



科工精译



Springer

光网络单元

——光数据通信基础与应用

Elements of Optical Networking
——Basics and Practice of Optical Data Networking

【德】福尔克马尔·布吕克纳
刘继红

著
译

- 内容全面、精炼
- 文字描述深入浅出
- 全书插图丰富，多实例分析，少繁杂推导
- 配有辅助计算分析程序，便于读者进一步仿真分析



国防工业出版社
National Defense Industry Press

光网络单元

——光数据通信基础与应用

**Elements of Optical Networking——Basics and
practice of optical data networking**

[德]福尔克马尔·布吕克纳 著

刘继红 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-035号

图书在版编目(CIP)数据

光网络单元:光数据通信基础与应用 / (德)布吕克纳著;
刘继红译. —北京:国防工业出版社, 2014. 6
(高新科技译丛)

书名原文: Elements of optical networking: basics and practice
of optical data networking
ISBN 978-7-118-09478-7

I. ①光... II. ①布... ②刘... III. ①光纤网-研究
IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 098702 号

Translation from the English language edition:
Elements of Optical Networking Basics and practice of optical data communication by
Volkmar Brückner.

© Vieweg + Teubner Verlag/Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011.

Vieweg + Teubner Verlag is a part of Springer Science + Business media.

All Right Reserved.

本书简体中文版由 Vieweg + Teubner Verlag/Springer Fachmedien 授权国防工业出版社独家发行。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 12¼ 字数 213 千字

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717



译者序

光纤通信技术已成为现代通信的主要支柱之一,在现代电信网络中起着举足轻重的作用,尤其是近年来随着相干光通信和全光器件等技术的迅速发展,使得该领域涵盖的内容越来越丰富。

本书系统介绍了构成光纤通信网络的各种单元技术及其具体应用方式,以光纤通信发展历史和光波基础为导引,涵盖了光纤技术、光收发机、通信用光器件、光放大器、光纤及光传输系统测量等,最后以光网络及各种光复用技术总括全书。

作者 Volkmar Brückner 博士是莱比锡德国电信应用技术大学教授,在激光光学、光纤技术和光电子学领域具有超过 25 年的科研和教学经历。本书体现了作者的研究积累和执教理念,具有鲜明的特色:内容全面、精炼,文字描述深入浅出;全书插图丰富,多实例分析,少繁杂推导;配有辅助计算分析程序,便于读者进一步仿真分析。

本书的翻译工作得到了多位专家、朋友的帮助和支持,在此特别感谢北京邮电大学博士生导师张晓光教授、西安邮电大学阴亚芳教授,感谢 Volkmar Brückner 教授在本书翻译和出版过程中给予的帮助,感谢西安邮电大学梁猛、陆蓉等同志在翻译和审校过程中给予的大力支持和帮助。

原书附带光盘内容已经整理,如需要可与译者或出版社联系。

由于译者水平有限,不妥和疏误之处敬请广大读者批评指正。

刘继红

2014 年 2 月

前 言

基于光纤的信息传输网络正在快速发展之中——敷设的光缆越来越多,光网络的覆盖范围越来越广,与此同时,激光器、光收发器、光放大器、光耦合器和光开关等系统与网络单元技术也日新月异。

伴随着光通信技术的不断发展,对相关专业研究人员和工程技术人才的需求也逐步增长,本书正是在这样的大背景下编著的。《光通信技术》(德文)是本书的第一版,之后经过修订和增补新内容,书名改为《光网络单元——光数据通信技术与应用》,同时出版了德文版本和英文版本。本书可作为光通信领域工程技术人员学习、研究的参考用书。

光通信技术与实际应用密切结合,该领域教授的课程内容既要考虑大学教学的需求,还要兼顾终身学习,必须由浅入深、适当取舍才有可能把非常复杂的物理过程解释清楚。因此,本书强调对光纤通信涉及的基本数学和基础物理知识的理解。回顾在莱比锡德国电信应用技术大学多年给学生授课、与他们讨论的经历,我认识到即使对某个技术主题或概念的叙述看起来已经相当清晰、明确,但对刚接触的学生来说却并非如此,往往会有一堆意想不到的问题,有一个从背景知识逐步建立技术概念的过程。

