

发光学与发光材料

徐叙琰 苏勉曾 主编



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

发光学与发光材料/徐叙琰, 苏勉曾主编. —北京:
化学工业出版社, 2004. 4
ISBN 7-5025-5410-6

I. 发… II. ①徐…②苏… III. 发光材料
IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 026333 号

发光学与发光材料

徐叙琰 苏勉曾 主编
责任编辑: 丁尚林
文字编辑: 颜克俭
责任校对: 陶燕华
封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话 (010)64982530
<http://www.cip.com.cn>

新华书店北京发行所经销
北京永鑫印刷有限责任公司印刷
三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 49 字数 1221 千字
2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-5410-6/TB·31
定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

编委会名单

主 编 徐叙琰 苏勉曾

编 委 (按拼音排序)

范希武 方容川 黄世华

刘洪楷 刘行仁 苏勉曾

孙 波 徐叙琰

参编人员名单

(按拼音排序)

蔡汝秀 陈朗星 范广涵 范希武 方容川

华玉林 黄世华 金亿鑫 李述体 刘洪楷

刘迺康 刘行仁 罗 勤 阮世平 施朝淑

石春山 宋 航 苏勉曾 孙 波 唐明道

滕 枫 熊光楠 徐 征 徐叙琰 于宝贵

元 光 张贵珠 张新夷 钟国柱 周连祥

周映雪

全书作者名录

章节	目 录	作者	合作者	通 讯 地 址
前言		徐叙珩 苏勉曾		北京市西直门上园村3号 北京交通大学光电子技术研究所 100044 北京大学化学与分子工程学院 100871
第1章	发光的定义及分类	刘洪楷		长春市东南湖大路16号中科院长春光机物理所《发光学报》编辑部 130033
第2章	基本物理过程及现象	黄世华		北京市西直门上园村3号 北京交通大学光电子技术研究所 100044
第3章	半导体的发光	方容川		合肥市金寨路96号 中国科学技术大学物理系 230026
第4章	分立中心的发光	黄世华		
第5章	特殊结构物质的发光	范希武		长春市东南湖大路16号 中科院长春光机与物理研究所 130033
第6章	发光动力学问题的计算机模拟	黄世华		
第7章	发光在照明和其他光源中的应用	刘行仁 唐明道		深圳市罗湖区翠竹北新港鸿东湖阁402室 518020 长春市延安大路1号 中科院长春光机物理所8区15栋3门406室 130021
第8章	显示技术	见下表		
第9章	发光在探测中的应用	苏勉曾 施朝淑		安徽合肥 中国科技大学物理系(或国家同步辐射实验室) 230026
第10章	主要发光材料	石春山		长春市人民大街5625号 中科院长春应用化学研究所稀土化学与物理重点实验室 130022
第11章	发光材料的制备	苏勉曾		
第12章	发光材料的表征及测量技术	于宝贵	黄世华 刘迺康	长春市延安大路同德路 光机物理所8区18栋601室 130021 长春市东南湖大路16号 中科院长春光机物理所老干部处 130033
第13章	视觉与颜色	唐明道		
第14章	发光分析	孙 波	张贵珠 14.1 蔡汝秀 14.2 陈朗星 14.3	天津南开大学化学学院 300071 武汉大学化学学院 430072 天津南开大学化学学院 300071
第15章	同步辐射原理与应用简介	周映雪 张新夷		上海市邯郸路220号 复旦大学物理系,应用表面物理国家实验室同步辐射研究中心 200433 同上

