



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料结构分析基础

(第二版)

余 焜 主编

 科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料结构分析基础

(第二版)

余 焜 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍材料微观结构分析的基本原理、分析仪器与分析方法。全书分两大部分:基础理论与分析方法。第一部分讲述与材料结构分析有关的物理学基础和材料学基础,包括光、电子、离子、原子、分子的性质,晶体结构与晶体衍射;第二部分介绍一些现代常用的材料分析仪器及其对材料成分、结构与形貌的分析方法,包括显微和衍射、光谱、能谱和质谱方法。

本书可作为高等院校材料科学与工程等专业的教材,也可作为有关科技工作者的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料结构分析基础/余焜主编. —2版. —北京:科学出版社,2010.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-03-027992-7

I. ①材… II. ①余… III. ①工程材料-结构性能-性能分析-高等学校-教材 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 113792 号

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>

化学工业出版社印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 6 月第 二 版 印张:28 1/4

2010 年 6 月第三次印刷 字数:670 000

印数:4 501—8 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

材料分析方法是材料科学的一个重要组成。人们通过长期的生产实践和科学实验,对各种材料结构的分析已经积累了相当丰富的知识,并使一系列重要的分析技术得以发展和完善。

现代分析仪器及其分析方法种类繁多。分析方法作为一种手段,原则上对于各种材料都是适用的,这是共性。但材料在不同的使用场合对分析的要求不完全一样,并且材料的使用和分析都涉及人,而人是有一定的知识面及工作条件的,这是材料分析中的个性问题。显然,对材料分析方法的全面理解,有助于研究者在一定的条件下,选择最恰当的方法来达到研究的目的。

材料结构的分析方法与近代物理密切相关,必须运用理论知识才能从仪器的图像显示得到有关材料内部的信息数据。学生在理论方面基础的差异,必然影响学生对微观分析认识的深度。但分析方法本身也有一定的独立性,故实际上并不要求每个学生必须在精通近代物理后才能掌握材料分析方法。

本书介绍的与材料分析有关的物理学基础,主要是光、电子、离子的物理基础,晶体学基础介绍有关的晶体学及其晶体衍射的基础。书中有关衍射理论的表述,没有使用倒易点阵的概念,但这不妨碍本书有关晶体衍射理论的完整性。为了理论表述上较为系统,本书不回避数学推导。

本书还介绍了一些常用的现代分析仪器及其基本的分析方法,包括显微和衍射方法,光谱、能谱和质谱方法。

学习的秘诀,在于学习者能够举一反三。本书内容较多,不可能也不需要都在课堂讲授。课堂讲授只要求阐明基本原理,介绍几种本专业常用的分析方法即可,其余内容可由学生根据自己的需要和兴趣自学。

近年来材料科学中数学(计算机)模拟受到了重视并取得了明显的进展。不过材料科学以实验为基础的特征丝毫没有改变。材料分析的教学必须重在实验,故有关材料分析方法的教材,应有配套的实验教材。

本书在第一版出版十年之后修订再版。这十年,国内大学与时俱进,教学发生了很大的变化,几乎所有的专业都在不断地扩大专业面,所以相对第一版,本书做了相当多的修改与扩充。

东南大学王仕勤、徐爱群、李凡老师负责编写了本书第6、7、8章。

由于编者的水平及时间所限,本书疏漏之处在所难免。编者热切盼望读者提出宝贵意见。读者在教学过程中若有疑惑,编者会尽力协助解答。

余 焜

yukun@seu.edu.cn

2010年2月

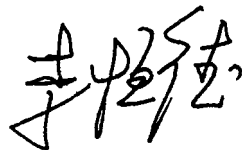
第一版序

余焜教授青年时期曾就读于清华大学工程物理系,毕业参加工作后又回到清华工物系做研究生。他的学位论文发表之后,曾在国际离子束材料表面改性学术界引起过一阵高度的赞扬,他的研究成果、图文、曲线等在当时一些综述评论和著作中得到不少引用。应当说,他在这一领域的实验研究中曾作过历史上的贡献,也显示出他本人的才华。我作为他的导师的确为他当年的成就感到欣慰和自豪,也从他身上感到师生之间的合作、互补和教学相长的这种愉快的关系。