用最容易理解的方式阐述问题、把有用的信息传递给读者是本书追求的主要目标,因此,书中很多地方都是直接利用公式或实例给出定性解释,尽量避免不必要的、繁杂的数学推导。通过实证举例、简单推算以及程序演示(利用 MathCad 编写)来描述物理过程是贯穿本书的一种基本处理方法,例如,通过应用实例来解释光数据传输的相关问题和约束因素。总之,使内容组织结构清晰、问题描述少用数学是编写本书的基本思路和取向,希望读者通过阅读本书,能够提高跟踪光纤通信技术新进展相关文献、会议报道的能力。

附带的光盘中对部分概念和重要内容有更详细的解释。

除了应用实例外,作者还编写了练习题,书后附有参考答案。练习题的帮助和解答在电子书中都有可点击的链接。用 MathCad 编写的计算程序能演示部分实例,这些程序对应的文本文件和 MathCad 可执行程序都能在电子书中找到。

为了便于读者运行电子书中的程序,MathCad 公司提供了一个 30 天的试用软件,该软件包括在随书附带的 CD 中。另外,MathCad 程序、书中的图片、更多的练习材料以及本书的更新信息都可以在 Vieweg + Teubner 出版社网站的 Online Plus 区下载。

从出版社网站上下载的图片如果用于教学或其他合法用途,请注明本书为参考来源,并向 v. brueckner@ hotmail. de 发送邮件通知作者。当然,非常欢迎读者提出任何意见和建议——这是本书再版时改进的最好途径。

我非常感谢为本书出版做出贡献的人们。首先是 Patricia Joliet,她为本书英文版的翻译工作提供了很大的帮助;感谢我的同事 Jürgen Krauser 教授,在工作中与他有很多具有启发意义的讨论,尤其是他对本书初稿严格的审阅和诸多良好的建议;特别感谢 André Schuster,他在实验工作中给了我大量帮助;我也要感谢 Christian-Alexander Bunge 教授,我们之间曾有很多关于本书内容的有趣讨论。另外,本书中部分内容来自我所指导研究生的科研成果。

最后,把最重要的感谢送给我的妻子 Ute 和儿子 Michael,他们慷慨地给予我时间来完成本书——我知道很多事情都被搁置和等待! 因此,最特别的感谢属于你们。

Volkmar Brückner

2011 年 3 月于莱比锡

目 录

第1章 绪论	1
第2章 光	6
2.1 什么是光?	6
2.2 波粒二象性	7
2.2.1 波动理论	8
2.2.2 射线模型	10
2.3 电磁波的功率与能量	11
第3章 光纤	14
3.1 光在波导中的传播	14
3.1.1 平板波导的导光机理	14
3.1.2 光纤中的导行波	15
3.2 光纤中光的传播,多模和单模光纤	18
3.2.1 制作光纤的玻璃	18
3.2.2 光在光纤中的传播,接收角和数值孔径	18
3.2.3 光纤中的横模,模式混合	20
3.2.4 光纤的单模条件和截止波长	26
3.2.5 模场直径	27
3.3 光纤的衰减	28
3.3.1 紫外吸收	28
3.3.2 瑞利散射	28
3.3.3 水分子的吸收	29
3.3.4 红外吸收	30
3.3.5 光纤衰减系数随波长的变化	31
3.4 光纤色散与色散补偿	32

