

# 发光学与发光材料

徐叙瑑 苏勉曾 主编



化学工业出版社  
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

发光学与发光材料/徐叙瑑, 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

徐叙瑑 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        |                                     | 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                                              |
|        |                | 苏勉曾        |                                     | 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<br>唐明道 |                                     | 深圳市罗湖区翠竹北新港鸿东湖阁 402 室 518020<br>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<br>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<br>刘薦康                          | 长春市延安大路同德路 光机物理所 8 区 18 栋 601 室 130021<br>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<br>蔡汝秀 14. 2<br>陈朗星 14. 3 | 天津南开大学化学学院 300071<br>武汉大学化学学院 430072<br>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        |                                     | 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                                  |
|        |                | 张新夷        |                                     | 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        | 元 光                                                                        | 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               |
|       |            |            |         |            |                                                                            | 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 征<br>滕 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<br>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<br>李述体 |                                                                            | 广州市石牌华南师范大学光电子学院 510631<br>广州市石牌华南师范大学光电子学院 510631 |
|       |            | 8.3.2      |         | 华玉林        |                                                                            | 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              |
|       | 第 4 节(8.4) | 8.4.1      |         | 周连祥        |                                                                            | 长春市朝阳区同德路光机物理所 8 区 17 栋 1 门 401 室 130021           |
|       |            | 8.4.2      | 8.4.2.1 | 钟国柱        |                                                                            | 长春市延安大路 1 号 中科院长春光机物理所第 8 区 130021                 |
|       |            |            | 8.4.2.2 | 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芯能级，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、 $\gamma$  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。

徐叙瑗 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 | $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}$ 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  | 氟锆酸镁和砷酸镁 .....                                  | 311 |
| 7.7.4  | 磷酸锶镁锡 .....                                     | 312 |
| 7.7.5  | 钒酸钇铈和钒磷酸钇铈 .....                                | 313 |
| 7.7.6  | 硅酸钇铈铽 .....                                     | 314 |
| 7.7.7  | 铝酸钇铽 .....                                      | 315 |
| 7.7.8  | 氯硅酸锶铈 .....                                     | 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  | $\text{Ce}^{3+}$ 激活的稀土石榴石体系 .....               | 325 |
| 7.9.5  | $\text{Eu}^{2+}$ 激活的氯硅酸镁铈钙体系 .....              | 326 |
| 7.9.6  | $\text{Eu}^{2+}$ 激活的碱土焦硅酸盐 .....                | 327 |
| 7.9.7  | $\text{Eu}^{2+}$ 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 矩阵多像素显示的驱动及控制          | 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 稀土钨酸盐类               | 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 |
| <b>第 10 章 主要发光材料</b> .....     | 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 |
| <b>第 11 章 发光材料的制备</b> .....    | 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 |