第8章作者名录

章	节	三级	四级	作者	合作者	通 讯 地 址	
第8章	第1节(8.1)	8.1.1	8.1.1.1	熊光楠		天津理工大学材料物理所 300191	
			8.1.1.2	阮世平		浙江省杭州市文华路高教新村6-1-101室 310012	
			8.1.1.3	金亿鑫			长春市东南湖大路16号 中国科学院长春光机与物理研究所 130033
					宋 航		长春市东南湖大路16号 中国科学院长春光机与物理研究所 130033
			元 光		中国海洋大学 信息科学与工程学院(青岛市香港东路23号) 266071		
	8.1.2		徐叙珩 徐 滕	徐 征 徐 枫	北京市西直门上园村3号 北京交通大学光电子技术研究所 100044 北京市西直门上园村3号 北京交通大学光电子技术研究所 100044		
	第2节(8.2)			徐叙珩			
	第3节(8.3)	8.3.1			范广涵		广州市石牌华南师范大学光电子学院 510631
					李述体		广州市石牌华南师范大学光电子学院 510631
	第4节(8.4)	8.4.1			周连祥		天津市南开区红旗南路263号 天津理工大学材料物理研究所 300191
							长春市朝阳区同德路光机物理所8区17栋1门401室 130021
							长春市延安大路1号 中科院长春光机物理所8区 130021
	8.4.2				钟国柱		长春市延安大路1号 中科院长春光机物理所8区 130021
					徐叙珩	徐 征	
	第5节(8.5)				罗 勤		长春市延安大路1号 中科院光机物理研究所第8区18栋301室 130021

前 言

自然界中物质的运动都靠能量及其转换，把各种能量转换为光能的过程主要有两种：其一是热辐射；其二是发光。而它们都需要中间的媒介。如从这个中间媒介的个别原子或分子中发生的过程来看，两个原子或分子可以分别独立地自发发光，而无需协调它们的相位，因而它们的发光不是相干的；在热辐射中两个原子或分子也经历着这种互不相干的过程。所以就单个原子或分子而言，发光同温度辐射并无不同。但就这个中间媒介的整体发光而言，它们就截然不同了，当物质温度升高时，从400K就开始有可见光发出，并逐渐蓝移，它的光谱分布、发光强度都符合热辐射的规律。而发光则不然，在室温下看不到发光体的热辐射，但受到能量激发时发光体则可发出强烈的、耀眼的可见光。它的光谱是发光体的特征，不因温度而变。冷热不是光的属性，但是低温更有利于发光体的发光，人们常称发光为冷光。

发光体吸收能量后，经过一系列的中间过程，才到达发光的元激发态，所以，对发光的研究必须着眼于全过程，而不能只限于研究最后引起发光的能级间的跃迁。然而，高能量的激发不能直接引起发光，而是先经过其他过程，消耗掉部分能量，待能量接近发光要求的能量范围后才引起发光。在这个能量附近，各类发光的主要过程是相同的，但不同的激发方式可以给这个过程以调制或扩展。最简单的激发发光是光致发光。

在历史上阴极射线、X射线以及放射性的发现都曾借助于发光现象。发光学的研究与其他学科有着紧密的联系，也有着互相促进的作用。20世纪量子理论建立以后，发光学从观察、归纳、总结的经验科学中找到了它的物理内涵，确定能级及能级间的跃迁是发光现象的核心，这样，发光学的物理机理及应用都得到了很大发展。到20世纪末，发光学又有了极大开拓。例如：在微腔结构中，发光体能级系统及辐射场都是量子化的，它改变了腔中自发辐射的性质，发展了爱因斯坦辐射理论。量子阱及超晶格是一种量子工程的材料，具有异乎寻常的光学及电学性质，有些是常规晶体中所没有的，它的发光具有很多新的特殊性质。当硅晶体中的孔隙度超过70%时，多孔硅可以发出可见光，其红至绿的光致发光在室温下的量子效率可以达到10%，还能发出蓝色光。纳米发光材料，有原子簇、纳米薄膜、纳米块体几种形态，它可以是半导体、离子晶体、非晶体，还可能是掺杂状态，它们的发光也有很多新的性质。发现了上转化及量子剪裁现象，使小能量光子或大能量光子得到更有效的利用。将发光的起源扩展到态能级，充分利用价带中电子丰富的优势，在闪烁晶体中利用了交叉发光。关于稀土元素的高能级的研究取得了新的进展。蓝色波段及紫外波段发光的研究扩展了发光光谱的范围，使其应用范围有了很大扩展。在信息存储、显示、照明、探测等方面都有新的方案及应用器件。在发光与农业、医学的交叉中也都有新的发展。研究发光的技术在能量分辨、时间分辨及空间分辨上都有极大的创新，如高分辨光谱术，纳秒(ns)、皮秒(ps)、飞秒(fs)时间分辨技术，电子显微镜、原子力显微镜以及近场显微镜显微技术等。发光在深入及开拓方面的成就形成了新的维度，为21世纪发光学的发展准备了良好的开端。