3.4.1	色散的概念及其影响	32
3.4.2	色散机理	35
3.4.3	光纤类型	46
第4章	光纤连接,耦合器与光开关	49
4.1	光纤的连接和熔接	49
4.1.1	光纤熔接	49
4.1.2	光纤连接器	50
4.2	光耦合器和光开关	52
4.2.1	光耦合器	52
4.2.2	耦合器的类型	54
4.2.3	光开关	58
第5章	光发射机	67
5.1	半导体光发射机的基本组成	67
5.2	有源介质	69
5.2.1	半导体的能带结构,直接和间接跃迁	69
5.2.2	材料选择	70
5.2.3	半导体的辐射发光,LED	72
5.2.4	半导体光发射机的基本结构	76
5.3	谐振腔	78
5.3.1	FP 激光器	79
5.3.2	动态单纵模激光器(DSM)	81
5.4	激光器的特性	83
5.4.1	$P-I$ 特性,温度稳定性和老化	83
5.4.2	半导体激光器的光谱	84
5.4.3	辐射特性	84
5.5	光网络中激光器的选择	85
5.5.1	具有DFB 谐振腔的MQW 激光 器——边发射发光二极管	85
5.5.2	垂直腔面发射激光器(VCSEL)	88
第6章	激光的调制	90
6.1	激光调制的概念	90

6.2	光通信中的调制方法	91
6.2.1	幅度调制(AM),功率调制	91
6.2.2	脉冲幅度调制(PAM)	91
6.2.3	脉冲位置调制(PPM)	91
6.2.4	脉冲编码调制(PCM)	92
6.3	半导体激光器的直接调制	93
6.4	半导体激光器的间接调制	98
6.4.1	相位和频率调制	99
6.4.2	强度或功率调制	99
第7章	光接收机	102
7.1	光接收机的基本工作原理	102
7.2	PIN 光电二极管	104
7.3	雪崩光电二极管(APD)	105
7.4	接收机的噪声,误码率	107
7.4.1	散粒噪声	108
7.4.2	强度噪声	109
7.4.3	热噪声(奈奎斯特噪声)	109
7.4.4	倍增噪声	110
7.4.5	误码率	111
7.4.6	光外差接收	112
第8章	光网络元件	115
8.1	光放大器	115
8.1.1	EDFA	115
8.1.2	ROA	122
8.1.3	SOA	126
8.2	复用/解复用器(MUX/DEMUX)	129
8.2.1	用于波长 MUX/DEMUX 的光学滤波器	129
8.2.2	OADM	135
8.2.3	OXC	137
第9章	光纤与光通信系统的测量	139
9.1	光纤测量	139

9.1.1	折射率分布的测量	139
9.1.2	光纤衰减的测量	140
9.1.3	色散测量	144
9.2	数据传输性能的测量	146
9.2.1	BER 测量,接收机的灵敏度	146
9.2.2	眼图	147
第 10 章	光纤的非线性效应	150
10.1	光学非线性效应	151
10.2	光纤中的非线性效应	152
10.2.1	光纤中的非线性散射	153
10.2.2	光纤中的三阶非线性效应,四波混频	154
10.3	光纤中的啁啾	155
10.4	基于非线性的偏振色散管理	157
10.4.1	减小啁啾	157
10.4.2	啁啾的利用	158
10.5	有源色散补偿	160
10.6	光孤子	161
第 11 章	无源与有源光网络	164
11.1	通信拓扑	166
11.2	复用方式	168
11.2.1	空分复用	169
11.2.2	时分复用	169
11.2.3	波分复用	171
11.3	WDM 系统	177
11.4	信号再生	178
练习解答		180
参考文献		184

第1章 绪 论

用光传递信息是世界上最古老的应用技术之一,早在原始社会,人们狩猎时就使用烟雾信号作为标记。公元前12世纪,希腊人用火把传递特洛伊城沦陷的消息:两只手中分别拿1个火把表示希腊字母 α ,而左手两个、右手一个则代表字母 β ,等等。根据记录,用这种方式每分钟可以传送8个字母,即“符号速率”约等于0.13符号/s。中国人使用光来传递信息则要更早,战国时期就已经利用长城上的烽火台报告敌人进犯的消息。

