物	44
2.7.1 电荷转移络合物与电荷转移跃迁	44
2.7.2 激基缔合物及激基复合物的形成与特征	45
2.8 荧光技术的应用	46
2.9 非辐射跃迁理论	48
2.10 内转换	50
2.10.1 速率常数	50
2.10.2 量子产率	51
2.11 系间窜越	51
2.12 单分子过程的光物理动力学	55
参考文献	56
第3章 分子激发态能量转移与电子转移	59
3.1 分子激发态能量转移	59
3.1.1 引言	59
3.1.2 能量转移的基本理论	60
3.1.3 能量转移的典型实例	72
3.1.4 能量转移的研究方法	76
3.2 分子激发态电子转移	83
3.2.1 引言	83
3.2.2 电子转移的基本理论	84
3.2.3 电子转移的研究方法	96

3.2.4 能量转移与电子转移的对比	107
3.3 能量转移与电子转移的竞争	107
3.3.1 引言	107
3.3.2 双组分体系中的能量转移和电子转移	108
3.3.3 能量转移理论	109
3.3.4 电子转移过程	111
3.3.5 能量转移与电子转移的一般动力学处理	111
3.3.6 能量向多个激发态转移	111
3.3.7 能量转移与电子转移的竞争	112
3.3.8 能量转移与电子转移竞争的实例	113
参考文献	115
第4章 分子激发态反应动力学和超快过程研究	126
4.1 反应动力学基本原理	126
4.1.1 分子激发态的产生	126
4.1.2 激发态的失活途径	127
4.1.3 激发态能量传递与电荷转移	129
4.2 时间分辨光谱技术简介	130
4.2.1 飞秒时间分辨吸收	131
4.2.2 皮秒时间分辨荧光	132
4.3 酮缺陷和链间相互作用对聚芴类分子绿光发射的影响	133
4.3.1 非树状化聚芴薄膜和溶液中的发光行为	133
4.3.2 带芴酮缺陷聚芴 PFN 薄膜和溶液中的发光行为	135
4.3.3 树状化聚芴薄膜和溶液中的发光行为	138
4.3.4 芴酮缺陷和链间相互作用的协同效应	139
4.4 菌紫质光循环中视黄醛超快异构化过程	141
4.4.1 近红外区的全局拟合	141
4.4.2 激发态吸收 450nm 动力学曲线的分析	142
4.4.3 基态漂白 540nm 动力学曲线的分析	143
4.4.4 光产物 630nm 动力学曲线的分析	144
4.4.5 可见区受激荧光 710nm 动力学曲线的分析	144
参考文献	145
第5章 光反应中间体及高级激发态的光化学	150
5.1 分步双激光技术与一般光化学方法	150
5.2 分步双激光技术的简介	151
5.3 激发态反应中间体的荧光光谱研究	152
5.3.1 自由基的荧光光谱	153
5.3.2 双自由基的荧光光谱	156
5.3.3 卡宾的发射光谱	157
5.4 激发态中间体的瞬态吸收	159

5.5	激发态中间体的单分子反应	163
5.5.1	单分子光裂解反应	163
5.5.2	分子内光裂解重排反应	164
5.5.3	单光子光电离	166
5.6	激发态反应中间体的分子间反应	167
5.6.1	氧与激发态自由基之间的反应	168
5.6.2	激发态自由基同烯烃的反应	168
5.6.3	激发态自由基同电子受体之间的反应	169
5.6.4	激发态自由基同电子给体之间的反应	170
5.6.5	卡宾的分子间反应	170
5.7	高级激发态	172
5.7.1	高级激发态——光物理	173
5.7.2	高级激发态的光化学	183
5.8	多光子过程理论	190
5.8.1	微扰方法	190
5.8.2	格林函数方法	200
	参考文献	205
第6章	光氧化反应	211
6.1	引言	211
6.1.1	氧原子和氧分子的电子结构和化学活性	211
6.1.2	光氧化反应的分类	212
6.2	自动氧化反应	213
6.2.1	自动氧化反应的动力学	213
6.2.2	引发	216
6.2.3	链传递	217
6.2.4	链终止	218
6.2.5	抗氧化剂	220
6.2.6	多不饱和脂肪酸的自动氧化	226
6.2.7	支链反应	231
6.2.8	金属催化的自动氧化反应	234
6.2.9	氮氧自由基催化的自动氧化反应	235
6.3	单重态氧反应	237
6.3.1	单重态氧的基本性质	237
6.3.2	单重态氧的产生	239
6.3.3	单重态氧的化学反应	242
6.3.4	杂环化合物的单重态氧反应	252
6.4	电子转移光氧化反应	264
6.4.1	经激发态反应物与氧的 CTC 或经激发态反应物与基态氧的电子转移进行的光氧化反应	265

