

半导体科学与技术丛书

半导体光谱 测试方法与技术

张永刚 顾 溢 马英杰 著



科学出版社

www.sciencep.com

半导体科学与技术丛书

半导体光谱测试 方法与技术

张永刚 顾 溢 马英杰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在回顾光谱学和光谱仪器的发展过程后,对半导体中涉及的主要光学过程以及半导体材料、器件及应用研究中需要哪些光谱分析手段和方法作了简要介绍,然后以分光(色散)和傅里叶变换两种方法为基础讨论了光谱分析的基本原理、测试仪器、关键部件、系统构成以及限制因素等,并结合一系列测量实例对吸收谱类、光电谱类和发射谱类测量方法与技术及相关细节进行了详细说明。此外,本书还对半导体研究中涉及的一些拓展的光谱分析方法(如拉曼光谱、微区光谱、扫描成像光谱、时间分辨瞬态光谱及调制光谱等)也结合实例进行了介绍。

本书可供从事半导体光谱分析的研究生、研究人员及工程技术人员阅读,也可作为其他涉及此领域人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

半导体光谱测试方法与技术/张永刚,顾溢,马英杰著. —北京:科学出版社, 2016

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-047222-9

I. ①半… II. ①张… ②顾… ③马… III. ①半导体—光谱分析
IV. ①O472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 013593 号

责任编辑: 鲁永芳 赵彦超 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 陈 敬

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>

北京信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 21 3/4 插页: 1

字数: 421 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问: 王守武 汤定元 王守觉

顾问: (按姓氏拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植
郑有蚪

主 编: 夏建白

副主 编: 陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委: (按姓氏拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣
张国义 赵元富 祝宁华

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动 21 世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

前 言

在半导体材料和器件的研究及生产中,光谱测量分析无疑是重要的手段与工具。对于刚刚涉及半导体光谱分析的研究生、研究人员及工程技术人员,他们已经有了物理学、半导体及工程技术方面的相关背景,具备了半导体材料、半导体器件、光学及光电子学方面的知识,有些已经阅读了很多相关的科技文献,对将要从事的工作有了基本了解,但在进入实验室开展工作时,面对很多并不熟悉的仪器设备仍会感到难以上手,对具体繁杂的测量方法及涉及的众多技术细节有时也会感到迷茫。这时如有一本以方法和技术为重点而非罗列公式和推导、叙述上深入浅出、通俗易懂,并且给出一些具体实例的半导体光谱测量方法与技术的书籍在手,可借此对该领域有一个全面了解并复习一下基本常识,对“新手上路”会有很大帮助;对于希望从光谱分析中获取有用信息并加以理解,但并不去实际操作光谱仪器的半导体材料和器件研究和生产人员,了解光谱分析的基本原理和不同方法的长处及限制因素也是必要的,这时会需要一本可供随手翻阅的技术参考书;当然,此书也可在具体操作人员遇到问题时作为辅助手册翻阅,由此获得启发。基于笔者在此方面的多年工作经验以及培训指导研究生过程中经常需要解答的问题,本书致力于将半导体光谱测试方法与技术方面的有用信息总结出来,侧重技术细节,并尽量增加有利于理解相关方法及其本质的描述等,以期对实际工作有所帮助,这就是本书的写作目的。有观点认为:“书中有了公式就会减少一半读者”,所以本书写作过程中大部分章节已尽量减少了复杂公式及推导,用易于理解的描述,侧重讲清基本原理,并给出一些数值概念。

从光谱学的发展过程可以看出,这个学科从一开始就不是独立存在的,其出现和发展都是为了解决某种问题,或者说是为了研究与光有相互作用的物质或物体以及光本身的特性,以便更好地理解乃至应用它们,这样的构架显然延续至今。光谱分析中使用这种或那种方法,或者将几种方法结合起来,当然也都取决于需要研究的具体对象以及需要解决的具体问题。因此,在半导体研究中涉及的众多光谱学方法,在很大程度上都是作为研究中的有效工具。这些工具可以用于什么样的对象、解决什么样的问题、有何长处及限制因素、一种工具可以用于哪几种物体以及对一种物体可以使用哪几种工具等,都是本书中会提及的。对于光谱学仪器,其进步与众多学科的发展密不可分,是其技术上的集大成者。光学、激光物理、光电子学以及集成电路和计算机等方面发展的最新成果很快会在新型号的仪器上体现出来,