1794年,法国人 Claude Chappe 利用十字架左右木臂上下移动代表的位置和角度来表示各个字母,实现了一种称为“Semaphore”的光电报,这种光电报的工作方式和现在的铁路信号系统类似,能够在1h内把信息从里尔传递到大约300km外的巴黎。信号传递过程中,通信人员使用双筒望远镜观察对方十字架木臂的位置,然后改变本地木臂的位置作为响应。1875年,有人利用镜子的多次反射传递类似摩尔斯电码的编码数据,这种系统被称为“Modern Heliograph”。直到今天,罗马教廷在宣告教皇选举成功的消息时仍然利用白烟这种“光”信号。当然,上述这些“古老”的光通信方式其比特率都非常低,一般不超过1b/s。

今天,主宰信息传输的是数字通信技术。由于自然界的信号大都是模拟的,为了得到数字信号,必须对模拟量进行变换,把模拟信号数字化:对于语音信号,通过采样、量化等过程把信号的时间和幅度取值都数字化;对于图形图像,其中每一个像素所包含的信息除了亮度、色彩外,还有它在整个图像中的位置,这些都要数字化;对于字符,除了采用规定的标准编码外,可能还要把位置等信息数字化,等等。不难看出,即使一个像素或音调,数字化后也有大量比特,形成了由是一否、开一关或1-0构成的特定比特信息序列。

现在,在我们的数字世界中,每时每刻传输的信息量都非常惊人。为了对信息传输的比特率有一个直观认识,我们可以设想把医学图像实时地从医院传输给一位远程专家的情景:传输计算机屏幕上显示的一幅高分辨率(如常用的 1024×768)32位彩色图像需要25.2Mb,而高质量的电视画面效果要求每秒显示100副图像,这样,传输速率将达到2.5Gb/s。如果不采用任何数据压缩方法,则一个比特的持续时间约 $1/(2.5 \times 10^9) = 4 \times 10^{-10}$ s,即400ps。这种大数据

量高速传输只有通过光纤才能传输几千米以上的距离。

因此,基于光纤传输的光网络已成为支持吉比特高速数据传输的核心技术,另一方面,为了更好地满足实际应用需要,对光网络技术的发展又提出了新的要求。

(1) 现有通信网络中基于电子技术实现的功能应逐步用光技术代替,信号传输过程中将不采用任何光电转换等非光处理环节,实现功能更强大的全光传输。

(2) 光系统和电系统能够互通、并存,这一点非常重要。尽管希望使用全光技术,但实际上在未来很长一段时间内通信系统仍是光、电混合的,例如,不可能在短期内让所有用户都使用光纤接入;另外,光网络技术也应该和移动技术(例如 UMTS 或卫星技术)兼容互通。

光纤是光通信技术的关键元件之一,利用光纤既能构成点到点传输链路,也可以实现环形等网络结构。目前,全球使用的光缆长度已有几百万千米。例如,1998 年德国电信沿“古丝绸之路”敷设的跨欧亚光缆项目 Trans-Asia-Europe 穿越了 20 个国家,总长度超过 27000km,工程造价约 5 亿欧元。另外,人们为了连通各大陆,在海底也敷设了大量光缆,如从 2001 年开始敷设的跨大西洋 TAT-14 光缆系统,是一个长度超过 1500km 的环形网络,共使用 4 对光纤,传输容量达 640Gb/s。TAT-14 光缆系统在美国新泽西的马纳斯宽、塔克顿和德国北部城市诺登之间提供了两条连接,一条从诺登开始,经过丹麦的布拉伯杰格、英国的设得兰岛,到达马纳斯宽和塔克顿,而另一条从诺登开始,先后经过荷兰的卡特韦克、法国的索姆河畔圣瓦莱里、英国的比尤得,最后穿越大西洋到达马纳斯宽和塔克顿。从东亚经过中东,最后到达西欧的 SEA-ME-WE 3 光缆系统传输距离更长,约 39000km,这个 1999 年敷设的光缆系统连通了 4 大洲(大洋洲、亚洲、非洲和欧洲)33 个国家的 39 个节点。海底光缆敷设时通过光缆连接器连接,每 50~70km 设置一个光放大器,通过光缆中的铜线给放大器供电。