他从1982年起到东南大学任教,现在根据他近20年来从事教学的体会写成了这本新书《材料结构分析基础》,将由科学出版社出版。我认为这是一件好事,并且对他能完成这一工作再次感到高兴。

他的这本书水平如何,能不能使广大读者从中得到较大的收获并受到他们的欢迎,当然只能由读者们来判断。我个人在粗读之后的感想是,余焜教授能够把研究材料的多种分析方法集中在一起开设为一门课程,由他自己一个人讲授了十几年,这是很可贵的。他的确在教学中积累了不少经验和体会,也形成了自己的独到见解,这些在他的这一著作中都有反映。这本书不到400页,企图使读者从基础理论到可见光、X光、电子束和离子束的多种分析方法都得到系统的知识,这至少是一次相当紧凑而独到的尝试。余焜教授在进行基础理论的论述中,也有一些独到的作法,有些人也许不一定同意,但这是体现他个人学术思维的尝试。我想,我们国内由自己撰写的有关材料科学的学术著作并不是太多了,而是太少了。在学术观点、侧重范围和处理方式上应该鼓励百家争鸣和百花齐放。

但愿我们能有许多多年从事科学研究和教学的材料科学家们共同努力,来繁荣我们材料科学的出版事业。



2000年6月

第一版前言

材料的性能是由其结构所决定的。描述或鉴定材料的结构,必定涉及它的化学成分,组成相的结构及其缺陷的组态,组成相的形貌、大小、分布以及各组成相之间的取向关系和界面状态等。所有这些特征都对材料的性能有着不同程度的影响。

因为材料结构和性能的因果关系,人们可以通过对材料性能的测试来认识材料的结构,包括各种物理的和化学的测试方法。其中,利用光束、电子束或其他粒子束与样品的相互作用,产生表征材料微观结构特征的各种信息,检测并处理这些信息,从而给出形貌、成分和结构的丰富资料,是材料结构分析的主要方法,也是本书讨论的范围。

材料分析方法是材料科学的一个重要组成。人们通过长期的生产实践和科学实验,对各种材料的结构分析方法已经积累了相当丰富的知识,并使一系列重要的分析技术得以发展和完善。

人们对微观世界的认识,显微镜起着十分重要的作用。显微镜在 18 世纪用于对金属材料的研究,以及物理化学的发展,直接导致材料科学的诞生。

1895 年发现 X 射线。仅在此后一年内,它就被广泛地应用在医学和工业探伤方面。在其后的 20 年间,X 射线衍射和光谱技术得到了完善的发展,可以相当精确地测定组成相的晶体结构和位向,以及判断其化学组成。

电子的发现,及随后电子光学的兴起,有力地推动了材料结构分析技术的发展。这主要是透射电子显微镜(TEM)、扫描电子显微镜(SEM)和电子探针(EMA),将人眼观察微观世界的尺度提高到微米,甚至纳米量级以上。

目前,高性能电子显微镜的分辨率已达到 0.2nm。此外,随着人们对材料表面或界面现象认识的深入,各种表面分析仪器和技术应运而生,例如低能电子衍射仪(LEED)、俄歇电子能谱仪(AES)、光电子能谱仪(ESCA)等。目前已能取得一至几个原子层范围内元素的类别、含量和表层原子排列结构等重要的资料。

事实上,任何一种技术在应用中都会存在这样或那样的局限性。因此,有关材料的结构,只能在不同的层次和不同侧面上进行描述。譬如说,眼睛看到的材料结构谓之宏观组织,人眼借助光学显微镜看到的则谓之光学显微组织,借助电子显微镜能看到极其细微的材料结构又谓之电子显微组织。它们都是材料结构在不同尺度下的表现形式。至于材料的化学成分,也就是材料的原子组成,则是表述分子、晶体层次上材料结构的重要内容。