以期达到最佳的性能及使用效果。一些目前在最先进的光谱学实验室中尚难以完成的测试功能及指标,也许十年后在新型号的商品仪器上就可以成为可选配置。虽然仪器的更新换代速度很快,但其沿用的往往仍是最基本的框架。因此,针对某种具体型号的仪器进行详细讲解并非是一个好办法。本书写作过程中已注意到此问题,力争讲清仪器的基本组成部件和功能,以及整体结构框架及其各部分的关联性。

本书分成三个部分。在第一部分(第1~3章)中首先简要回顾了光谱学、光谱仪器及相关测试方法的发展历史,并借以引出全书内容,对半导体中涉及的主要光学过程作了简单介绍,并讨论了半导体研究中需要哪些光谱学分析方法或具体的分析方法可解决哪一类问题。在第二部分(第4~8章)中以光谱分析中的两种基本方法即分光方法和傅里叶变换方法为线索进行展开,分别介绍了这两种方法的基本原理、测试仪器关键部件和系统构成以及方法的优缺点,在此基础上对采用这两种方法进行的三类基本谱类(即吸收谱类、光电谱类和发射谱类)的测量分析作了详细介绍,并结合一系列测量实例进行具体说明。在第三部分(第9~12章)中对半导体研究中涉及的一些拓展的光谱分析方法和功能(如拉曼光谱、微区光谱、扫描成像光谱、时间分辨瞬态光谱及调制光谱等)也结合实例进行了介绍。

本书第1章和第4~8章由张永刚执笔,第3章和第9、10章由顾溢执笔,第2章和第11、12章由马英杰执笔,张永刚负责全书统稿,马英杰负责插图录入整理,顾溢负责文字校对。本书内容中涉及的相关工作是在同事和研究生们的支持和协助下完成的,并得到了“973计划”(项目编号:2012CB619002、2014CB643002)、国家自然科学基金(项目编号:61275113、61204133、61334004、61405232)等一系列项目支持,在此一并表示感谢。

受笔者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者不吝指正。

张永刚

中国科学院上海微系统与信息技术研究所
信息功能材料国家重点实验室

2015年8月于上海

目 录

前言	
第 1 章 光谱学和光谱仪器的发展概况	1
1.1 引言	1
1.2 光谱学及其发展一瞥	2
1.3 光谱学仪器及测量方法发展简述	9
1.4 小结	14
参考文献	14
第 2 章 半导体中的光学过程	15
2.1 引言	15
2.2 半导体的基本光学参数	15
2.2.1 折射率和吸收系数	15
2.2.2 反射系数和透射系数	18
2.3 半导体中的光吸收	19
2.3.1 带间本征跃迁光吸收	20
2.3.2 其他类型光吸收	23
2.4 半导体的发光	26
2.4.1 辐射复合与非辐射复合	26
2.4.2 自发辐射与受激辐射	32
2.4.3 发光效率	34
2.5 半导体中的光散射	35
2.5.1 半导体中的光散射解释	35
2.5.2 拉曼散射与拉曼光谱	36
2.5.3 布里渊散射	37
2.6 小结	38
参考文献	39
第 3 章 半导体研究中的光谱测试需求	40
3.1 引言	40

3.2	半导体材料研究中的光谱测试需求	40
3.3	半导体器件研究中的光谱测试需求	43
3.4	应用研究中的光谱测试需求	46
3.5	小结	48
	参考文献	49
第 4 章	分光光谱仪的组成部件及测量系统	50
4.1	引言	50
4.2	分光元件	50
4.2.1	棱镜分光元件及光学材料的特性	50
4.2.2	光栅分光元件及其主要参数	54
4.2.3	其他类型的分光元件	59
4.3	光源	60
4.3.1	热光源	61
4.3.2	气体放电光源	64
4.3.3	同步辐射光源与自由电子激光器	70
4.3.4	激光光源	72
4.4	光电探测器	82
4.4.1	热辐射型探测器	84
4.4.2	量子型探测器	87
4.4.3	阵列型探测器	93
4.5	电子学部件及计算机	95
4.6	样品的冷却及温度控制装置	101
4.7	基于分光光谱仪的测量系统实例	105
4.8	小结	107
	参考文献	107
第 5 章	傅里叶变换光谱仪及其组成部件和测量系统	109
5.1	引言	109
5.2	迈克耳孙干涉仪与傅里叶变换光谱仪	109
5.3	傅里叶变换光谱仪的主要部件	119
5.3.1	分束器	119
5.3.2	光源	121
5.3.3	光电探测器	123

