



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息科学与工程类专业精品教材

光纤通信

原理及应用

Principle and Applications
of Optical Fiber Communications

© 杨英杰 赵小兰 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息科学与工程类专业精品教材

光纤通信原理及应用

杨英杰 赵小兰 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面地介绍光纤通信的基本技术和发展,包括光纤通信的物理学基础;光纤和光缆的结构、传输理论和传输特性;有源器件和无源器件的原理及特性;光端机的组成和工作原理;光纤通信系统和网络以及其他光纤通信系统的组成关键技术及应用;光纤通信相关实验的原理简介及实验系统的构建等。

本书从基本知识出发,由点及面进行原理阐述,以便读者先了解系统组成及各部分工作原理,再从整体角度去进一步深入学习系统知识,适合各个层次的读者方便阅读。本书可作为电子信息科学与工程、电子科学与技术、计算机科学与技术(网络工程)等本科生和研究生教材,也适合从事光纤通信工作的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信原理及应用/杨英杰,赵小兰编著. —北京:电子工业出版社,2011.4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-121-13262-9

I. ①光… II. ①杨… ②赵… III. ①光纤通信—高等学校—教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 059214 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京冶金大业印刷有限公司

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:19.75 字数:544 千字

印 次:2011 年 4 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:35.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

自 1966 年英籍华人高锟教授提出光纤通信的概念后,经历了几十年的研究开发,光纤通信成为了今天大容量、长距离信息传输的主要方式,遍布全球,在全球的信息交流、信息流通方面扮演重要角色。

任何一种技术体系都会不断的发展,光纤通信技术也不例外。现在光纤通信的传输能力已经达到 10Tbps,大干线已经建设得差不多了,并且埋地的剩余光纤还有很多。但是它仍然具有很大的发展空间,主要体现在:单纤双向传输技术、光纤到户(FTTH)接入技术、骨干节点的光交换技术和研发集成光电子器件等方面。光纤通信技术不仅可以应用在通信的主干线路中,还可以应用在电力通信控制系统中,进行工业监测、控制等,而且在军事领域的用途也越来越广泛。

本书为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”,在综合考虑光纤通信技术的现状及发展趋势,以及新形势下教学特点,采用辩证的思路进行讲述:即“由整体到部分,再由部分到整体”,以期从多角度来阐明光纤通信的原理及应用。第一章整体讲述光纤通信的系统结构,考虑到读者可能会有专业差距,我们插入了一些光的性质内容,以帮助读者进一步深入理解后续内容;第二章详尽介绍光纤传输的原理,这部分内容要求读者具备较深的数学功底,因为涉及大量的公式推导。对理论要求不高的读者,可跳过这部分内容;第三章、第四章、第五章重点从细节上介绍光纤通信系统各部分及相关器件的原理和应用,既讲述传统产品的工作原理,也注入了最新产品的应用,以使课程跟上新技术的发展步伐;第六章、第七章又从系统的角度介绍了多种光纤通信系统的结构及原理,除部分传统内容外,根据光纤通信的新发展,详尽介绍了 FTTH、光交换、集成光电子等新型技术;最后,结合具体的教学实践,我们给出了 11 个实践项目的原理和实现过程,这些项目涵盖了光纤通信系统的主要部分,以方便读者在掌握本书理论知识的基础上,进一步消化、巩固基本知识,实现学以致用。

实际教学可根据不同专业和层次的要求安排讲授内容,教学参考时数为 50~70 学时。

为了方便同学们自学、自检,以及老师们教学,特对书中的部分问题进行解答,同时开发了多媒体课件,需求者可在华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)索取。

本书由杨英杰、赵小兰共同完成。在本书的编写和出版过程中,得到了华南理工大学教务处的关心,也得到了华南理工大学电子与信息学院领导(韦岗、徐向民)的大力支持,还得到了同事(黄光周、于继荣、马国欣)及研究生(许琼、张舒蕾、向鹏、李高峰等)的无私帮助,更离不开家人(赵永吉、蔡剑怀)的温馨支持,在此向他们表示深切的谢意。

由于编者水平有限,对书中欠妥之处,恳请读者不吝赐教和批评指正。

编 者
2011 年 3 月

目 录

前言

第一章 光纤通信基础及概述	1
1.1 光的基础知识	1
1.1.1 光的电磁理论	1
1.1.2 光的干涉	1
1.1.3 光的衍射	2
1.1.4 光的偏振	2
1.1.5 光的吸收、色散和散射	5
1.1.6 光的量子性	5
1.1.7 相关方程组介绍	7
1.2 光纤通信的发展简况	9
1.3 光纤通信系统的基本组成	12
1.4 光纤通信的特点	12
习题 1	13
第二章 光纤和光缆	14
2.1 光纤和光缆	14
2.1.1 光纤	14
2.1.2 光缆	16
2.2 光纤的传输理论	21
2.2.1 阶跃光纤导波理论	21
2.2.2 渐变光纤传输理论	30
2.2.3 单模光纤	34
2.3 光纤的特性	38
2.3.1 光纤的几何特性	38
2.3.2 光纤的光学特性	38
2.3.3 光纤的传输特性	40
习题 2	52
第三章 有源器件	54
3.1 光源	54
3.1.1 半导体光源的物理基础	54
3.1.2 半导体发光二极管(LED)	62
3.1.3 半导体激光器	66
3.1.4 单纵模激光器	76
3.2 光电检测器	80
3.2.1 半导体光电检测器的工作原理	81

