

国家科普知识重点图书

高新技术科普丛书

# 发光材料与 显示技术



徐叙瑛

主编

化学工业出版社



国家科普知识重点图书

高新技术科普丛书

# 发光材料与显示技术

徐叙琰 主编

化学工业出版社

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

发光材料与显示技术/徐叙珩主编. —北京:化学工业出版社, 2003.1

高新技术科普丛书

ISBN 7-5025-4321-X

I. 发… II. 徐… III. ①发光材料-普及读物  
②显示-普及读物 IV. ①TB39-49②TN27-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 099685 号

---

高新技术科普丛书  
发光材料与显示技术  
徐叙珩 主编

总策划: 陈逢阳 周伟斌

责任编辑: 朱 彤

责任校对: 陶燕华

封面设计: 于 兵

\*

化学工业出版社出版发行  
(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  
北京云浩印刷有限责任公司印刷  
三河市东柳装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 7½ 字数 194 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4321-X/TQ·1662

定 价: 18.00 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

## 《高新技术科普丛书》编委会

### 主任

路甬祥 中国科学院院长，中国科学院院士，  
中国工程院院士

### 委员

汪家鼎 清华大学教授，中国科学院院士  
闵恩泽 中国石油化工集团公司石油化工科学研究院教授，  
中国科学院院士，中国工程院院士  
袁 权 中国科学院大连化学物理研究所研究员，  
中国科学院院士  
朱清时 中国科学技术大学教授，中国科学院院士  
孙优贤 浙江大学教授，中国工程院院士  
张立德 中国科学院固体物理研究所研究员  
徐静安 上海化工研究院（教授级）高级工程师  
冯孝庭 西南化工研究设计院（教授级）高级工程师

## 序

数万年来，人类一直在了解、开发、利用我们周围的自然界，同时不断地认识着自身，科学技术也从一开始就随着人类的生存需求而产生和发展着。人类发展史充分验证了邓小平“科学技术是第一生产力”的论断。科学技术的发展，促进了人类文明和社会的发展。

21世纪是信息时代，21世纪是生命科技的世纪，21世纪是新材料和先进制造技术迅速发展和广泛应用的世纪，21世纪是高效、洁净和安全利用新能源的世纪，21世纪是人类向空间、海洋、地球内部不断拓展的世纪，21世纪是自然科学发生重大变革、取得突破性进展的世纪。科学技术的发展、新技术的不断涌现，必将引起新的产业革命，对我国这样的发展中国家来说，既是挑战，也是机遇，而能否抓住发展机遇，关键在于提高全民族的科学文化水平，造就一支具有科学精神、懂得科学方法、具有知识创新和技术创新能力的高素质劳动者队伍。所以，发展教育和普及科学知识、弘扬科学精神、提倡科学方法是我们应对世纪挑战的首要策略。为此，1999年8月，江总书记在视察中国科学院大连化学物理研究所时进一步强调了科普工作的重要性：“在加强科技进步和创新的同时，我们应该大力加强全社会的科学普及工作，努力提高全民族的科学文化素质。这项工作做好了，就可以为科技进步和创新提供广泛的群众基础。”

为了普及和推广高新技术，化学工业出版社组织几位两院院士和专家编写了《高新技术科普丛书》。本套丛书的特点是：介绍当今科学产业中的一些高新技术原理、特点、重要地位、应用及产业化的现状与发展前景；突出“新”，介绍的新技术、新理论和新方法不仅经实践证明是成熟、可靠的，而且是有应用前景的实用技术；力求深入浅出，图文并茂，知识性、科学性与通俗性、可读性及趣味性的统一，并充分体现科学思想和科学精神对开拓创新的重

要作用。

《高新技术科普丛书》涉及与我国经济和社会可持续发展密切相关的高新技术，第一批9个分册包括绿色化学与化工、基因工程技术、纳米技术、高效环境友好的发电方式——燃料电池、最新分离技术（如超临界流体萃取、吸附分离技术、膜技术）、化学激光、生物农药等。本套丛书以后还将陆续组织出版多种高新技术分册。相信该套科普丛书对宣传普及科技知识、科学方法和科学精神，正确地理解、掌握科学，提高全民族的素质将会起到积极的作用。