5.3.4 分束器、光源及光电探测器的组合搭配及外光路配置	129
5.4 电子学部件、计算机及样品冷却装置	132
5.5 小结	132
参考文献	133
第 6 章 透射、吸收与反射光谱测量方法及实例	134
6.1 引言	134
6.2 基于分光光谱仪的透射、吸收与反射光谱测量系统	134
6.3 分光法测量实例	139
6.4 基于傅里叶变换光谱仪的透射、吸收与反射光谱测量系统	141
6.5 傅里叶变换测量方法及实例	146
6.6 小结	157
参考文献	158
第 7 章 光电光谱测量方法及实例	160
7.1 引言	160
7.2 基于分光光谱仪的光电光谱测量系统	161
7.3 分光法光电光谱测量实例	163
7.4 基于傅里叶变换光谱仪的光电光谱测量系统	168
7.5 傅里叶变换光电光谱测量实例	170
7.6 宽光谱范围光电响应光谱的校正	174
7.7 小结	184
参考文献	184
第 8 章 发射光谱测量方法、实例及综合测量系统	186
8.1 引言	186
8.2 基于分光光谱仪的发射光谱测量系统	186
8.3 分光法发射光谱测量实例	192
8.4 基于傅里叶变换光谱仪的发射光谱测量系统及测量实例	203
8.5 傅里叶变换光谱综合测量系统的配置及实例	233
8.6 宽波数范围发射光谱的强度校正	238
8.7 小结	244
参考文献	245
第 9 章 拉曼光谱测量方法及实例	248
9.1 引言	248

9.2	拉曼光谱原理及应用对象	248
9.3	测试方法及仪器要求	250
9.4	测试实例及限制因素	254
9.4.1	利用拉曼光谱测试半导体材料组分	254
9.4.2	利用拉曼光谱测试半导体材料应力情况	257
9.4.3	利用拉曼光谱测试半导体材料掺杂情况	261
9.4.4	利用拉曼光谱测试半导体多层材料结构	263
9.5	小结	264
	参考文献	264
第 10 章	微区及扫描成像光谱测量方法及实例	266
10.1	引言	266
10.2	微区及扫描成像光谱应用对象	266
10.3	测试方法及仪器要求	267
10.4	测试实例及限制因素	269
10.4.1	微区光致发光谱	269
10.4.2	微区光致发光谱与显微 X 射线衍射的联用	270
10.4.3	微区拉曼光谱	271
10.4.4	扫描成像光致发光谱	273
10.4.5	扫描成像拉曼光谱	275
10.4.6	扫描成像电致发光谱	277
10.4.7	扫描成像时间分辨光致发光谱	278
10.5	小结	279
	参考文献	279
第 11 章	时间分辨光谱测量方法及实例	281
11.1	引言	281
11.2	时间分辨光谱的基本原理	282
11.3	基于时间相关单光子计数法的时间分辨光谱测量系统	287
11.3.1	系统结构与工作过程	287
11.3.2	仪器考虑和限制因素	288
11.4	基于泵浦-探测法的时间分辨光谱测量系统	289
11.4.1	系统结构与工作过程	289
11.4.2	仪器考虑和限制因素	293