现代分析仪器及其分析方法种类繁多。分析方法作为一种手段,原则上对于各种材料都是适用的,这是共性。但材料不同的使用场合对分析的要求不都一样,况且,材料的使用和分析都涉及人,而人是有一定的知识面及工作条件的,这是材料分析中的个性问题。显然,对材料分析方法的全面理解,有助于研究者在一定的条件下,选择最恰当的方法来达到研究的目的。

材料结构的分析方法与近代物理密切相关,必须运用理论知识才能从仪器的图像显

示得到有关材料内部的信息数据。学生在理论方面基础的差异,必然影响到学生对微观分析认识的深度。但分析方法本身也有一定的独立性,故实际上也不要求每个学生必须在精通近代物理后才能掌握材料分析方法。

本书分为两大部分:基础理论和分析方法。这样是为了理论表述上较为系统。如果学时安排比较少,理论部分的内容可供自学,课堂讲述可直接从第三章开始,结合各章内容补充一些必要的理论知识。

物理基础部分介绍与材料分析有关的物理学基础,主要是光、电子、离子的物理基础;晶体学基础介绍有关的晶体学及其晶体衍射的基础。本书有关晶体衍射理论的表述,没有使用倒易点阵的概念,但这没有妨碍本书有关晶体衍射理论的完整性。

分析方法部分介绍一些常用的现代分析仪器及其基本的分析方法,包括显微和衍射方法、光谱、能谱和质谱方法。

近年来材料学科中数学(计算机)模拟受到了重视并取得了明显的进展。不过材料科学以实验为基础的特征丝毫没有改变。材料分析的教学必须重在实验,故有关材料分析方法的内容实际上除了本书之外,还应有实验教材与之配套。本书讲述一般的分析方法,而有关分析仪器的具体构造,实验的具体操作,以及实验结果的具体分析,都需要实验教材的指导。东南大学的王仕勤老师,南京航空航天大学的陈敏老师,江苏理工大学的刘军老师协助参加了本书部分章节的编写工作。

由于编者的水平及时间所限,本书存在不少问题。今后,书中某些内容的进一步阐述,以及配合本书编写的实验教材和部分教学软件,将在网上公布,请读者注意网上信息。编者热切盼望读者提出宝贵意见。

网 址: <http://www.atc.seu.edu.cn>

电子邮件: atc@seu.edu.cn

编 者

2000年4月

目 录

第二版前言

第一版序

第一版前言

第 1 章 物理学基础	1
1.1 粒子与波	1
1.1.1 光与 X 射线	1
1.1.2 实物粒子	4
1.2 衍射与成像	5
1.2.1 概述	5
1.2.2 散射波叠加	5
1.2.3 缝、孔衍射	7
1.2.4 光栅衍射	9
1.2.5 透镜成像	15
1.3 原子结构与光谱	21
1.3.1 原子的壳层结构	21
1.3.2 原子的激发与电离	25
1.3.3 特征辐射	26
1.3.4 俄歇电子	29
1.3.5 核	30
1.4 分子结构与光谱	33
1.4.1 分子结构	33
1.4.2 分子振动能级与分子振动光谱	38
1.4.3 分子转动能级与分子转动光谱	39
1.4.4 分子轨道能级和分子电子光谱	40
1.4.5 分子光谱	41
1.5 光与物质的相互作用	42
1.5.1 概述	42
1.5.2 散射	43
1.5.3 原子散射因子	46
1.5.4 吸收与衰减	48
1.5.5 吸收体的物理效应	50
1.6 带电粒子在电磁场中的运动	51
1.6.1 带电粒子的电磁辐射	51