按照激发能的不同，可以把发光分类为光致发光（紫外波段发光或真空紫外波段发光激发）、阴极射线发光（电子束流激发）、电离辐射发光（X射线、 γ 射线及高能离子激发）、

电致发光（直流或交流电场激发）、化学发光（由化学反应能激发）、生物发光（由生物能激发）、摩擦发光（由机械应力激发）等。发光材料是由作为材料主体的化合物（基质）和选定掺入的少量以至微量的杂质离子（激活剂）所组成。有时还掺入另一种杂质离子作为敏化剂。发光材料可以是无机材料，也可以是有机材料。材料的形态有晶态、粉体、薄膜以至纳米态。发光材料受外界能量的激发，将部分的激发能转变为可见光发射。目前已研究开发出数百种各类发光材料，广泛应用于国民经济的各个领域以及人们生活的各个方面，本书前面6章着重讨论发光学的问题，即讨论发光现象中所包含的基本物理过程及重要规律，后面9章则着重讨论发光材料的组成、结构、性质、表征和实际应用等问题，包括发光在测试、光源、信息和图像显示、探测和分析等方面的应用以及有关的应用光学问题。这部专著介绍了发光的基本理论、主要发光材料、发光在各方面的应用。既概括了国际上发光领域的成就和进展，也展示了中国科学工作者的贡献。本书可以作为高等学校物理、化学、材料科学、信息科学、照明工程等专业的教学参考书，科研机构及企业研发部门有关人员的参考用书。

本书是由编辑委员会组织，邀请发光学界各方面的专业研究教学人员集体编写而成。编写者都具有较强的理论基础、丰富的工作经验和独到的科学见解，但学有专攻，行文写作自有风格，专业名词术语也有不同，而且专著涉及的是科学发展及前沿现状，有些问题尚处于百家争鸣阶段，本书未做统一改动。由于时间仓促，本书肯定有不足之处和缺点，希望读者不吝赐教，提出批评和指正。书前附有作者名录，欢迎读者与其交流讨论。

在编写本书过程中，参加编写的各位专家进行密切合作，并得到化学工业出版社的大力支持，责任编辑对本书又做了详尽的编辑加工和润色，我们表示衷心的感谢。还感谢冀国蕊及徐征同志在文秘、通讯、文体规范、进展统计各方面大量及时、细致的具体帮助。

徐叙瑛 苏勉曾
2004年6月

总 目 录

第 1 章 发光的定义及分类	1
1.1 发光的定义	2
1.2 发光的分类	3
1.2.1 光致发光	3
1.2.2 电致发光	3
1.2.3 阴极射线发光	3
1.2.4 X 射线及高能粒子发光	3
1.2.5 化学发光	4
1.2.6 生物发光	4
参考文献.....	4
第 2 章 基本物理过程及现象	5
2.1 光的吸收、反射及折射.....	7
2.1.1 固体中的光学常数	7
2.1.2 光在界面上的反射和折射	8
2.1.3 介电常数的色散和 Kramer-Kronig 关系	10
2.2 Einstein 关系和 Einstein 自发辐射系数	11
2.2.1 Einstein 关系	11
2.2.2 Einstein 自发辐射系数	13
2.3 谱线的宽度和线形.....	14
2.3.1 非均匀线宽.....	14
2.3.2 均匀线宽.....	15
2.3.3 动态非均匀线宽.....	17
2.3.4 谱线的线形.....	17
2.4 相干瞬态过程.....	18
2.4.1 光学 Bloch 方程.....	18
2.4.2 光章动、自由感应衰减和光子回波	22
2.5 量子化的辐射场与原子的相互作用.....	28
2.5.1 辐射场的量子化.....	29
2.5.2 量子化的辐射场和原子的相互作用.....	29
2.6 电子-声子耦合	33
2.6.1 声子.....	33
2.6.2 位形坐标和单频近似理论.....	34
2.6.3 无辐射跃迁.....	40
2.7 能量传递.....	42

