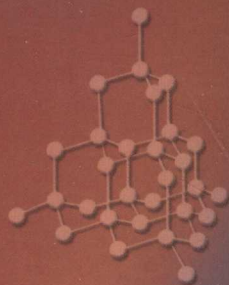


色彩



与微观世界

金增瑗

编著

5

化学工业出版社

化学与应用化学出版中心

色彩与微观世界

金增瑗 编著



化学工业出版社
化学与应用化学出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

色彩与微观世界/金增瑗编著. —北京:化学工业出版社, 2004. 8
ISBN 7-5025-6017-3

I. 色… II. 金… III. 色彩学-关系-物质结构
IV. 0552.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 080197 号

色彩与微观世界

金增瑗 编著

责任编辑: 成荣霞 孙绥中

责任校对: 顾淑云 吴 静

封面设计: 郑小红

* * *

化学工业出版社出版发行
化学与应用化学出版中心

(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

中国纺织出版社印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 8 $\frac{3}{4}$ 字数 231 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6017-3/O · 61

定 价: 19.00 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

序

早在 1687 年，牛顿在《自然哲学的数学原理》中说：“当我第一次看见由色散实验产生的鲜明的强烈的七种光色时，我真感到极大的愉快。”几百年来，色彩的本质是什么？各类物质的颜色产生的机理是什么？这一具体的、生动的问题一直吸引着无数热爱科学的人们，更有许许多多的科学家为研究相关问题做出了卓越的贡献。

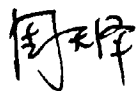
色彩创造了美，但并不局限于单纯的美。在科技高速发展的今天，当我们陶醉于大自然的鬼斧神工之时，是否还想到：绿叶与光盘刻录有什么联系？染料与激光如何相关？从有机色素为什么能开发出消炎抗癌药物？稀土元素是怎样为颜色的更加绚丽做出不可磨灭的贡献？液晶、等离子体显示，各种光敏信息材料、智能材料的开发和应用是如何使传统意义上的“色素”插上时代的翅膀……从物质微观结构出发，我们对这一切都能找到答案。

《色彩与微观世界》一书首次系统地、全方位地讨论了颜色这一自然美学的基本问题与物质微观结构理论之间的关系。作者把对结构化学的深刻理解，融合在对五光十色自然现象的细致观察与精辟分析之中；将抽象的化学键理论，紧密联系到喜闻乐见的色彩实例上；把高科技领域内无机色素、有机色素的神奇功能与贡献，用通俗的语言形象地描述出来；更将自己数十年从事高等师范教育、科学研究的经验，渗入到提高青年一代知识水平与科学素养的事业中，使读者从中感悟到科学的伟大和美学的魅力。

化学工业出版社组织出版这本《色彩与微观世界》，为广大渴望探讨各类物质颜色产生机理的读者提供了一本深入浅出、知识内容十分丰富的读物，为从事科学教育的教师们汇集了大自然和

高新技术领域许许多多生动的资料，将会对全社会科学精神的弘扬和科学意识的提高起到积极的推动作用。

“赤橙黄绿青蓝紫，谁持彩练当空舞？”让我们扬起世纪的风帆，舞动时代的彩练，用色彩去创造更美好的世界。

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Guo Yanzhong' (郭彦忠), written in a cursive style.

2004 年初夏于北京

前 言

颜色为我们营造了五彩缤纷的世界，颜色使大自然和人类生活美不胜收。颜色不仅是大千世界浩繁又有趣的内容，而且近年来色彩化学已经成为色彩科学的一个分支。传统的色彩应用包括染料合成与纤维染色、印刷油墨、食品与化妆品着色等；在高新技术领域中，利用有机色素在不同结构状态下的变色性能、可逆与不可逆变化，得到信息记录材料、光敏及热敏变色材料、超高密度存储材料以及太阳能光电转换物质。色彩化学的重要性得到了前所未有的重视。