1.6.2 电磁场对带电粒子的作用	52
1.6.3 电子透镜	52
1.7 带电粒子与物质的相互作用	54
1.7.1 概述	54
1.7.2 带电粒子的射程	55
1.7.3 电子的相干散射	57
1.7.4 电子与物质的相互作用	59
1.7.5 离子与物质的相互作用	61
习题	62
第2章 固体结构	65
2.1 晶体	65
2.1.1 晶体的形成	65
2.1.2 晶体结构	66
2.2 晶体的对称性	68
2.2.1 对称的概念	68
2.2.2 晶体的宏观对称性	68
2.2.3 晶体的微观对称性	72
2.2.4 晶体结构的表示式	77
2.3 晶面与晶向	78
2.3.1 晶面指数与晶向指数	78
2.3.2 晶面间距、晶面夹角	80
2.3.3 晶带	83
2.4 晶体投影	84
2.4.1 球面投影	84
2.4.2 极射平面投影和乌氏网	85
2.4.3 标准投影图	89
2.5 晶体衍射理论(一)	90
2.5.1 晶体衍射的运动学理论	90
2.5.2 劳埃方程与布拉格方程	91
2.5.3 劳埃方程和布拉格方程的不确定性	94
2.5.4 薄晶体以及晶体表面的衍射	98
2.6 晶体衍射理论(二)	99
2.6.1 晶胞的衍射强度	99
2.6.2 单晶体的衍射强度	102
2.6.3 多晶体的衍射强度	104
2.6.4 温度因子	105
2.7 晶体缺陷和实际晶体	106
2.7.1 理想晶体和实际晶体	106

2.7.2 调制结构	106
2.8 准晶、非晶、胶体和液晶	107
2.8.1 准晶体	107
2.8.2 非晶体	107
2.8.3 胶体	109
2.8.4 液晶	111
2.9 材料结构分析	113
2.9.1 材料结构分析的概念	113
2.9.2 材料结构分析的方法	115
习题	117
第3章 光谱分析	119
3.1 光的检测与光谱仪	119
3.1.1 光的检测	119
3.1.2 光栅光谱仪	121
3.1.3 傅里叶变换	123
3.1.4 傅里叶射频波谱仪	124
3.1.5 傅里叶红外光谱仪	125
3.2 发射光谱分析	127
3.2.1 原子发射光谱仪	127
3.2.2 制样	129
3.2.3 原子发射光谱的谱线	130
3.2.4 原子发射光谱的分析方法	131
3.3 紫外-可见吸收光谱分析	135
3.3.1 紫外-可见吸收光谱仪	135
3.3.2 紫外吸收光谱	137
3.3.3 试样制备	142
3.3.4 分析应用	142
3.3.5 原子吸收光谱法	145
3.4 红外吸收光谱分析	148
3.4.1 基本原理	148
3.4.2 傅里叶红外吸收光谱仪	150
3.4.3 试样	151
3.4.4 红外光谱解析	152
3.4.5 红外光谱应用	157
3.4.6 拉曼散射光谱分析	159
3.5 核磁共振吸收波谱分析	161
3.5.1 基本原理	161
3.5.2 核磁共振波谱仪	161

3.5.3 试样	163
3.5.4 化学位移与自旋分裂	163
3.5.5 核磁共振氢谱及应用	168
3.5.6 ^{13}C 核磁共振	170
3.5.7 核磁共振成像原理	171
习题	171
第4章 质谱和色谱	173
4.1 离子的检测与质谱仪	173
4.1.1 离子检测器	173
4.1.2 磁偏转型质量分析器	174
4.1.3 四极杆质量分析器	175
4.2 质谱分析方法	176
4.2.1 质谱仪工作原理	176
4.2.2 质谱仪主要性能	179
4.2.3 质谱图及谱线的测量	179
4.2.4 有机质谱中的离子峰	180
4.2.5 有机化合物相对分子质量的测定	183
4.2.6 有机化合物定性分析	185
4.2.7 有机化合物的定量分析	188
4.2.8 有机质谱的应用	188
4.2.9 无机质谱分析方法	188
4.3 色谱	189
4.3.1 概述	189
4.3.2 气相色谱分析	191
4.3.3 气相色谱-质谱联用分析	197
4.3.4 高效液相色谱	200
4.3.5 平板色谱法	203
习题	205
第5章 X射线分析	206
5.1 X射线的检测与X射线谱仪	206
5.1.1 二维图像的记录	206
5.1.2 X射线光粒子计数器	206
5.1.3 X射线能谱仪	208
5.1.4 X射线分光计	210
5.1.5 单色器	213
5.2 X射线荧光谱分析	214
5.2.1 X射线荧光谱仪	214
5.2.2 X射线的二次激发	216