6.4.2	经基态反应物与单重态氧进行电子转移而进行的光氧化反应	271
6.4.3	光诱导电子转移反应	276
6.4.4	激发态电子受体敏化剂引发的光氧化反应	278
6.5	分子筛以及某些超分子体系中的光氧化反应	303
6.5.1	分子筛中的光氧化反应	303
6.5.2	其他超分子体系中的光氧化反应	306
6.6	与单重态氧反应有关的化学发光现象	308
6.6.1	过氧化物反应中产生的单重态氧的化学发光	308
6.6.2	产生化学发光的能量要求	309
6.6.3	二氧杂环丁烷体系的化学发光	310
6.6.4	其他 CL 体系	315
6.6.5	化学发光在分析化学中的应用	318
6.7	生物体系中的光氧化反应	319
6.7.1	DNA 的氧化损伤	319
6.7.2	蛋白质的氧化损伤	327
6.7.3	光化学疗法	331
	参考文献	347
第 7 章	双键的异构化反应及其应用	378
7.1	碳-碳双键的异构化反应	378
7.1.1	一般理论分析	378
7.1.2	基态顺-反热异构化反应	379
7.1.3	光异构化或激发态异构化反应	380
7.2	氮-氮双键的异构化	392
7.2.1	偶氮苯类化合物	392
7.2.2	氨基偶氮苯类型	393
7.2.3	假 1,2-二苯乙烯类型	393
7.2.4	偶氮苯的光异构化机制	394
7.3	碳-氮双键的异构化	397
7.3.1	含一个双键的异构化	397
7.3.2	碳-氮双键的单向光异构化	398
7.3.3	含两个碳-氮双键化合物的异构化	398
7.4	甲嵌衍生物的异构化反应	399
7.5	双键异构化的应用	401
7.5.1	离子识别	401
7.5.2	对映体的分离	401
7.5.3	光控蛋白和多肽的结构	402
7.5.4	光控树枝状化合物的定向药物输送	402
7.5.5	偶氮苯的异构化在光控分子机器中的应用	402
7.5.6	含偶氮苯衍生物的液晶材料的研究	403

参考文献	403
第8章 光环合加成反应理论和反应中间体的捕获	405
8.1 碳-碳双键之间的分步光环合加成反应	405
8.1.1 芳烃中碳-碳不饱和键的光环合加成反应	407
8.1.2 α, β -烯酮的光环合加成反应	409
8.2 羰基和硫羰基参与的分步光环合加成反应	412
8.3 含碳氮双键化合物的分步光环合加成反应	416
8.4 协同光环合加成反应	428
参考文献	431
第9章 光诱导电子转移和电荷转移及其在荧光化学传感器中的应用	435
9.1 概述	435
9.2 分子内共轭的电荷转移化合物的辐射衰变和非辐射衰变	436
9.3 光诱导电子转移及其在荧光化学传感器工作机制中的重要性	444
9.4 荧光化学传感器(或称传感器)的研究	450
9.4.1 报告器	451
9.4.2 替续器	454
9.4.3 接受体的原理和设计	455
9.4.4 荧光化学传感器	467
参考文献	476
第10章 有机光致变色与电致变色材料	481
10.1 有机光致变色材料	481
10.1.1 光致变色概述	481
10.1.2 俘精酸酐家族化合物	486
10.1.3 二芳基乙烯类光致变色体系	508
10.1.4 吡喃类化合物	517
10.1.5 螺吡喃和螺噁嗪	525
10.1.6 光致变色席夫碱	538
10.1.7 特殊环境中的光致变色	543
10.2 电致变色材料	559
10.2.1 引言	559
10.2.2 电致变色材料的基础参数	559
10.2.3 在共轭高分子中电致变色的形成机制	560
10.2.4 电致变色高分子的表征方法	561
10.2.5 电致变色高分子的多重颜色调控	565
10.2.6 高分子电致变色器件	571
10.2.7 展望	573
10.3 光致变色与电致变色双功能材料	574
10.3.1 二芳基乙烯类双功能材料	574
10.3.2 螺噁嗪类双功能材料	576