颜色是物质的基本属性之一，是物质微观结构的宏观表现。物质的一切性质都来源于其特有的微观结构，即结构决定性能，性能反映结构。围绕颜色这一广泛又生动的话题，本书以化学键理论为主导，以物质结构为主线，列举大量实例，从宇宙奇观的产生，宝石幽雅神采的变换，食品、化妆品中的色素，到人体、动植物的色彩奥秘；从金属、合金的颜色机理，到稀土元素及其化合物对染色、颜料的特殊贡献；从光合作用与绿色能源，颜料、涂料的结构对环境 and 人体健康的影响，到染料激光、彩喷打印、液晶与等离子体显示原理及应用……通过深入浅出的阐述，既把难以理解的化学键理论、原子分子结构与无数引人入胜的具体实例密切结合起来，同时又将看似普通的颜色现象归结出深刻的微观结构根源。

大学已有许多经典的课程，但是还需要大量有特色的、与时俱进的新颖课程。作者在首都师范大学化学系开设“色彩与物质结构”选修课九年，同时还面对全校学生开设了相关内容的公共选修课，课程内容吸引了越来越多的学生。多年的教学效果证明，

本课程不仅使学生对物质的本质有了更深刻的理解，而且开阔了视野，更为将来从事中学教学积累了广博的知识，对提高师范生的科学素养和综合素质起到了非常重要的作用，深受学生欢迎。现将讲稿整理成书，希望通过本书的出版，使更多的读者受益。

本书的编写和出版得到了化学工业出版社资深编辑王仁杰先生的关心和指导，首都师范大学教务处高素兰老师也给予了热情帮助，何强、龚妍、王志伟等参加了部分插图的制作，在此一并表示感谢。由于作者水平有限，书中难免存在错误及不妥之处，恳请广大读者批评指正。

金增瑗

2004年7月

内 容 提 要

本书以物质结构为主线、融合多学科知识，深入浅出地列举了大量日常生活中的实例，全面剖析了色彩与物质微观结构的关系。全书共九章，讲述了颜色的基本理论，色散、散射、干涉、衍射等光学现象的色彩与物质结构状态的关系；多种宝石矿物、金属、半导体、绝缘体、有机色素颜色现象和呈色机理；颜色理论在食品、化妆品、颜料、涂料、材料、艺术品、彩色电视中的应用。

全书内容丰富多彩，取材新颖广泛，可作为高等院校选修课教材、结构化学辅导读物、中学化学教师教学参考；还可供从事于颜色相关领域的科研人员以及对色彩感兴趣的其他社会人士参阅。

目 录

1 颜色的基本理论	1
1.1 光与颜色	1
1.1.1 可见光的特性	1
1.1.2 视觉的特性	7
1.1.3 视觉的有机化学	10
1.1.4 光与物体的相互作用	13
1.1.5 物体的颜色	16
1.1.6 互补色原理在化妆品中的应用	19
1.2 色度学基础	19
1.2.1 颜色的三要素	19
1.2.2 色度图与色调配比	20
1.2.3 三基色原理及应用	25
2 物质的结构状态与光学颜色	28
2.1 光的色散与相关的颜色	28
2.1.1 光的色散	28
2.1.2 色散与物质结构、化学键的关系	33
2.1.3 折射率与钻石异彩	34
2.1.4 折射色散与露珠、彩虹	35
2.1.5 星光闪烁	36
2.2 光的散射与相关的颜色	36
2.2.1 不均匀介质与光的散射	36
2.2.2 散射与微粒结构的关系	38
2.2.3 大气散射与蓝天、白云	40
2.2.4 散射程度与太阳的颜色	41
2.2.5 散射结构与鸟类蓝色的羽毛	42
2.2.6 人体中的丁达尔蓝效应	43