5.2.3	波谱图	217
5.2.4	荧光 X 射线定性分析	218
5.2.5	荧光 X 射线定量分析	219
5.2.6	能谱图与定性、定量分析	221
5.2.7	能谱仪和波谱仪的比较	221
5.3	粉末衍射分析	222
5.3.1	多晶体的 X 射线衍射强度	223
5.3.2	德拜法照相	224
5.3.3	粉末衍射仪	224
5.3.4	试样制备与扫描测试	228
5.3.5	衍射图谱	229
5.3.6	单相物质的晶型分析	234
5.3.7	物质的物相定性分析	236
5.3.8	物质的物相定量分析	239
5.3.9	点阵常数的精确测定	243
5.3.10	宏观应力分析	246
5.3.11	微晶尺寸和微观应力的测试	249
5.4	单晶衍射分析	250
5.4.1	劳埃法	250
5.4.2	旋转晶体法	254
5.5	多晶织构分析与针孔法	256
5.5.1	织构	256
5.5.2	织构的表示与多晶体极图	256
5.5.3	针孔法与多晶织构试样的衍射	257
5.5.4	织构的测定	259
习题		261
第 6 章	光学显微镜	263
6.1	像的观察与记录	263
6.2	光学金相显微分析	264
6.2.1	光学金相显微镜	264
6.2.2	显微镜光学性能	266
6.2.3	试样制备	269
6.2.4	显微镜观察方式	277
6.2.5	摄像	279
6.2.6	偏振光显微	280
6.2.7	相衬金相	282
6.2.8	显微硬度及其测定	285
6.3	定量金相	287

6.3.1	基本测量方法	288
6.3.2	定量金相的计算	289
6.3.3	计算机金相图像分析系统	292
6.4	低倍观察方法	292
6.4.1	概述	292
6.4.2	检验方法	293
6.4.3	体视显微镜	294
6.5	透射光学显微方法	294
6.5.1	复型	294
6.5.2	透射偏光显微镜	295
	习题	295
第7章	电子显微方法	297
7.1	电子像的观察和记录	297
7.2	透射电子显微镜	297
7.2.1	仪器构造	297
7.2.2	仪器性能	300
7.3	试样制备	302
7.3.1	粉末试样膜	302
7.3.2	试样复型	303
7.3.3	薄膜试样	304
7.4	成像方式	306
7.4.1	显微成像	306
7.4.2	衍射成像	307
7.5	电子衍射图像分析	309
7.5.1	电子衍射	309
7.5.2	电子衍射花样及其几何特征	311
7.5.3	多晶试样的物相鉴定及衍射花样指标化	313
7.5.4	单晶试样的物相鉴定及衍射花样指标化	314
7.5.5	选区电子衍射中图像相对于花样的磁转角标定	319
7.5.6	复杂衍射花样	320
7.5.7	菊池衍射花样	322
7.6	透射电子显微图像分析	324
7.6.1	柱体近似	324
7.6.2	非晶体试样质厚衬度成像原理	325
7.6.3	复型成像的衬度	325
7.6.4	复型浮雕图像分析	327
7.6.5	电镜放大倍数与点分辨本领的测定	327
7.6.6	晶体试样衍射衬度成像原理	327