3.2.2 光电检测器的主要特性	88
3.3 光放大器	93
3.3.1 光放大器的分类	94
3.3.2 掺铒光纤放大器	96
习题3	109
第四章 光端机	111
4.1 发射光端机及其驱动技术	111
4.1.1 发射光端机的组成与性能要求	111
4.1.2 光源的驱动电路	112
4.2 光源的外调制	126
4.2.1 电光调制	127
4.2.2 声光调制	130
4.2.3 磁光调制	132
4.3 光接收机的基本组成	134
4.3.1 前置放大器	135
4.3.2 线性通道	136
4.3.3 数据恢复电路	140
4.3.4 集成光接收机	141
4.4 光接收机的技术指标	142
4.4.1 光接收机的噪声	142
4.4.2 数字接收机的灵敏度	148
4.4.3 动态范围和自动增益控制	153
习题4	154
第五章 无源器件	155
5.1 光纤连接器	155
5.1.1 基本结构	156
5.1.2 重要技术指标	158
5.2 光耦合器	161
5.2.1 光耦合器的种类	162
5.2.2 光耦合器的特性参数	165
5.3 光波分复用器	166
5.3.1 光波分复用器种类	166
5.3.2 光波分复用器特性参数	170
5.4 光开关	171
5.4.1 光开关的分类及工作原理	171
5.4.2 光开关特性参数	173
5.5 光隔离器与光环行器	175
5.5.1 光隔离器	175
5.5.2 光环行器	178
5.6 光纤光栅	182

5.6.1 光纤光栅的工作原理	182
5.6.2 光纤光栅的分类	183
5.6.3 光纤光栅的应用	184
5.7 光衰减器	185
5.7.1 光衰减器的工作原理	185
5.7.2 几种可变衰减器	186
5.8 光偏振控制器	191
5.8.1 光偏振控制器原理	191
5.8.2 光偏振控制器特性参数	192
5.9 光滤波器	192
5.9.1 固定波长滤波器	193
5.9.2 可调谐滤波器	194
5.10 集成光学	195
5.10.1 集成光学概述	196
5.10.2 光波导的结构型式	196
5.10.3 光波导所用的衬底材料	198
5.10.4 集成光学的工艺技术	199
习题 5	200
第六章 光纤通信系统与网络	201
6.1 数字光纤通信系统	201
6.1.1 系统的主要性能指标	201
6.1.2 系统的设计	207
6.1.3 光纤线路码型	210
6.1.4 光中继器	214
6.2 SDH 光同步数字传送网	215
6.2.1 SDH 概述	215
6.2.2 SDH 的速率与帧结构	218
6.2.3 SDH 复用和映射过程	221
6.2.4 网同步的概念	224
6.2.5 SDH 传送网	225
6.2.6 SDH 自愈网	228
6.3 光纤接入网	232
6.3.1 接入网的简述	232
6.3.2 光接入网	236
6.3.3 几种光纤接入网	238
6.4 全光通信系统概述	243
6.4.1 全光网的概念及特点	243
6.4.2 全光网络的结构	245
6.4.3 全光网的基本技术	247
习题 6	255

第七章 其他光纤通信系统	257
7.1 相干光纤通信系统	257
7.1.1 相干检测原理	257
7.1.2 调制与解调方式	258
7.1.3 相干光接收机的性能指标	262
7.1.4 相干光纤通信的关键技术	265
7.2 光孤子通信系统	267
7.2.1 光孤子形成机理	268
7.2.2 光孤子通信系统	269
7.2.3 光孤子通信展望	272
7.3 多信道复用光纤通信系统	272
7.3.1 光波分复用系统	273
7.3.2 频分复用	278
7.3.3 光时分复用	279
7.3.4 光码分复用	281
7.3.5 空分复用	283
7.3.6 副载波复用	283
习题 7	287
第八章 光纤通信技术实训	288
8.1 光纤数值孔径(NA)性质与参数测量实验	288
8.2 光纤焊接及损耗测量技术	288
8.3 光时域反射计—光纤外特性参量及传输特性测量	290
8.4 光信号发送和接收实验	291
8.5 光纤通信无源光器件连接实验	293
8.6 掺铒光纤放大器性能测试	294
8.7 光纤图像传输及传输特性测量	296
8.8 数字光纤通信系统信号眼图测试	299
8.9 远距离双向光纤通信系统误码率对测实验	301
8.10 光通信中的光交叉连接(OXC)模拟实验	303
8.11 光通信系统的信号分插复用(OADM)模拟实验	304
参考文献	308