2.2.7	宝石中的散射效应	44
2.3	光的干涉、衍射与相关的颜色	45
2.3.1	干涉、衍射基本原理	45
2.3.2	衍射与物质结构的关系	47
2.3.3	单层薄膜干涉产生的颜色	49
2.3.4	多层薄膜干涉产生的颜色	51
2.3.5	彩色珍珠	52
2.3.6	多彩的欧泊	52
2.3.7	宝石中的“猫眼效应”	55
2.3.8	光盘的彩晕	55
2.3.9	蛇表皮的虹彩色	55
3	原子的结构状态与简单激发产生的颜色	57
3.1	白炽与物体发光	57
3.1.1	黑体辐射与色温	57
3.1.2	白炽与白炽光源	60
3.1.3	彩色拍摄中的色温调节	62
3.2	原子中简单激发产生的颜色	63
3.2.1	原子结构与原子光谱	63
3.2.2	气体放电与霓虹灯颜色	65
3.2.3	元素的特征焰色与烟花	66
3.3	原子激发与宇宙中的颜色现象	67
3.3.1	太阳光谱中的 Fraunhofer 谱线	67
3.3.2	太阳色球与日冕	69
3.3.3	太阳风与极光	69
4	分子的结构状态与振动-转动能级跃迁产生的颜色	72
4.1	分子结构与分子光谱	72
4.1.1	分子结构概论	72
4.1.2	分子光谱简介	73
4.1.3	分子光谱项与跃迁选率	76
4.2	振动-转动能级跃迁与相关的颜色	77
4.2.1	氢键与水 and 冰的结构	77

4.2.2	大量水与大块冰的颜色	78
4.2.3	小分子的振动与绿柱石的颜色	80
4.2.4	卤素的颜色	81
4.2.5	荧光与磷光	82
4.2.6	荧光颜料	83
4.2.7	萤火虫的发光机理	84
5	配合物与过渡金属化合物的颜色	87
5.1	配位场效应与宝石、矿物的颜色	88
5.1.1	配合物的紫外-可见吸收光谱的特点	88
5.1.2	刚玉 (Al_2O_3) 中的键连与红宝石的颜色	89
5.1.3	红宝石的发热与发光	93
5.1.4	配位键强度变化与祖母绿的颜色	94
5.1.5	祖母绿的发热与发光	95
5.1.6	特殊的配位场强度与奇妙的变石	95
5.1.7	红宝石、祖母绿的二向色性与变石效应	96
5.1.8	影响配位键强度的因素及相关颜色的变化	98
5.1.9	湿度计与变色温度计	100
5.2	电荷转移与光化学氧化-还原作用产生的颜色	101
5.2.1	异核电荷转移与蓝宝石的颜色	101
5.2.2	同核电荷转移与普鲁士蓝的颜色	104
5.2.3	光化学氧化-还原反应产生的颜色	105
5.2.4	其他类型的电荷转移与相关物质的颜色	105
5.2.5	自色与别色过渡金属化合物的颜色	107
5.2.6	稀土元素及其化合物的颜色	109
5.2.7	稀土化合物与玻璃的颜色	111
5.2.8	稀土化合物与陶瓷的颜色	112
5.3	红宝石、蓝宝石和祖母绿的鉴定与优化	113
5.3.1	红宝石的鉴定与优化	114
5.3.2	其他红色宝石	115
5.3.3	蓝宝石的鉴定与优化	116
5.3.4	其他蓝色宝石	118
5.3.5	祖母绿的鉴定与优化	119

5.3.6 其他绿色宝石	120
6 有机物的结构与颜色	123
6.1 离域 π 键与有机色素的结构特点、类型及相关颜色	123
6.1.1 有机色素的结构特点及其紫外-可见吸收光谱	123
6.1.2 天然有机色素	125
6.1.3 有机色素的主要结构类型及颜色	129
6.2 染料的结构、性能与应用	135
6.2.1 染料与染色	135
6.2.2 稀土元素在染色中的应用	144
6.2.3 染料激光与激光染料	145
6.3 有机色素的应用及发展前景	149
6.3.1 叶绿素——光合作用的关键色素	149
6.3.2 具有消炎、抗癌作用的有机色素	153
6.3.3 有机太阳能电池	155
6.3.4 有机色素与激光打印	156
6.3.5 彩色喷墨与升华打印	157
6.3.6 有机色素与光盘刻录	158
7 金属的结构与金属、绝缘体、半导体的颜色	163
7.1 金属键与金属的颜色	163
7.1.1 金属键与能带理论简介	163
7.1.2 金属的高吸收与高反射率	167
7.1.3 常见金属的典型结构形式	168
7.1.4 金属的态密度图与金属的颜色	170
7.1.5 黄金及其多种合金的颜色	173
7.1.6 具有类金属外观的物质的颜色	175
7.2 绝缘体与半导体的颜色	176
7.2.1 能带间隙与绝缘体、半导体的颜色	176
7.2.2 彩色金刚石	178
8 晶体结构与色心产生的颜色	181
8.1 晶体结构与晶体缺陷	181