7.6.7 双光束条件	329
7.6.8 理想晶体的衍射强度	331
7.6.9 缺陷晶体的衍射强度	333
7.6.10 堆积层错	334
7.6.11 位错	335
7.6.12 畴结构	336
7.6.13 第二相粒子	337
7.6.14 电子衍射运动学理论的局限性	338
7.6.15 薄晶体的高分辨像	338
7.7 低能电子衍射和低能电子显微镜	339
7.7.1 低能电子衍射分析	339
7.7.2 低能电子显微分析	340
习题	342
第8章 探针和扫描显微分析	344
8.1 电子的检测与能谱仪	344
8.1.1 电子检测器	344
8.1.2 电子能量分析器	345
8.1.3 离子能量分析器	347
8.2 电子探针与扫描电子显微分析	348
8.2.1 电子束轰击固体试样激发的物理信号	348
8.2.2 电子探针 X 射线显微分析仪	349
8.2.3 扫描电子显微镜的结构与工作原理	351
8.2.4 扫描电子显微镜的性能	354
8.2.5 试样制备	356
8.2.6 扫描图像分析	357
8.2.7 X 射线能谱分析	358
8.2.8 背散射电子衍射分析	358
8.2.9 电子探针与扫描电子显微镜的比较	360
8.2.10 其他电子显微分析技术	361
8.3 电子能谱分析	362
8.3.1 光电子能谱	362
8.3.2 俄歇电子能谱	367
8.4 离子束表面分析	371
8.4.1 离子散射谱	371
8.4.2 二次离子质谱	376
8.4.3 离子显微镜	380
8.4.4 场离子显微镜	381
8.5 激光探针显微分析	382

8.6 探针扫描显微分析	383
8.6.1 扫描隧道显微镜	383
8.6.2 原子力扫描显微镜	385
8.6.3 近场光学显微镜	386
习题	389
第9章 热分析	390
9.1 示差热分析法	390
9.1.1 示差热分析仪的工作原理	391
9.1.2 DTA 曲线的分析	393
9.1.3 差热分析测量的影响因素	398
9.2 示差扫描量热法	399
9.2.1 示差扫描量热仪的工作原理	399
9.2.2 DSC 曲线的分析	399
9.3 热重分析法	401
9.3.1 热重分析仪的工作原理	402
9.3.2 TG 曲线的分析	402
9.3.3 热重分析测量的影响因素	405
9.4 联用技术及其他	405
习题	408
参考文献	409
附录	410
I 一些元素常用的紫外、可见光谱线	410
II 元素的主要 K、L 系谱线的波长($\text{\AA}$)	413
III 化学元素 K、L 系主要谱线的光子能量(keV)	415
IV 元素的吸收限波长($\text{\AA}$)	419
V 元素对 X 射线的质量吸收系数(cm^2/g)	422
VI 原子散射因子	424
VII 原子散射因子修正值	427
VIII 一些物质的德拜温度	428
IX 多重性因子	428
X 立方晶体晶面(或晶向)夹角数值	428
XI 立方晶体标准投影图	430
XII 面心立方晶体电子衍射图谱	432
XIII 体心立方晶体电子衍射图谱	433
XIV 密排六方晶体电子衍射图谱	434
XV 常用材料分析方法名称及英文缩写	435

第 1 章 物理学基础

1.1 粒子与波

1.1.1 光与 X 射线

1. 电磁辐射

在光学中,广义的光的概念,除了可见光之外,还包括红外光和紫外光,以及 X 射线和 γ 射线(或称 X 光和 γ 光)。它们本质上都属于电磁辐射,表 1.1 给出各类电磁辐射的频率和波长范围。紫外光与 X 射线的波长没有明确的分界,X 射线和 γ 射线也没有明确的波长界线,因为人们并不是根据波长来区分紫外光、X 射线以及 γ 射线,而是根据它们的来源。

表 1.1 电磁辐射谱

辐射名称	辐射波长/m	光子能量/eV	产生
γ 射线	$1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-11}$	$1.2 \times 10^8 \sim 1.2 \times 10^5$	原子核能级跃迁
X 射线	$1 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^9 \sim 1.2 \times 10^2$	快速带电粒子能量变化 受激原子内层轨道电子能级跃迁
紫外光	$1 \times 10^{-8} \sim 0.39 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^2 \sim 3.2$	热辐射及原子或分子价电子能级跃迁
可见光	$0.39 \times 10^{-6} \sim 0.77 \times 10^{-6}$	$3.2 \sim 1.6$	
红外光	$0.77 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-3}$	$1.6 \sim 1.2 \times 10^{-3}$	热辐射及原子振动能级或分子转动能级跃迁
微波	$1 \times 10^{-3} \sim 1$	$1.2 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-6}$	电磁振荡 分子转动能级跃迁
射频波	$1 \sim 1 \times 10^4$	$1.2 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-10}$	电磁振荡 分子中未配对电子在外磁场中的自旋能级跃迁 具有磁性的原子核在外磁场中的进动能级跃迁