洛有祥

2000年9月

## 前 言

人类的生活,每一天都离不开光线,太阳光是最伟大的自然光,从远古以来,人类就是在阳光的照耀下进行生产与生活的。随着人类社会的进步,只有白天才有的太阳光已经不能满足人类生活及生产的需要,于是人们就致力于创造人造光。最早的人造光源是火,后来爱迪生发明的白炽灯是利用加热而不是燃烧来获得人造光的。到目前为止,白炽灯仍然是广泛应用的一种照明工具。但是,利用白炽灯这样的加热方法制造光源并不理想:一方面,这种方法制造的光源的光谱与人们已经习惯的太阳光光谱偏差很大;另一方面,利用加热产生光的方法是靠光源材料的所有原子的热振动产生的发射,因而发射效率很低。

非常幸运的是,人们发现并发明了“冷光”,它不是利用加热产生的发射,只是物质在吸收能量后,这些能量以辐射的形式释放出来,因此产生所谓的发光。这种辐射不需要加热物质就可以产生,所以也叫“冷光”。人们生产活动及日常生活已经离不开发光。作为照明的光源,如日光灯、节能灯的照明替我们驱走了黑暗,给我们创造了工作及生活的舒适环境,提高了工效,方便了生活。发光是很多显示技术得以实现的根本,当我们希望了解国内外的新闻,希望通过公共媒体获得各种信息及娱乐时,我们可以从电视机上看到生动的画面;还可以借助信息高速公路了解各方面的动态。在上下信息高速公路时我们离不开显示器。在具有核辐射的条件下,还可以用探测器了解辐射强度及剂量。在医院里 X 光透视是经常使用的检验手段。机场和车站上航班、车次的指示,时钟、路标、电子秤、验钞机等都是日常生活中的常见设备。所有这些都是根据发光原理制成的。在此基础上施加特殊条件产生的激光,已成为一种光学高新技术的依据。

当代发光本身又有了既广泛又深入的发展。微腔结构可以控制

发光强度及颜色。多孔硅发光展示了光电集成的可能。有机场致发光吸引了众多研究者探索新的显示技术。量子剪裁有可能提供无汞荧光灯或者提高等离子体显示的发光效率。交叉发光能快速、有效地探测核辐射。新的发光材料,包括低维的量子阱、超晶格、纳米材料及各种形式、成分的材料,提供了新的发光性能。另外在研究方法上也有了很大进展,如可测  $10^{-15}$  秒的时间分辨技术,突破光学鉴别极限的近场光学显微镜等。

通常形容要像“保护眼睛一样”保护你最重要的事情,但是眼睛能看见又必须有光,而发光是除去阳光、白炽灯光之外的重要光源。发光的重要性就可想而知了。本书由 10 章组成,主要介绍发光的产生、性质及应用以及与此相关的显示技术。其中,第 1、2 章主要由徐叙琰院士与刘舒曼博士编写;第 2 章中的第 3 节由楼立人教授编写;第 3 章第 4 节由黄世华教授编写,其他部分由徐叙琰院士、刘舒曼博士及冀国蕊同志共同编写;第 4 章的第 1 节由徐征博士编写,第 2 节由邓振波教授编写,第 3 节由滕枫博士编写;第 5 章第 1、3 节由滕枫博士编写,第 2 节由邓振波教授编写;第 6 章第 2 节由黄世华教授编写,其他部分由王永生教授与梁春军博士编写;第 7 章由何大伟博士编写;第 8 章由王吉有博士编写;第 9 章由由芳田博士编写;第 10 章由滕枫博士编写。虽然参与编写的人员在各自的相关领域有丰富的经验,但是本书的编写还是存在许多问题:首先由于我们缺少写作科普文章的经验,本书的语言和表达方式可能过于专业化了,望广大读者原谅;其次,发光学及发光材料所涉及的领域非常广泛,本书并没有包括发光领域的所有现象及应用,而只是介绍了其中最常见的一些方面。由于本书编写人员的水平有限,成稿时间仓促,难免存在错误和不足之处,恳请广大读者斧正。

中国科学院院士:

徐叙琰



2002 年 11 月



## 内 容 提 要

发光材料正在日益走进人们的生活，其研究、开发和应用正日益受到人们的重视；荧光照明、彩色电视、计算机等与显示技术和发光有关的技术也已成为人们须臾不能离开的技术。本书介绍了发光材料与显示技术的基本概念和知识，对与工业、农业、医药等领域有关的发光材料和显示技术进行了较详尽的介绍，它对于发光材料与显示技术行业有指导性作用。