8.1.1	晶体的点阵结构与晶体缺陷	181
8.1.2	离子晶体中的 Frenkel 缺陷与 Schrötky 缺陷	183
8.2	色心与某些晶体的颜色	186
8.2.1	色心产生颜色的机理	186
8.2.2	烟晶和紫晶	189
8.2.3	色心在宝石改良中的应用	192
9	颜色理论的应用	195
9.1	食品的颜色与变化	195
9.1.1	天然食品的固有色素	195
9.1.2	不同条件下食品颜色的变化	201
9.1.3	天然食用色素的种类和结构	207
9.1.4	人工合成食用色素的种类和结构	209
9.1.5	人工合成食用色素可能的不良影响	211
9.1.6	食品护色剂作用原理及其对健康的影响	212
9.2	化妆品中色素的结构、特性和应用	215
9.2.1	天然动植物色素	216
9.2.2	无机色素	217
9.2.3	有机色素	219
9.2.4	珠光颜料	222
9.3	颜料、涂料与环境	223
9.3.1	颜料的类型与结构	223
9.3.2	环境污染与颜料变质	225
9.3.3	颜料与健康	227
9.3.4	涂料与环境	229
9.4	热、光、电致变色的原理与应用	231
9.4.1	热致可逆变色与不可逆变色	231
9.4.2	热敏变色材料	234
9.4.3	光致可逆变色与不可逆变色	235
9.4.4	光敏变色材料	238
9.4.5	电致变色材料	240
9.4.6	压致变色与彩色复印	242
9.5	光化学与艺术品保护	244

9.5.1	光化学反应的特点	244
9.5.2	有机染料的光致褪色	245
9.5.3	无机颜料的粉化和变色	246
9.5.4	纤维的光照变质	246
9.5.5	艺术品保护	247
9.6	彩色电视原理	248
9.6.1	显像三基色的选择	248
9.6.2	彩色电视荧光粉	249
9.6.3	彩色图像的摄取与重现	250
9.6.4	高清晰度与数字化彩电	253
9.6.5	液晶显示原理与材料	254
9.6.6	等离子体显示原理与材料	261
参考文献		264

1 颜色的基本理论

颜色这一话题古老而神秘，颜色产生的原因精巧又奇妙，其中大部分是化学方面的原理。我们从分析物质的结构入手，从揭示化学键的本质出发，虽然不能以单独的一种看法解释颜色产生的一切起因，却能归纳出颜色产生的结构因素。一些颜色产生于几何光学与物理光学中的某些效应，但仔细研究它的起因，如果没有特殊的物质结构提供颜色形成的必要条件，还是不能发生相关的光学效应。我们探讨颜色理论，既可以更好地认识五彩缤纷的世界，去创造更美的色彩，又可以有效地治理环境，用颜色理论防止颜色消褪，实现对艺术品的保护，更需要开发、利用有机色素，在高科技领域创造人间奇迹。

1.1 光与颜色

1.1.1 可见光的特性

自然界是多姿多彩的。但是如果没有光，五彩缤纷的世界将变成一片黑暗，因此，颜色离不开光。

1.1.1.1 颜色的意义

颜色不仅直观地描述了物体的性质（例如，花儿是红色的）；还体现了光线的特征（例如，花儿有效地反射红光，而几乎能完全吸收其他颜色的光）；同时描述一组感觉（例如，人脑对花儿选择性的反射光，以特定的方式形成相应的感觉）；而花儿颜色的实质是花的内部含有能呈现红色的物质。

1.1.1.2 可见光的特性

对光的本质的认识，在历史上经历了几个阶段，从 Newton 的

“微粒说”，经过 Huggens 的“波动说”、Maxwell 的“电磁说”，直到 1905 年 Einstein 提出的“光子说”之后，才对光的本质逐渐有了较为完善的认识。