2.7.1 Förster-Dexter 理论	42
2.7.2 一对(D,A)间能量传递速率与距离的关系	44
2.7.3 供体发光的统计问题	47
2.7.4 浓度猝灭	53
2.8 光学非线性	55
2.8.1 非线性介质中的 Maxwell 方程	55
2.8.2 二阶非线性效应	56
2.8.3 三阶非线性效应	59
参考文献	67
第3章 半导体的发光	69
3.1 能带模型,直接带与间接带	72
3.2 杂质与缺陷	74
3.2.1 杂质	74
3.2.2 缺陷	77
3.3 电学性质,p 型与 n 型导电性	82
3.3.1 平衡态 p-n 结的性质	83
3.3.2 外加偏压下的 p-n 结	84
3.4 直接跃迁与间接跃迁	86
3.4.1 允许的带间直接跃迁	87
3.4.2 禁戒的带间直接跃迁	90
3.4.3 局域能级参与的跃迁	92
3.4.4 声子参与的跃迁	93
3.4.5 间接带间的跃迁	95
3.5 发光中心及陷阱	98
3.5.1 发光中心	98
3.5.2 陷阱	104
3.6 复合发光及其衰减规律	109
3.6.1 单分子与双分子衰减规律	109
3.6.2 长余辉发光	112
3.6.3 热释光	113
3.6.4 光激励发光	117
3.7 激子发光	118
3.7.1 半导体吸收边的精细结构与激子	119
3.7.2 万尼尔激子	120
3.7.3 自由与束缚激子的复合发光	123
3.8 施主-受主对发光	126
3.8.1 施主-受主对的能量状态	126
3.8.2 浅施主-受主对复合发光及其特征	127
3.8.3 深施主-受主对发光	129
3.9 等电子中心发光	132

3.9.1	等电子中心吸收与发光光谱之间的镜像对称关系	132
3.9.2	等电子中心 NN 对的发光	133
3.10	高激发密度下的发光	135
3.10.1	激子分子及其发光	135
3.10.2	电子-空穴液滴及其发光	136
3.11	p-n 结发光	139
3.11.1	p-n 结发光发展概要	139
3.11.2	p-n 结发光效率	141
3.12	单注入与双注入式发光	143
3.12.1	注入方式与 p-n 结发光区域	143
3.12.2	注入效率	146
3.12.3	p-i-n 结构的双注入式发光	147
	参考文献	149
第 4 章	分立中心的发光	155
4.1	群论在分立中心发光研究中的应用	156
4.1.1	能级的分类和低对称下的劈裂	156
4.1.2	选择定则和状态混杂	157
4.1.3	分立发光中心能级结构的计算	159
4.2	稀土离子的能级和跃迁	165
4.2.1	稀土离子 $4f^n$ 组态的能级结构	165
4.2.2	稀土离子 $4f^{n-1}5d$ 组态的能级结构	167
4.2.3	稀土离子电偶极跃迁的 Judd-Ofelt 理论	172
4.3	过渡金属离子的能级结构	175
4.4	其他分离发光中心的能级结构	177
4.4.1	ns^2 型离子的发光中心	177
4.4.2	离子团发光中心	178
4.5	分立中心的发光过程	178
4.5.1	线性系统的响应函数和转移函数	179
4.5.2	应用转移函数的例子	180
4.5.3	非指数衰减	183
4.6	上转换发光	185
4.6.1	激发态吸收	185
4.6.2	上转换发光中的吸收雪崩现象	187
4.6.3	能量传递引起的上转换发光	188
4.7	量子剪裁	189
4.7.1	光子分步发射	190
4.7.2	逐次能量传递	191
	参考文献	193
第 5 章	特殊结构物质的发光	195
5.1	半导体超晶格和量子阱的发光	196