鉴于光纤在光通信技术中的重要作用,本书将首先介绍它的特性,主要包括衰减、色散和非线性,然后是光纤的连接技术,详细介绍熔接和连接器两种方法。实现光通信的另一个关键技术是如何产生光,以及怎么把数据加载到光波上,其中用到的核心器件是半导体激光器,这类器件能够在很多可用的波长上发光,目前主要在 1550nm 附近,激光线宽小于 10^{-4} nm。

为了说明如何利用激光器和光纤等实现通信过程,我们先看一个简单的例子,如图 1-1 所示,从半导体激光器发出的激光作为载波进入信道 1,数据源发出的信号对激光进行调制,调制后的光比特序列将耦合进低损耗光纤传输。激

光的调制方法有直接调制和间接调制两种:直接调制也叫内调制,调制信号直接加载到激光源的激励(图1-2中的电流源)上;间接调制也叫外调制,需要使用额外的调制器。不论哪种调制方式,激光的某些特征都受传送的数据控制,从而产生与电数据对应的光比特序列。可以接入光通信系统的数据源各种各样,普通电话接入需要使用A/D转换器,而计算机输出的数字信号可以直接送到调制器。

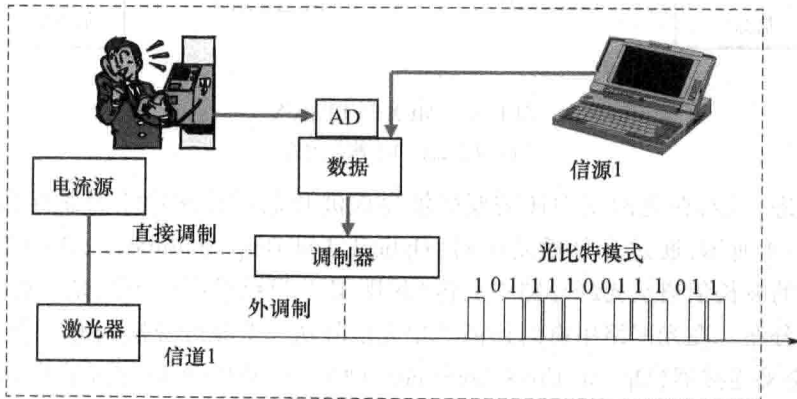


图 1-1 光源的调制

光通信接收端的处理过程刚好相反(图1-2)。通过接收机,已调光信号首先被转换成电信号,然后再通过解调、D/A 等把数据送到相应的通信终端。

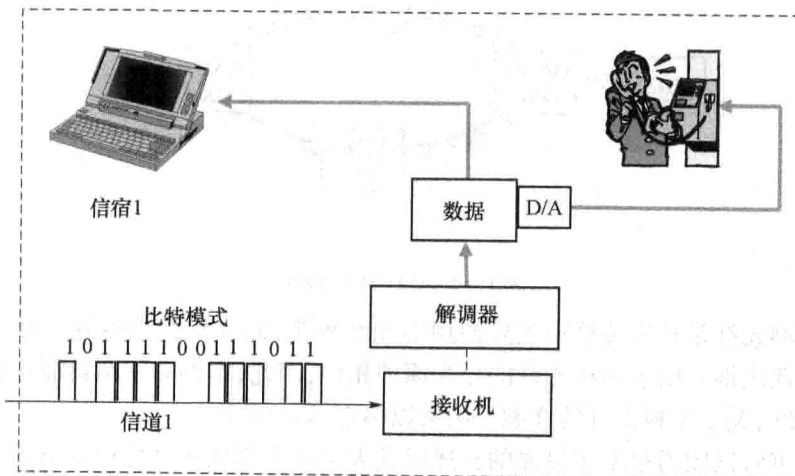


图 1-2 光接收部分

利用波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术(图1-3(a))能够把两个或者更多的光波长信道复用(MUX)进一根光纤中传输,在接收端使用解复用器(DEMUX)按波长把各信道分开。把间隔很小(如0.3nm)的多个波长信道分开是解复用过程中的一项关键技术,本书会对该项技术进行详细介绍。