11.5 基于条纹相机法的时间分辨光谱测量系统	294
11.5.1 系统结构与工作过程	294
11.5.2 仪器考虑和限制因素	297
11.6 半导体时间分辨光谱测试实例	298
11.6.1 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 多量子阱材料的光学性质研究	298
11.6.2 InMnAs 铁磁薄膜中的载流子弛豫时间研究	301
11.6.3 光子晶体纳米腔激光器的超快光谱测试	304
11.7 小结	306
参考文献	306
第 12 章 调制光谱测量方法及实例	308
12.1 引言	308
12.2 光调制反射光谱的测量原理	309
12.3 光调制反射光谱的测试系统搭建	312
12.3.1 基于光栅光谱仪的光调制反射光谱测试系统	312
12.3.2 基于 FTIR 光谱仪的光调制反射光谱测试系统	313
12.3.3 仪器考虑与限制因素	314
12.4 半导体光调制反射光谱应用实例	316
12.4.1 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ 单层薄膜材料的禁带宽度	316
12.4.2 GaSb 基中红外波段 II 型量子阱的能级结构	318
12.4.3 $\text{Ge}_x\text{Sn}_{1-x}$ 薄膜的直接跃迁特性	321
12.5 小结	325
参考文献	325
结束语	327
汉英对照索引	328
《半导体科学与技术丛书》已出版书目	333
彩图	

第 1 章 光谱学和光谱仪器的发展概况

1.1 引言

光谱学无疑是建立在光学基础之上的。中国古代观察到的一个与光谱有关的现象是金属冶炼过程中火焰颜色与温度的关系。早在战国时期的技术文献《考工记》中就有关于青铜冶炼过程的记载：“凡铸金之状，金与锡。黑浊之气竭，黄白次之，黄白之气竭，青白次之，青白之气竭，青气次之，然后可铸也。”这时的人们已经从经验的角度给出了观察掌握冶炼温度的步骤。同时期的墨子在《墨经》中对火焰颜色与温度的关系有了进一步的阐述：“火热，说在炖。”即可从火焰的颜色判断其温度，并对此作了进一步解释：“火谓火热也，非以火之热我有，若视日。”也就是说可以通过观察黑体辐射对应的光谱颜色来测定高温物体的温度，并由此推断出太阳必定是一个温度很高的物体。当然，人类从自然界中观察到的第一种连续光谱无疑应该是彩虹。关于彩虹这一自然现象，中国古代很早就有记载，殷商时期已有虹的象形文字，《周礼》中也有关于虹的记载。唐初孔颖达(574~648)在《礼记注疏·月令》中则指出“若云薄漏日，日照雨滴则虹生”；其后张志和(732~774)在《玄真子·涛之灵》中也指出“雨色映日而为虹”，并以“背日喷水”实验演示了小型人造彩虹。北宋沈括(1031~1095)在《梦溪笔谈》中提到了民间关于虹吸水的传说“世传虹能入溪涧饮水”，并进行了实地考察，观察验证了对于夕虹“自西望东则见，盖夕虹也。立涧之东西望，则为日所铄，都无所睹”的现象，并记录了与其同时代的孙彦先“虹乃雨中日影也，日照雨则有之”的解释，这些都已经对产生彩虹的原因有了相当正确的认识。

英文“spectrum”这个词始于牛顿(Isaac Newton, 1643~1727, 英国)。牛顿于1665年开始了其著名的太阳光谱分光实验，并于1671年发表了第一篇科学论文“光与颜色的新理论”，其中首先引入了这个词^[1]，开创了在实验观察基础之上的近代光谱学。当时牛顿28岁，是牛津大学的数学教授，其时中国是在清朝的康熙皇帝治下。牛顿启用这个词源于他在光谱实验中对两个棱镜做微小相对移动时观察到了彩色光带的跳动，这使其联想到了spectres，即鬼怪或幽灵，因此光谱学也可以说是一门从“幽灵”中产生的科学，当然词根spec本身也有看一看、瞧一瞧的意思。将

英文 spectrum 对应于书中的光谱一词始于何时尚不可考,但这个定义是很贴切的,并且显然与幽灵无关。《说文解字》曰:“光,明也。从火在人上,光明意也。”人类有了火才使漫漫长夜中有了光明。“谱,籍录也。”谱即登记录用之意,也就是按照事物的类别或顺序有系统地进行编排记录,家谱、年谱、棋谱、曲谱,以及对我们更重要的菜谱和食谱都是如此,此外还有色谱、质谱、能谱、极谱等。光谱就是按波长记录下来的光的特征,或者物质与光作用后的某种特征,并由此衍生出一系列光谱分析方法及光谱学(spectroscopy),发展出了各种光谱学仪器、部件以及相关的测试方法和技术,这些都是本书后面将要涉及的内容。