光是由光源中原子或分子的运动状态发生变化时辐射出来的，是由光源发出的一种辐射能。光是具有电磁波本质的物质，它既有波动性又有微粒性。光在传播过程中，主要表现出波动性，在与其他物质相互作用时，则主要显示微粒性。同无线电波一样，光波具有电磁波的一切特性。电磁波的频谱范围很宽，其中包括无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线和宇宙射线等。如图 1.1.1 所示，可见光在电磁波谱中只占很窄的区域。对于可见光以外人眼无法感知的不可见光射线，如紫外线、X 射线和 γ 射线，由于它们的频率比可见光高，光子能量也大，所以能引起强烈的化学作用、电作用和生物作用；红外线则因光子能量较小，不如紫外线活跃，因而对人体没有强烈的破坏作用，只使人体有热的感觉。

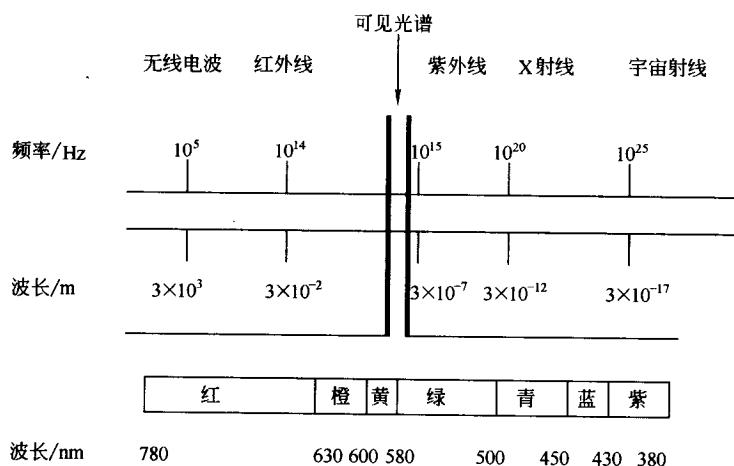


图 1.1.1 可见光在电磁波谱中的位置

太阳是最大的自然光源，光谱的范围很宽，包括可见光和不可见光。1665 年，牛顿把一束太阳辐射的光投射到三棱镜上，并

在棱镜后面放一张白纸作为屏幕，由于棱镜对光的折射作用，就会从靠近棱镜顶角的部分依次出现红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等七种颜色的光，牛顿称它为光谱。棱镜没有改变白光，只是将白光分解成简单的组成部分。这种把白光分解为彩色光带的现象叫做色散。经色散形成的光再射到另一棱镜时便不再分解。不能分解的光叫做单色光，即只具有单一波长的光。如果适当放置光学透镜，也可以将上述几种单色光合成为白光。由两种或两种以上单色光合成的光叫做复色光。显然，白光是复色光。牛顿的太阳光实验，使颜色学说脱离了主观印象而走上与客观事实相联系的科学的发展道路。

20 世纪初，一方面从光的干涉、衍射、偏振以及运动物体的光学现象确证了光是电磁波，而另一方面又从热辐射、光电效应、光压现象以及光的化学作用等无可怀疑地证明了光的微粒性。在光学现象中波动性与微粒性的对立统一就是自然辩证法的一种表现。

当可见光中不同波长的光被物质选择性吸收时，则产生物质的颜色。通常，物质由分子构成，分子由原子构成，原子核外电子按不同的能级分层排布。不同的原子电子层结构不同，不同的物质基态与激发态的能量差也不同，因而可能吸收不同波长（不同能量）的光子，实现从基态到激发态的跃迁，这是物质的分子或离子选择性吸收光的原因。

1.1.1.3 光见度函数 $\Phi(\lambda)$

人眼对不同波长的光，具有不同的视觉灵敏度；不同人的眼睛对各种波长的光的灵敏度也有差别。根据对许多正常人眼睛的研究，求出对各种波长的平均相对灵敏度，称表征此平均相对灵敏度的函数为光见度函数，以 $\Phi(\lambda)$ 表示。平均来说，人眼对波长为 555nm 的黄绿色光的视觉灵敏度最大，对红光和紫光相对较低，而对红外光与紫外光则无视觉反应。表 1.1.1 为人眼的光见度函数值。如果将人眼对波长为 555nm 的黄绿光的光见度函数取为 1，红外光与紫外光的光见度函数值则为零。或者说，为产生相