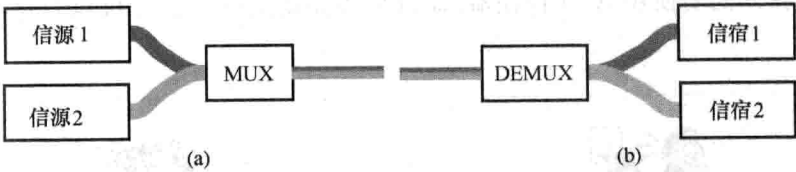


图1-3 MUX与DEMUX
(a) 复用器; (b) 解复用器。

更进一步,在光网络中还需要能够完成波长信道选路功能的器件和设备。如图1-4所示,通过光分插复用器(Optical Add-Drop Multiplexer, OADM)可以将特定的波长信道从光纤环路中上传/下载,优化网络数据在不同光纤和波长信道上的分布。在光网络中有时还需要把光信号从一个光纤交换到另一个光纤中去,光交叉连接器(Optical Cross Connector, OCC 或 OXC)可以完成该项功能,其中“X”表示信道之间的交叉。无源光耦合器和有源光开关等器件是构成 OADM 和 OXC 必不可少的部件,这正是本书详细介绍这些光器件的原因。

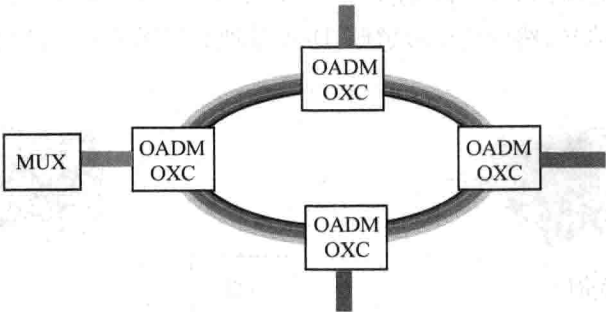


图1-4 OADM与OXC

玻璃光纤是长途传输中主要使用的光纤种类,而在短距离传输中塑料光纤也有用武之地。由于两种光纤的导光原理相似,因此,本书只介绍目前更常用的玻璃光纤,关于塑料光纤的详细介绍可以参考[Zei 07]。

本书将试图通过明了易懂的叙述以及大量应用实例解释各种复杂的物理过程。例如:描述各种光电器件的功能时尽量与实际应用结合;当光网络中同时使用多种功能器件时,只讨论网络本身以及器件的使用方法,而不涉及器件的原

理等。

本书中很多分析结果是作者用 MathCad 软件编写程序计算得到的,在附带的光盘中可以找到相应的计算程序。因为详细阐述光通信的相关理论不是本书的主要目标,因此,对理论知识感兴趣的读者可以参考其他著作,如 Saleh 的[Sal 08]等。为了帮助读者更好地理解相关内容,书中包括了一些非常必要且联系紧密的背景理论,如对光波的描述、干涉等。

目前出版的光纤通信类书籍和刊物较多,作者在参考文献中只引用了那些与本书内容密切相关或者能为读者理解问题提供帮助、对特定问题有深入讨论的文献,而期刊和会议论文则很少引用。如果想了解光纤通信领域的最新文献和相关信息,建议读者可以参加每年举办的各种光通信会议(如 ECOC),或者阅读会议报告。但愿本书对提升读者理解光纤通信领域最新进展和相关技术问题的能力有所帮助。

最后,作者希望本书能帮助读者增加光纤通信领域的知识,提高利用这些知识的能力,从而更好地理解光纤通信技术各种精彩纷呈的新发展。

第2章 光

2.1 什么是光?