1.2 光谱学及其发展一瞥

众所周知,对于光已有波动(电磁振动、电磁波、电磁辐射)和粒子(光子、量子)两种描述方式。对于以光速 c 传播的光波,常以其波长 λ 作为基本特征,有时也采用波长的倒数即波数 ν 进行描述,并对应相应的波动频率 f ,三者之间关系为 $\lambda=c/f$ 及 $\nu=f/c$;对于光子则常以其具有的能量 $\varepsilon=h\nu$ 作为其基本特征, h 为普朗克常量,习惯上光子能量常用的计量单位则为电子伏特(eV)。当波长、波数、光子能量和频率分别以 μm 、 cm^{-1} 、eV 和 THz 计量时,四者之间有简单的数值关系,即

$$\varepsilon = \frac{\nu}{8065} = \frac{f}{242} = \frac{1.24}{\lambda} \quad \text{或} \quad \lambda = \frac{10000}{\nu} = \frac{300}{f} = \frac{1.24}{\varepsilon} \quad (1.1)$$

图 1.1 中直观地给出了四者之间在光谱学中最常涉及的一段电磁波谱范围内的对应关系,覆盖约 4 个量级范围。由以上关系可以看出,光子的波数和频率与其能量间均呈线性关系,而波长与能量间则有反比关系。在物理学特别是光谱学中采用哪种参数对光进行描述和计量,常与具体场合所涉及的物理本质相关,但也有一些约定俗成的因素。早期的光谱学研究是从人眼能看到的很小一段光谱范围开始的,即波长 380~700 nm 的可见光波段,尚在一个倍频程之内。目前已知的电磁波谱范围则要远大于图 1.1 中所示,其波长从小至 0.01 nm 的 γ 射线到大于 10 万公里的极长波无线电,涉及的范围已达到 19 个数量级,超过 60 个倍频程,并且在如此宽广的电磁波谱范围中均已进行过实验研究,很多特定的电磁波谱范围已经得到了广泛的利用。光谱学及其相关测试分析方法的研究,原则上也会涉及如此宽广的区域,但对半导体材料和器件的光谱分析而言,实际涉及的主要还是在图 1.1 中所示的范围之内。

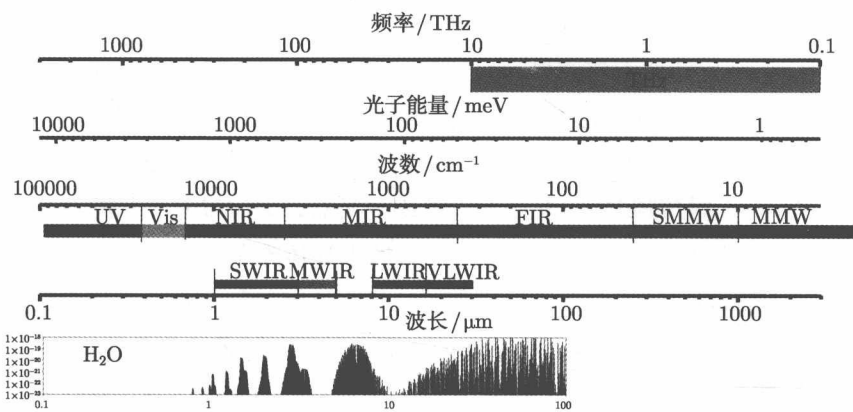


图 1.1 光的波长、波数、光子能量及频率之间的关系示意图以及半导体材料和器件光谱研究中常涉及的一些波段划分方式。包括：光谱学领域的紫外(UV)、可见(Vis)、近红外(NIR)、中红外(MIR)、远红外(FIR)、亚毫米波(SMMW)及毫米波(MMW)等；以及红外遥感领域常用的短波红外(SWIR)、中波红外(MWIR)、长波红外(LWIR)及超长波红外(VLWIR)等。覆盖远红外、亚毫米波及毫米波段的太赫兹(THz)波段也在图中右上角示出，左下角为红外波段的水汽吸收强度及大气窗口示意图