5.1.1	概论	196
5.1.2	半导体超晶格和量子阱的制备	199
5.1.3	半导体超晶格和量子阱的光谱	203
5.1.4	非对称半导体双量子阱的发光	208
5.1.5	组合半导体超晶格的发光	211
5.2	半导体量子线和量子点的发光	212
5.2.1	半导体量子线的发光	213
5.2.2	半导体量子点的发光	217
5.3	多孔硅的发光	224
5.3.1	多孔硅的形成与结构	225
5.3.2	多孔硅的光致发光	227
5.3.3	多孔硅的电致发光	230
5.3.4	多孔硅的发光机理	231
5.4	非晶态半导体的发光	233
5.4.1	非晶态半导体的结构与制备	233
5.4.2	非晶态半导体的能带结构	235
5.4.3	非晶态硅的发光	236
5.4.4	非晶态硫属化合物的发光	239
	参考文献	239
第 6 章	发光动力学问题的计算机模拟	241
6.1	随机变量的模拟	242
6.2	发光的模拟	244
6.2.1	发光的统计性质	244
6.2.2	单分子荧光的计算机模拟	245
6.2.3	单分子识别	247
6.3	能量传递过程的模拟	249
6.3.1	具有分布密度 $\varphi_0(X)$ 的随机变量 X 的模拟	249
6.3.2	静态能量传递	249
6.3.3	D-D 传递对 D-A 传递的影响	250
6.4	相干瞬态现象的模拟	251
6.4.1	相位和频率的随机变化	251
6.4.2	红宝石中的失相过程的计算机模拟	256
	参考文献	258
第 7 章	发光在照明和其他光源中的应用	259
7.1	前言	261
7.2	灯用发光材料和辐射光源	261
7.3	荧光灯	262
7.3.1	灯的结构和工作原理	262
7.3.2	荧光灯的能量转换	263
7.3.3	色温、光色、显色指数	263

7.3.4	三基色荧光灯	264
7.3.5	无电极荧光灯	265
7.3.6	无汞荧光灯(稀有气体荧光灯)	266
7.4	高压汞荧光灯	267
7.4.1	灯的结构和工作原理	267
7.4.2	能量转换	268
7.5	金属卤化物灯和钠灯	268
7.5.1	金属卤化物灯	268
7.5.2	高压钠灯	270
7.6	荧光灯用发光材料	271
7.6.1	发展历史	271
7.6.2	对发光材料性能上的要求	272
7.6.3	卤磷酸盐	273
7.6.4	磷酸盐荧光体	288
7.6.5	硅酸盐荧光体	293
7.6.6	铝酸盐荧光体	299
7.6.7	钨酸盐荧光体	303
7.6.8	硼酸盐荧光体	304
7.6.9	钒酸盐荧光体	306
7.6.10	$Y_2O_3 : Eu$ 和其他荧光体	307
7.7	高压汞灯用发光材料	310
7.7.1	发展历史和现状	310
7.7.2	对发光材料性能的要求	311
7.7.3	氟锆酸镁和磷酸镁	311
7.7.4	磷酸铈镁锡	312
7.7.5	钒酸钇铈和钒磷酸钇铈	313
7.7.6	硅酸钇铈	314
7.7.7	铝酸钇铈	315
7.7.8	氟硅酸铈铈	316
7.8	弱光源	317
7.8.1	放射性发光材料	317
7.8.2	长时发光材料	318
7.9	白光发光二极管	321
7.9.1	白光发光二极管的基本原理和光能转换	322
7.9.2	蓝芯片-荧光体白光 LED 器件的结构和制造工艺	323
7.9.3	白光发光二极管用荧光体	323
7.9.4	Ce^{3+} 激活的稀土石榴石体系	325
7.9.5	Eu^{2+} 激活的氟硅酸镁铈钙体系	326
7.9.6	Eu^{2+} 激活的碱土焦硅酸盐	327
7.9.7	Eu^{2+} 激活的蓝色荧光体和红色荧光体	328