本书是一部科普读物，主要供管理人员、科技人员和在校大学生、研究生及教师阅读。

# 目 录

<b>第 1 章 光——世界因此而绚丽多彩</b> .....	1
1.1 光在我们生活中的作用 .....	1
1.1.1 取之不尽的能量 .....	1
1.1.2 信息的载体 .....	3
1.1.3 生命之源 .....	4
1.2 光的物理性质 .....	5
1.2.1 光的本质——波粒二象性 .....	5
1.2.2 光的波长及颜色 .....	7
1.2.3 光的传播 .....	9
1.2.4 光与物质的相互作用 .....	15
1.3 怎样观察到光? .....	18
<b>第 2 章 人造光——发光</b> .....	21
2.1 发光学中的物理常识 .....	26
2.1.1 表征发光特性的几个物理量 .....	26
2.1.2 发光光谱 .....	28
2.1.3 发光过程中的能量衰减 .....	30
2.1.4 发光过程中的能量输运 .....	31
2.2 物理发光 .....	31
2.2.1 气体放电发光 .....	31
2.2.2 液体发光 .....	33
2.2.3 固体发光 .....	34
2.3 化学发光与生物发光 .....	40
<b>第 3 章 固体材料的光致发光</b> .....	46
3.1 固体的吸收、激发和发射光谱 .....	46
3.1.1 吸收光谱 .....	46
3.1.2 激发光谱 .....	47
3.1.3 发射光谱 .....	49

3.1.4	斯托克斯规则 .....	50
3.2	由加热产生的发光——热释发光 .....	51
3.3	长余辉发光 .....	52
3.4	上转换发光及量子剪裁 .....	53
3.4.1	上转换发光 .....	53
3.4.2	量子剪裁 .....	56
<b>第4章</b>	<b>以发光材料为基础的显示技术 .....</b>	<b>61</b>
4.1	真空电子束激发发光显示技术 .....	61
4.1.1	引言 .....	61
4.1.2	CRT彩色显像管 .....	61
4.1.3	VFD低压荧光管 .....	69
4.1.4	场发射(FED)显示技术 .....	73
4.2	电致发光 .....	76
4.2.1	引言 .....	76
4.2.2	无机电致发光 .....	78
4.2.3	发光层材料 .....	88
4.2.4	结型发光——发光二极管 .....	91
4.2.5	有机电致发光 .....	94
4.3	等离子显示器(PDP) .....	122
4.3.1	PDP概况 .....	122
4.3.2	PDP技术原理 .....	123
4.3.3	PDP优缺点 .....	124
<b>第5章</b>	<b>其他显示技术 .....</b>	<b>126</b>
5.1	引言 .....	126
5.2	液晶显示器 .....	126
5.2.1	什么是液晶 .....	127
5.2.2	液晶显示器的结构 .....	127
5.3	电子纸显示技术 .....	132
5.3.1	电子油墨——电子纸显示的核心 .....	133
5.3.2	塑料薄膜晶体管——新一代的驱动方式 .....	135
<b>第6章</b>	<b>光子存储技术 .....</b>	<b>137</b>
6.1	光致变色存储 .....	139
6.2	光谱烧孔存储 .....	144

6.3	电子俘获光存储 .....	148
6.3.1	电子俘获光存储原理 .....	148
6.3.2	电子俘获光存储材料 .....	150
6.4	光折变存储 .....	152
6.4.1	全息图的记录与再现 .....	152
6.4.2	光折变效应 .....	153
6.4.3	光折变存储 .....	155
<b>第7章</b>	<b>发光与照明 .....</b>	<b>157</b>
<b>第8章</b>	<b>发光物理中的一些前沿技术 .....</b>	<b>165</b>
8.1	低维发光体系的发光 .....	165
8.1.1	半导体低维体系的发光 .....	165
8.1.2	多孔硅——从不发光到发光 .....	168
8.1.3	纳米发光材料——颜色可调的发光半导体 .....	174
8.2	光学微腔发光 .....	178
8.2.1	微腔的特性 .....	179
8.2.2	“回音壁模式”型微盘腔 .....	182
8.2.3	微球腔 .....	182
8.2.4	变形微腔 .....	183
8.2.5	光学微腔的应用展望 .....	183
<b>第9章</b>	<b>常用发光材料及其制备方法 .....</b>	<b>185</b>
9.1	粉末发光材料的制备 .....	186
9.2	薄膜制备 .....	193
9.3	单晶的制备 .....	197
9.4	有机发光材料 .....	202
9.4.1	有机小分子发光材料 .....	202
9.4.2	金属配合物 .....	206
9.4.3	高分子聚合物 .....	207
<b>第10章</b>	<b>发光在分析中的应用 .....</b>	<b>212</b>
10.1	利用发光进行的分析 .....	212
10.2	荧光分析在化学分析中的应用 .....	213
10.2.1	无机物的荧光分析 .....	213
10.2.2	有机化合物的荧光分析方法 .....	216
10.2.3	化学发光分析 .....	218