在如此宽广的电磁波谱范围中，光波或光子具有极其丰富的特性，但波长相差较远的光波其特性上会有很大差别，实际研究中一般很难采用相同的研究方法和手段，而对波长相近的光波则会采用相似或类同的研究方法和手段，因此从实际出发，有对整个电磁波谱范围进行波段细分的必要。现有的常见做法是根据其相似特性将波长或频率变化约一个量级或数个倍频程的某个电磁波谱范围划分为一个特定波段。仍以图 1.1 中半导体材料和器件研究常涉及的范围为例，在光谱学领域就常将其划分为紫外(UV, <380 nm)、可见(Vis, 380~700 nm)、近红外(NIR, 0.7~2.5 μm)、中红外(MIR, 2.5~25 μm)、远红外(FIR, 25~250 μm)、亚毫米波(SMMW, 0.25~1 mm)及毫米波(MMW, 1~10 mm)等。应该指出的是，这只是一种常用的划分方式，且在不同时期以及特定研究领域还有不同的划分方式，甚至所用名词上有时也会有互相矛盾的定义，即使采用以上划分方式，对其交界处也会有不同说法。在红外遥感和自由空间光通信等领域，由于涉及光在大气中的传播，而大气中的水汽吸收对光传播会有很大影响，因此需要尽量利用水汽吸收强度较小的波长范围，即使用所谓大气窗口波段，因此在此领域借用无线电广播里的短波、中波、长波和超长波波段的说法常将红外波段细分为短波红外(short-wave infrared, SWIR, 1~3 μm)、中波红外(mid-wave infrared, MWIR, 3~5 μm)、长波红外(long-wave infrared, LWIR, 8~14 μm)及超长波红外(very-long-wave infrared, VLWIR, 14~30 μm)波

段等，这些波段都涉及一至数个水汽吸收强度较低的区域，如中波红外和长波红外波段各对应一个连续的大气窗口，短波红外波段则对应四个较小的分立大气窗口，水汽吸收很强的 5~8 μm 波段则是被跳开的。光纤通信研究早期是在 850 nm 左右的波长上开展的，在这个波长上光纤损耗不是最低，但因为当时较成熟的光源是采用 GaAs/GaAlAs 材料制成的发光二极管或激光器，无法推到更长的波长；其后采用 InGaAsP/InP 材料体系发展了波长更长的半导体光源，使得光纤通信移至更长的 1.31 μm 和 1.55 μm 的低损耗和低色散波长，这时就把 1.31 μm 和 1.55 μm 称为长波长（long wavelength），而将早期的 850 nm 称为短波长（short wavelength），注意这里短波长和短波红外是不能混用的。在远红外、亚毫米波及毫米波段区域，频率为 0.1~10 THz 的范围被称为太赫兹波段，这个波段过去由于材料、器件以及相关方法和仪器等方面的困难在实际研究中较少涉及，但现在已有了长足的发展，并已在天文观测、通信及遥感传感等方面获得了应用。以上这些划分均已在图 1.1 中示意地给出，并包括了水汽吸收强度在红外波段按波长的分布情况。

气体对光的吸收是由其分子振动频率与入射光的频率产生共振使光子的能量转为振动能（热能）引起的，其常落于中红外波段的基频振动最强，泛频振动则在较短的波长上（频率间有近似整数倍关系）并逐渐减弱，这也是光谱学的一个分支领域，即所谓分子光谱学。图 1.2 中进一步给出了按波数或光子能量分布的水汽和二氧化碳在红外波段的吸收强度分布详细情况^[2]。表层大气中的二氧化碳的浓度是