7.10 展望	329
参考文献	330
第8章 显示技术	336
8.1 阴极射线发光	340
8.1.1 真空阴极射线发光	340
8.1.2 固态阴极射线发光	359
8.2 光致发光等离子体显示	367
8.2.1 工作原理	367
8.2.2 PDP中采用的发光材料	368
8.3 注入发光	369
8.3.1 发光二极管	369
8.3.2 双极注入复合发光	379
8.4 电致发光	388
8.4.1 无机粉末型电致发光(EL)材料和显示器件	388
8.4.2 无机薄膜电致发光(EL)材料和显示器件	425
8.5 矩阵多像元显示的驱动及控制	443
8.5.1 字符显示	444
8.5.2 矩阵显示屏的控制与驱动	446
8.5.3 大屏幕电视	455
8.5.4 集成化显示显像	461
参考文献	462
第9章 发光在探测中的应用	466
9.1 前言	468
9.2 X射线和物质的作用	468
9.3 医学X射线影像探测	470
9.3.1 X射线荧光屏	470
9.3.2 X射线影像增强管	471
9.3.3 X射线增感屏	473
9.4 X射线发光材料	477
9.4.1 钨酸钙	477
9.4.2 硫化锌镉	478
9.4.3 氟卤化钡	479
9.4.4 溴氧化镧	481
9.4.5 硫氧化稀土类	482
9.4.6 稀土钽酸盐类	482
9.4.7 小结和展望	484
9.5 计算X射线影像	484
9.5.1 小结和展望	489
9.6 X射线无损检测	490
9.6.1 发光玻璃	491

9.7 热释光剂量探测	493
9.7.1 热释光原理	494
9.7.2 热释光材料及性质	502
9.8 电离辐射荧光探测	513
9.8.1 无机闪烁体	514
9.8.2 陶瓷闪烁体	531
9.8.3 有机闪烁体	533
9.8.4 新型闪烁体展望	535
参考文献	536
第10章 主要发光材料	541
10.1 基质	543
10.1.1 I A-VII A 族化合物	543
10.1.2 II A-VI A 族化合物	545
10.1.3 II B-VI A 族化合物	546
10.1.4 III A-V A 族化合物	549
10.1.5 (Al, Ga, In) (P, As)	550
10.1.6 GaN, SiC 发光	551
10.1.7 三元及多元化合物	552
10.1.8 氧化物和含氧酸盐	555
10.1.9 有机化合物发光	560
10.2 发光中心	561
10.2.1 ns^2 型离子发光中心	561
10.2.2 过渡金属离子发光中心	561
10.2.3 镧系金属离子发光中心	564
10.2.4 复合离子发光中心	583
参考文献	585
第11章 发光材料的制备	591
11.1 原材料的制备和提纯	592
11.1.1 高纯硫化锌/镉的制备	593
11.1.2 高纯磷酸氢钙的制备	594
11.1.3 高纯二氧化硅的制备	594
11.1.4 高纯氧化铝的制备	595
11.1.5 高纯钨酸的制备	595
11.1.6 单一稀土元素氧化物的提纯	595
11.1.7 高纯五氧化二钒的制备	597
11.1.8 高纯硫的制备	597
11.2 发光材料粉体的制备	597
11.2.1 原料的选择和配比	598
11.2.2 高温固相反应制备发光材料	599
11.2.3 高温固相反应的设备	601