10.3 发光分析在生物分析中的应用 .....	219
10.3.1 发光在生物化学中的应用 .....	219
10.3.2 发光分析在疾病检测方面的应用 .....	222
主要参考文献 .....	224

# 第 1 章 光——世界因此而绚丽多彩

试想，宇宙中没有了光，我们生活的星球将是什么样？地球上几乎所有的物质都可存放，惟独光来去匆匆。到目前为止，人类除了把光能转化为其他能量存储起来以外，还无法直接有效地存储光。因而，千百年来人们一直在问：光从哪里来，又到哪里去？所幸的是，科学发展到今天，人类已经对其赖以生存的光进行了比较深入的研究，得到了一些令人满意的答案，并利用光为我们的生活带来了前所未有的变革。例如，各种类型的光源使人们的活动不再限制于“日出而作，日落而息”，光通讯使信息的传输速率增加了几个数量级，各种显示器使人们与无形的信息有了更亲密的接触等。

任何人恐怕都很难全面、透彻地回答光到底有哪些功能，它对我们的影响到底有多大？本书将只在发光材料与显示技术这一光学的分支进行叙述，希望借此窥其一斑。

## 1.1 光在我们生活中的作用

总的来说，光在能源、信息和生命科学领域中起着举足轻重的作用，下面给出的实例或许可以说明这一点。

### 1.1.1 取之不尽的能源

人类的生活、生产都离不开能源，重要的能源有水、煤炭、石油、原子能及太阳能等，其中水、煤和石油称为常规能源，由于超量的开发使用，其存储量正在剧减，越来越无法满足人们日益增长的需求。

据统计表明，自 20 世纪以来，全世界淡水用量增长了约 8 倍。如今，世界淡水年平均用量仍在增加，淡水资源的人均占有量减少约 20%，而每年全世界淡水总量的 14% 已被污染，因此寻找水源

和节约用水成为当务之急。煤炭直接用于能源时的污染是十分严重的，其烟尘可占总排放量的 73%，二氧化硫、二氧化碳、氧化氮等都占很大比例。石油是重要的化工原料，但用作能源时也有污染，城市中汽车的尾气就是急需消除的污染源。煤和石油的利用，除受环保要求的限制之外，其资源储量也有用尽之时。核能的和平利用在西方发达国家已有发展，其中美国建立了 110 座核电站，为数最多，但从核能发电占全国发电总量的百分比来看，应首推法国，其核能发电占总发电量的 78%。不过，核电站的一个最大隐患是放射性物质一旦发生泄漏，它的污染将造成重大事故，遗害无穷。前苏联乌克兰的切尔诺贝利核电站的核泄漏事故就是一个十分惨痛的实例。

众所周知，太阳是没有污染的能源，而且取之不尽。最简单的利用太阳能的方式就是用太阳能电池将太阳的光能变成电能。太阳能电池可以用低成本的单晶硅、非晶硅制造，只是效率低些，现在大部分计算器的电源就是这类太阳能电池。另外，用 II ~ VI 族半导体制造的太阳能电池效率高，但成本也高，一般镶嵌在人造卫星的大面积展翼上，用来截取太阳光，使它变成电，供给人造卫星的需要。美国还制造了一种利用太阳能电池的双翼式飞机，它不需要化学燃料，只靠几百个太阳能电池，就可以长时间停留在空中，有的甚至可以放飞几个月。其他如海水淡化，煤、油开采，核能启动等无不需要电力，因此无污染的电力能源就更显得重要，如果将来有一天所有这些电能都可取自太阳，即取自无污染的光，那么我们的地球也许会成为美丽的花园。

那么为什么目前人们还没有大量地使用光转换成的电能呢？我们先看一些数据：为得到 1000W 的电力，火电的投资要 2000 ~ 3000 元，水电需 4000 元，核电需 8500 元，而用太阳能发电则需投资 25000 元，这显然过于昂贵，必须降低成本。据统计，太阳能电池在全球市场上的销售额每年增长 25%，销量的增长将会使太阳能电池发电的成本有所下降。有英国科学家预计，英国太阳能电池发电所提供的电量到 2010 年将可与煤炭、石油和天然气所提供