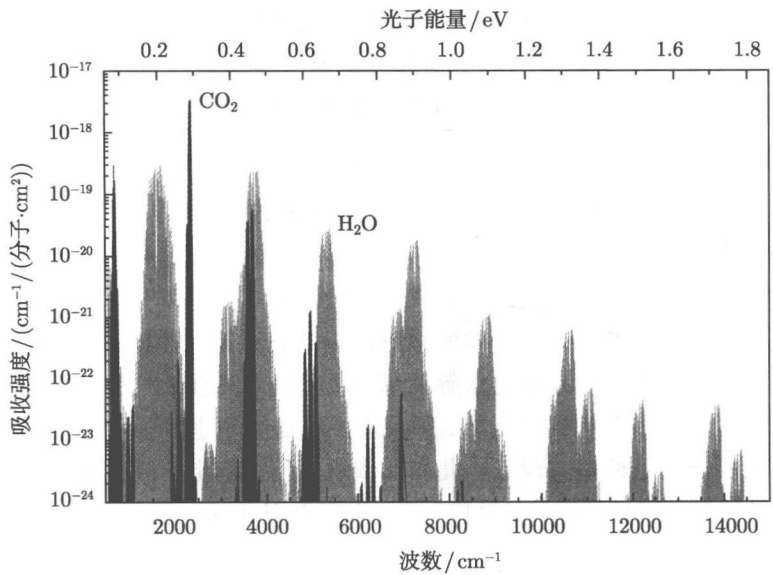


图 1.2 按波数或光子能量分布的水汽和二氧化碳在红外波段的吸收强度分布

基本恒定的, 20 世纪在约 360 ppm, 目前已逐渐增加到约 400 ppm; 水汽的浓度则根据地域气候和天气变化会有一个很大的变化范围, 在 0%~3%。由图 1.2 可见, 二氧化碳的基频吸收带在 2360 cm^{-1} ($4.24\text{ }\mu\text{m}$) 附近, 这个波长上的吸收强度是所有气体中最强的, 其泛频吸收强度则很快衰减; 水汽的吸收带要明显宽于二氧化碳, 衰减也较慢。大气中含量最高的氮气和氧气在红外波段均无吸收, 而除此之外的主要成分——水汽和二氧化碳则吸收强度很大, 因此常会对光谱分析产生显著影响, 且有不同特点, 二氧化碳吸收是“恒定”的, 但水汽吸收随环境变化较大, 这在后文中会有详细的分析, 并给出一些解决方法。

前文已提及, 近代光谱学研究始于牛顿, 正是他 1665 年采用玻璃棱镜对通过针孔的太阳光进行的著名分光实验开创了近代光谱学研究^[3]。中国古代和近代在几何光学研究方面是相当先进的, 遗憾的是近代在光谱学方面未见有所建树。在牛顿之后, 光谱学的研究停滞了一段时间, 时间已进入了 19 世纪。1800 年赫歇尔 (Friedrich Wilhelm Herschel, 1738~1822, 德国) 首次根据可见光谱的红光以外区域的热效应发现了红外光 (当时称为热线); 1803 年里特尔 (Johann Wilhelm Ritter, 1776~1810, 德国) 又根据可见光谱的紫光以外区域对银盐的强曝光作用, 发现了紫外线。这些发现将光谱研究推向了人眼可见的光谱范围之外。1802 年沃拉斯顿 (W. H. Wollaston, 1766~1828) 以及 1814 年弗朗霍夫 (Joseph von Fraunhofer, 1787~1826, 德国) 独立地采用狭缝代替针孔进行了与牛顿类似的实验, 在此之后光谱学有了较快的发展。采用狭缝代替针孔使得光谱实验更容易进行, 也有利于分析。弗朗霍夫还用对贴在玻璃上的金箔刻划出细线的方法制成了衍射光栅, 此类光栅现在仍是分光光谱仪中最重要的部件。狭缝和光栅的使用使得光谱研究的分辨率有了很大提高, 因此沃拉斯顿和弗朗霍夫都在太阳光谱中发现了许多狭窄的暗线, 这 576 条暗线现在仍被称为弗朗霍夫线。以弗朗霍夫命名的研究学会是德国最著名的应用科学研究组织, 下辖 60 余个研究所。基尔霍夫 (Gustav Robert Kirchhoff, 1824~1887, 德国) 首先指出了热物体发射的光呈连续光谱, 引入了黑体辐射概念。1859 年基尔霍夫对弗朗霍夫线给出了合理的解释, 认为太阳光谱的暗线是太阳内部的高温产生的连续辐射被太阳外部大气中的元素分立吸收引起的, 这里已同时涉及了连续发射光谱和特征吸收光谱两个概念, 发射和吸收之间关系的研究使其创建了基尔霍夫定律; 同年基尔霍夫还和本生 (Robert Wilhelm Bunsen, 1811~1899) 共同研制了第一台实用的光谱仪, 其上使用了本生发明的以煤气为燃料的热光源, 这种光源的辐射温度有了很大提高, 使得许多光谱实验得以进行, 并据此发现了铷和铯这两种新元素。这是用光谱分析方法发现的第一批元素, 其后采用同样的特征发射光谱方法又发现了一系列新元素。这种被称为本生灯的装置现在虽然已很少作为光源使用,