光的产生通常有两种形式:一是带电粒子速度变化引起的辐射,二是分子、原子或原子核能级跃迁引起的辐射。从微观机理来说,它们的共同之处都是微观系统从高的能量状态过渡到低的能量状态时伴随发生的物理现象。

辐射是一种从辐射源发出的以微粒或波动的形式向空间直线传播的能量。光辐射不是连续的波,而是分立的一串串波列,称为波包,就是所谓的光子。光子作为电磁辐射的能量载体,具有集中的能量、质量和动量。它们在空间呈“波状”分布,具有一定的波长、频率和位相。如此,显示了光子的波动性与粒子性的统一。

要特别指出的是光的波动性质并不归于光束整体,而是每一个光子都具有的本性。光子在传递的过程中以某种方式同时和所有的介质微粒相互作用,最终以特定的概率被

位于观察点的原子所接收。

单位时间内通过垂直于光传播方向的单位面积的光的能量称为光的强度,用 I 表示,单位是 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。对于单色光,光的强度常用单位时间内通过垂直于光传播方向的单位面积的光子数来表示,单位是光子数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

物理学中常用复数表示某个振动,如 $\psi = Ae^{i(\omega t + \phi)}$,要理解为只取用它的实数部分(或虚数部分)。其中 A 为实数,表示振幅, ω 表示频率, ϕ 表示位相。对于确定频率的振动, ωt 可略去不写,该振动简记作 $\psi = Ae^{i\phi}$,称为复振幅。光的强度与光的振幅平方成正比,即

$$I \propto |\psi|^2 = \psi^* \cdot \psi \quad (1.1)$$

真空中光速 $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。光子的能量 E 由普朗克公式给出,即

$$E = h\nu \quad (1.2)$$

式中, h 为普朗克常量, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; ν 为光的频率; λ 为光的波长。

在真空中

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hc\bar{\nu} \quad (1.3)$$

式中, $\bar{\nu}$ 为波数,即波长的倒数,意义是波传播单位长度所包含的波数。光通过不同的介质时,频率不会发生变化,但传播速度和波长会变化。

在普朗克公式的基础上,根据经典电磁理论的辐射压强,或根据相对论的原理得光子动量为

$$p = \frac{h}{\lambda} s = h\bar{\nu} s \quad (1.4)$$

式中, s 为单位矢量,代表波的传播方向。式(1.4)来自式(1.2),自然仅适用于光子,但德布罗意认为所有的微观粒子的性质与光的性质存在深刻的类似性,他把这个关系式推广到所有的粒子,起初只是一个假设,但实验证明这个推广是正确的,于是式(1.4)便成为普遍适用的德布罗意关系式。

2. 光谱

光谱就是光的频谱,用以描述不同频率光的强度分布。各种光的光谱基本上取决于光发射的方式及光所通过的介质。光谱常用相片、图线或表格等形式表示。光谱的自变量坐标为频率,也可标记为光的波长或光子的能量,对于这几种情况,往往分别称为频谱、波谱和能谱。

光如果在若干个特定波长处的辐射特别强或特别弱,那么,它的光谱特征是线状的,称为线状谱。如图 1.1 所示的荧光灯光谱,图中的纵坐标 $J = dI/d\lambda$,即单位波长范围内的光强。光如果由大量间隔很小的不同波长的辐射所组成,那么它的光谱特征是连续曲线状的,称为连续谱。如图 1.2 所示为钨丝灯光谱。