11.2.4	粉体粒度的控制	601
11.2.5	粉体粒度的测定	602
11.3	其他高温制备发光材料粉体的方法	603
11.3.1	喷雾热解法	604
11.3.2	燃烧法	607
11.3.3	微波辅助加热法	609
11.4	溶液法制备发光材料	611
11.4.1	沉淀法	611
11.4.2	水热法	613
11.4.3	溶胶-凝胶法	614
11.5	纳米发光材料的制备	616
11.5.1	纳米半导体发光材料	617
11.5.2	纳米掺杂化合物发光材料制备	619
11.5.3	发光玻璃制备	620
11.6	发光材料的优化和新发光材料的探索	621
	参考文献	623
第 12 章	发光材料的表征及测量技术	626
12.1	光致荧光光谱的测量	627
12.1.1	光致荧光光谱测量的预备知识	627
12.1.2	照度计法测荧光粉的相对亮度	630
12.1.3	照度计法测紧凑型荧光灯 (CFL) 总光通量	632
12.1.4	CFL 的 SPD 测量	634
12.1.5	荧光粉 SPD 的测量	636
12.1.6	WLED 光色参数的测量	637
12.2	时间分辨	637
12.3	形貌测量	640
12.3.1	粒度分析	640
12.3.2	光学显微镜	642
12.3.3	电子显微镜 (EM 或 TEM)	642
12.3.4	扫描电子显微镜 (SEM)	644
12.3.5	近场光学显微镜	645
12.3.6	扫描隧道显微镜 (STM) 和原子力显微镜 (AFM)	646
	参考文献	647
第 13 章	视觉与颜色	648
13.1	视觉	649
13.1.1	视觉及其形成过程	649
13.1.2	明视觉、暗视觉和介视觉	649
13.2	颜色及 CIE 表色系统	650
13.2.1	三基色原理及基本概念	650
13.2.2	RGB 表色系统	651

13.2.3	CIE 的 XYZ 表色系统	652
13.2.4	均匀色空间	656
13.2.5	色差及其计算公式	657
13.2.6	CIE 标准光源	659
13.3	色温、相关色温和光色	661
13.3.1	黑体辐射定律	661
13.3.2	非黑体辐射	662
13.3.3	色温和相关色温	662
13.3.4	光色	664
13.4	显色指数	664
	参考文献	665
第 14 章	发光分析	666
14.1	荧光分析法的原理及应用	669
14.1.1	荧光分析法的基本原理	669
14.1.2	荧光分析仪器	670
14.1.3	荧光测量技术	671
14.1.4	背景信号	673
14.1.5	荧光定量分析的各种条件	674
14.1.6	环境中有害成分的荧光分析	675
14.1.7	食物及头发中有害成分的荧光测定	677
14.2	稀土元素发光分析	678
14.2.1	稀土简单离子的荧光分析法	678
14.2.2	稀土有机络合物的荧光光度法	679
14.2.3	稀土元素荧光分析中的新方法新技术	684
14.2.4	稀土结晶磷光体发光分析法	689
14.3	化学(生物)发光原理及其应用	692
14.3.1	化学发光分析法的基本原理	692
14.3.2	主要化学发光体系	696
14.3.3	电化学发光	703
14.3.4	化学发光免疫分析	708
14.3.5	化学发光分析在环境检测中的应用	712
14.3.6	化学发光技术在生物医学领域的应用	716
14.3.7	化学发光传感器	719
	参考文献	722
第 15 章	同步辐射原理与应用简介	734
15.1	前言	735
15.2	同步辐射原理	735
15.2.1	同步辐射基本原理	735
15.2.2	同步辐射装置:电子储存环	736
15.2.3	同步辐射装置:光束线、实验站	740

15.2.4 第四代同步辐射光源.....	740
15.3 同步辐射应用研究.....	743
15.3.1 概述.....	743
15.3.2 真空紫外光谱.....	744
15.3.3 X射线吸收精细结构.....	745
15.3.4 在生命科学研究中的应用.....	747
15.3.5 同步辐射的工业应用.....	747
15.3.6 第四代同步辐射光源的应用.....	749
15.4 结束语.....	750
参考文献.....	750
索引	752

第 1 章 发光的定义及分类

目录

1.1 发光的定义	2
1.2 发光的分类	3
1.2.1 光致发光	3
1.2.2 电致发光	3
1.2.3 阴极射线发光	3
1.2.4 X 射线及高能粒子发光	3
1.2.5 化学发光	4
1.2.6 生物发光	4
参考文献	4