和其他无线电波一样,光也是一种电磁辐射,可以用以下参量描述:

(1) 功率或能量:二者的单位分别是瓦(W)和瓦秒(Ws)(即焦耳(J)),描述光脉冲时多使用能量。实际应用中也可以用能量密度(单位面积上的能量)描述光波的特性。

(2) 光谱:是光功率(或强度)在波长 λ 或频率 f 上的分布。光波长与频率有如下关系:

$$f \cdot \lambda = c_0 \quad (2-1)$$

式中: $c_0 = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$,是真空中光速。

如果介质的折射率为 n ,则式(2-1)变为

$$f \cdot \lambda = \frac{c_0}{n} \quad (2-2)$$

另外,光也可以用光子能量 E 表示:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c_0}{\lambda} \quad (2-3)$$

式中: $h = 6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2 = 4.135670 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ 。光子能量的单位是电子伏特(eV)。

由式(2-3)可得光子能量和波长之间的关系:

$$E = \frac{1.23984}{\lambda} \quad (2-4)$$

式中: E 和 λ 的单位分别是eV和 μm ,例如,波长 $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ 的光子其能量 $E = 0.826 \text{ eV}$ 。

练习2-1:波长为1550nm的光波,其频率和光子能量分别是多大?

表2-1给出了电磁波谱各个谱段的名称及主要参量的大小。

表 2-1 电磁波谱

名称	缩写	波长	频率/Hz	光子能量/eV
γ 射线	Γ	$< 500\text{pm}$	$> 6 \times 10^{18}$	$> 24.8 \times 10^3$
X 射线	X-ray	$< 50\text{nm}$	$> 6 \times 10^{15}$	> 24.8
紫外光	UV	$< 400\text{nm}$	$> 7.5 \times 10^{14}$	> 3.1
可见光	VIS	$< 700\text{nm}$	$> 4.3 \times 10^{14}$	> 1.77
红外光	IR	$< 100\mu\text{m}$	$> 3 \times 10^{12}$	$> 12.4 \times 10^{-3}$
微波		$< 1\text{cm}$	$> 3 \times 10^{10}$	$> 124 \times 10^{-6}$
无线电波	RF	$< 1\text{km}$	$> 3 \times 10^6$	$> 12.4 \times 10^{-9}$

在光学领域,“光波”指电磁波谱中从紫外光到红外光这一部分(图 2-1)。一般口头上所说的“光波”仅仅指可见光,人类通过彩虹可以同时观察到各种波长的可见光:红、橙、黄、绿、青、蓝和紫。在光通信技术中,近红外光(在玻璃光纤中传输)和可见光(在塑料光纤中传输)都可作为载波使用。

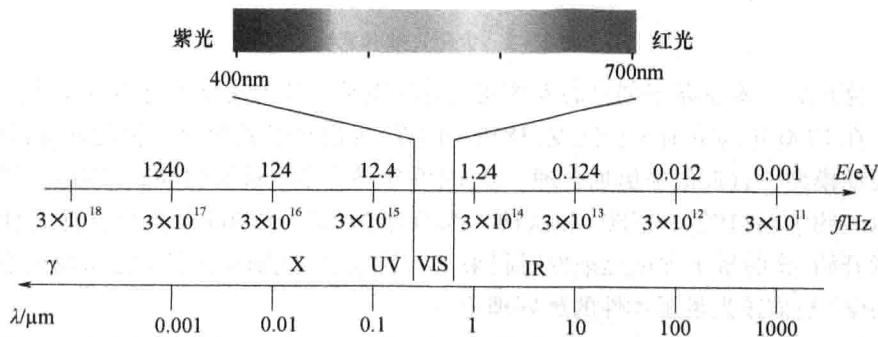


图 2-1 电磁波谱与可见光(VIS)

2.2 波粒二象性

在日常生活中,很多时候光的传播轨迹看起来像射线一样,例如早晨透过树林的阳光(图 2-2)。

而另一方面,很多光学现象又只能用波动的观点来解释,例如雨后彩虹在天空会形成各色彩带(图 2-2)。那么,光的传播到底是射线还是波动呢?

1676 年,艾萨克·牛顿(1642—1727)建立了光的微粒模型,认为光是由沿直线以光速传播的、无质量的微粒构成的。

1690 年左右,斯蒂安·惠更斯(1629—1695)提出了光的波动模型。詹姆