的电量相竞争，由此可见，全球化地利用太阳能发电也指日可待。

如果真的实现太阳能发电的普及，那么太阳能什么时候会用完呢？实际上，太阳的质量至少是地球的 330420 倍，进一步想像，它的质量将达  $2 \times 10^{30}$  kg。如果按爱因斯坦关于能量质量的关系： $mc^2 = E$ （ $m$  是质量， $E$  是可以转换成的能量），可以估算出太阳每秒钟发射的能量所相当的质量大约是每秒  $5 \times 10^9$  kg，落到地球的能量只相当于每秒钟 2kg。这就是我们将太阳光称之为“取之不尽的能源”的原因。太阳光转换为电能的本质是光电转换，其物理机制和器件构成将在以后有关章节中介绍。

### 1.1.2 信息的载体

这里我们想举一个光传递信息的例子。1994 年发生了一个奇特的自然景观，就是彗星对木星的撞击。我们知道木星很大，是太阳系中最大的一颗行星，离地球有 7.7 亿公里远。而另外一组彗星共 21 块，似一串明珠，它们是 1993 年 3 月 25 日由美国天文学家尤金·苏梅克和他的妻子卡罗琳·苏梅克及代维·列维在天文观测中发现的。彗星飞向木星的速度大约是 21 万公里/h，第一块彗星撞击木星表面发生在北京时间 1994 年 7 月 17 日凌晨 4 时 15 分，最后一块的撞击则发生在北京时间 1994 年 7 月 22 日下午 4 时，历时 5 天。由相撞释放出的总能量相当于 40 兆吨的 TNT 炸药爆炸时产生的能量，而瞬时达到的温度接近  $3 \times 10^4$  °C，这个撞击能量大于在地球上所有核弹爆炸的能量。撞击时，像原子弹爆炸时那样，产生参天的蘑菇云，并在木星表面上留下如地球大小的黑色的痕迹，排成一串洼坑。即便如此，当时对地球却没有什麼影响，因为木星远在 7.7 亿公里之外。可那里发生的事情，我们又如何知道呢？原来是靠撞击时发出的光传来的信息。

虽然这是一个罕见的实例，但是光传递的信息早已深入到我们的日常生活中了。今天，人们对电话是再熟悉不过了，无论是固定电话还是手机，都是用话筒将声音变成强弱变化的信号，传至对方后，又利用听筒将这个变化中的信号变成声音，只是二者的信息载体分别是电流和电磁波而已。用电磁波传送信息的还有电视，每个



像素的强弱及颜色信号以电磁波的形式传出，接收器收到这些信号后，按原样变回，这最后一步是靠显像管及伴音系统完成的。电流或电磁波传递信息与邮递员传递信件的最大差别是邮递员只是传送，完全不知道书信、函件、邮包内的内容，而电流或电磁波既是邮递员，又是信息本身；既像邮递员一样把信息送出去，同时又靠它本身的变化把信息的特征表现出来，这样就构筑了近代通讯的基本框架。在 20 世纪末期，人们开始用光来代替上述电流或电磁波传递信息，结果使信息容量至少增大了  $10^3$  倍，因此有人把 21 世纪称为光信息时代，又称为“太拉年代”。“太拉”表示  $10^{12}$ ，是译音 (Tera)，它的含义是信息量传输达到  $10^{12}$  bit/s，“比特 (bit)”表示两个值 0 或 1 中的一个。如果计算机处理能力达到  $10^{12}$  次/s，那么信息存储容量也可达到  $10^{12}$  bit。电话中除了有清晰的声音外，如果还有逼真的图像，那么“天涯若比邻”将不再只是古人的美好愿望了。

### 1.1.3 生命之源

光的作用远远不限于传递信息及提供能源，回过头来看，不难发现它还是生命的创造者。

我们知道大气中氧气大约占 1/5，所有动物和人一刻也不能离开它。若按全球人口 60 亿计算，这些人在一年内呼出的二氧化碳就可达到 16000 亿公斤之多，加上几百万年以前，二氧化碳就已开始了它的积累，同时人和动物一直在吸入空气中的氧，照这种情况估计，到如今，在空气中应该一点氧也没有了，但事实却并非如此。经科学分析可知，氧气在空气中的含量始终平稳地保持在 21% 的水平，而二氧化碳在空气中的含量却只有 0.03%。为什么会这样呢？这是因为地球上存在植物。植物的绿叶中含有叶绿素，它可以吸收太阳光中的红光及橙光，而反射绿光，使得叶片发绿，同时借助被吸收的红光及橙光的能量，可以分解从空气中吸入的二氧化碳，留下碳作为营养，把氧气还给空气，这个过程称为光合作用。光合作用正好和人与其他动物的呼吸过程相反，二者形成一个闭合的良性循环。显然，光合作用得以实现的不可缺少的重要