10.4 光致变色与电致变色材料的应用	578
参考文献	581
第 11 章 高分子光折变材料研究进展	605
11.1 概述	605
11.2 高分子光折变材料的必要组分及性能表征	607
11.2.1 高分子光折变材料的必要组分及相互间能级关系	607
11.2.2 高分子光折变材料的性能表征	608
11.2.3 外电场对高分子光折变材料的影响	611
11.3 高分子光折变材料	611
11.3.1 以非线性光学聚合物为基础的高分子光折变材料	612
11.3.2 以光导性聚合物为基础的高分子光折变材料	616
11.3.3 全功能型高分子光折变材料	619
11.3.4 无定形小分子光折变材料	623
11.4 高分子光折变材料中的取向增强作用	624
11.5 高分子光折变材料展望	626
参考文献	627
第 12 章 分子基光功能配合物材料的光化学与光物理	631
12.1 配合物中的电子激发态	631
12.1.1 配体内的电荷跃迁	632
12.1.2 金属中心的电荷跃迁	632
12.1.3 配体到配体的电荷跃迁	632
12.1.4 配体到金属的电荷跃迁	632
12.1.5 金属到配体的电荷跃迁	633
12.1.6 金属-金属到配体的电荷跃迁	633
12.1.7 其他类型的电荷跃迁	633
12.2 金属有机配合物的光取代反应机制	633
12.2.1 压力对光诱导取代反应的影响	634
12.2.2 $M(CO)_4(phen)$ 和 PR_3 的光诱导取代反应机制	635
12.3 光致发光的 Pt(II)多联吡啶配合物	642
12.3.1 多联吡啶 Pt(II)配合物的电子光谱	643
12.3.2 光致发光多联吡啶 Pt(II)配合物	644
12.3.3 光致发光多联吡啶 Pt(II)配合物的应用	645
12.4 d^{10} 电子构型铜(I)和金(I)配合物的结构和光物理性质	648
12.4.1 $Cu(NN)_2^+$ 和 $Cu(PP)_2^+$ 类配合物	649
12.4.2 光致近紫外高能发射的 $Au_2(dcpm)_2(Y)_2$ ($Y=ClO_4^-$ 、 PF_6^- 、 $CF_3SO_3^-$) 配合物	651
参考文献	653
第 13 章 有机非线性光学材料与微纳米结构加工	661
13.1 非线性光学效应的基本原理	661
13.1.1 电介质中的光诱导极化和物质的非线性光学响应	661

13.1.2 非线性光学效应与应用	662
13.2 有机非线性光学材料	663
13.2.1 有机非线性光学分子的分子设计	663
13.2.2 有机二阶非线性光学材料	668
13.2.3 有机三阶非线性光学材料	676
13.2.4 有机高分子非线性光学材料应用	682
13.3 激光微纳米结构加工技术与应用	682
13.3.1 双光子过程	682
13.3.2 激光微纳米加工的基本原理	683
13.3.3 双光子聚合加工材料	684
13.3.4 双光子微纳米结构加工	688
13.3.5 微纳米结构的应用前景	692
参考文献	692
第 14 章 新型光存储原理、材料与器件	702
14.1 光子型光存储的原理和类型	703
14.1.1 光谱烧孔光存储	703
14.1.2 电子俘获光存储	704
14.1.3 光折变光存储	705
14.1.4 光致变色光存储	705
14.2 光子型光存储的记录方式	705
14.2.1 斑点式	705
14.2.2 矢量式	706
14.2.3 阵列式	706
14.2.4 全息光栅式	706
14.3 有机和生物分子光致变色材料用于光存储	706
14.4 可擦重写光致变色光盘	709
14.5 双色光致变色材料双波长光存储	710
14.6 光致各向异性用于光存储	713
14.7 双光子三维光存储	717
14.7.1 双光子三维光存储原理	717
14.7.2 双光子三维光存储方式	718
14.7.3 光致变色双光子三维光存储材料	719
14.8 光子型光存储发展方向	721
参考文献	722
第 15 章 半导体纳米材料与复合材料	724
15.1 概述	724
15.2 过渡金属氧化物半导体光致变色材料	725
15.2.1 简介	725
15.2.2 MoO_3 、 WO_3 的光致变色	726

15.2.3 小结	732
15.3 无机/有机复合光致变色材料	732
15.3.1 光致变色机制	732
15.3.2 多酸的烷基铵盐	734
15.3.3 自组装多层光致变色超薄膜	735
15.3.4 过渡金属多酸/高分子复合光致变色薄膜	740
15.3.5 多酸/有机胺改性的二氧化硅纳米复合薄膜	744
15.4 过渡金属氧化物的电致变色	745
15.4.1 简介	745
15.4.2 组成	746
15.4.3 机制研究	750
15.4.4 器件开发	753
15.4.5 其他	755
15.4.6 小结	756
15.5 二氧化钛薄膜及纳米颗粒——环境治污明星	756
15.5.1 简介	756
15.5.2 实际应用	758
15.6 半导体光诱导特性在绝缘体表面金属化的应用	760
15.7 展望	762
参考文献	763
第 16 章 有机电致发光二极管的研究及其进展	774
16.1 概述	774
16.2 对 OLED 器件功能的评价和功率效率	777
16.3 OLED 的发展简史	780
16.3.1 单层发光器件	780
16.3.2 异质结 OLED 的出现	780
16.3.3 能量转移和染料掺杂的 OLED	782
16.4 有关能量转移问题的讨论	783
16.5 高分子的电致发光器件	785
16.6 有关激子的形成和三重态磷光 OLED	786
16.7 蓝色三重态发光化合物的研究及吸热的能量转移	793
16.8 有关提高器件量子产率的进一步讨论	801
16.9 有关器件的输出耦合问题	802
16.10 载流子的注入——决定器件功率效率的重要因素	803
16.10.1 电极与有机层的接触及载流子的注入	803
16.10.2 在电极与有机层间插入缓冲层以提高器件工作效率的问题	808
16.11 有关 OLED 的老化和破坏问题	810
16.12 结束语	812
参考文献	812