第一章 光纤通信基础及概述

1.1 光的基础知识

光学是研究光的行为和性质,以及光与物质相互作用及其应用的学科,是物理学最古老的基础学科之一。在光纤通信技术中,利用光波作为载波,以光纤作为传输媒介传输信号。了解光的特性,有助于理解光纤技术的工作过程及相关技术。

1.1.1 光的电磁理论

19 世纪 60 年代由麦克斯韦提出,把光看成是频率在某一范围的电磁波。这样可以解释光的传播、干涉、衍射、散射、偏振等现象,以及光与物质相互作用的规律。按照麦克斯韦理论,任何电磁波在真空中的传播速度都等于真空中的光速 c ,光是某一波段的电磁波。

周期性变化的电场和磁场总是互相转化、互相激发,交替产生,由发生区域向周围空间由近及远的传播,形成电磁波。电磁波的电场强度 E 、磁场强度 H 的振荡方向都跟波的传播方向垂直(如图 1-1 示),因而电磁波是横波。对人的眼睛或感光仪器起作用的是电场强度 E ,所以我们说光波中的振动矢量通常指的是电场强度 E 。

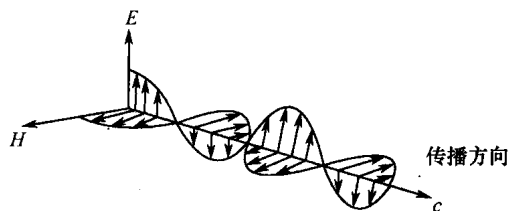


图 1-1 电磁波传播示意图

人眼能感受到的电磁波的波长 λ 约在 $380\sim 780\text{nm}$,对应的频率范围是 $7.5\times 10^{14}\sim 4.1\times 10^{14}\text{Hz}$,通常把这个波段内的电磁波叫做可见光。在可见光的范围内不同的频率引起不同的颜色感觉。

波动的传播总是伴随着能量的传递,一般用平均能流密度来描述该能量。能流密度的大小决定了人眼的视网膜或物理仪器检测到的光的强弱。所谓能流密度,是指在单位时间内通过与波的传播方向垂直的单位面积的能量,或表示为通过单位面积的功率。对于电磁波,平均能流密度正比于电场强度振幅 A 的平方值。在波动光学中,主要是讨论相对光照度,常把振幅的平方所表征的光照度称为光强度,即

$$I_{\text{相对}} = A^2 \quad (1-1)$$

式中, $I_{\text{相对}}$ 为相对光强度,其值与所处媒质的折射率有关。

1.1.2 光的干涉

两列频率相同、相位位相差恒定、振动方向一致的相干光源在空间相遇时相互叠加,在某些区域始终加强,在另一些区域则始终减弱或完全抵消的现象,叫做光的干涉。在叠加区域内各处的强度如果不完全相同,且形成一定的强弱分布,显示出固定的图像叫做干涉图样。亦即,对空间某处而言,干涉叠加后的总发光强度不一定等于分光束的发光强度的叠加,而可能大于、等于或小于分光束的发光强度。

对于普通的光源,保证相位差恒定成为实现干涉的关键,通常采用两种方法来获得相

干光。

① 分波阵面法:将点光源的波阵面分割为两部分,使之分别通过两个光具组,经反射、折射或衍射后交叠起来,在一定区域形成干涉。由于波阵面上任一部分都可看作新光源,而且同一波阵面的各个部分有相同的相位,所以这些被分离出来的部分波阵面可作为初相位相同的光源,不论点光源的位相改变如何快,这些光源的初相位差却是恒定的。如:杨氏双缝、菲涅耳双面镜和洛埃镜等都是这类分波阵面干涉装置。

② 分振幅法:当一束光投射到两种透明媒质的分界面上,一部分光反射,另一部分光折射,从而将光分为两束,两束光都占入射光强的一部分,而光强又和振幅平方成正比,所以该法叫分振幅法。如薄膜、劈尖、牛顿等均为分振幅法干涉装置。薄膜干涉,它利用透明薄膜的上、下表面对入射光的反射光波在空间相遇而形成的干涉现象,由于薄膜的上下表面的反射光来自同一入射光的两部分,只是经历不同的路径而有恒定的相位差,因此它们是相干光。另一种重要的分振幅干涉装置,是迈克耳孙干涉仪。

光的干涉现象应用广泛,如:①光学元件磨制好后,通常先把被检查的表面与一个标准的表面相接触,然后在单色光照射下,从观察两个表面间的空气薄膜所形成的干涉条纹形状来判断其表面是否符合标准;②在光学元件上镀介质薄膜,利用薄膜的干涉相消来减少光学元件的反射损失,如照相机的镜头,以及测距仪、潜望镜上用的光学元件都这样处理;③固体样品的膨胀系数或由于机械张力、压力等原因引起物体长度的微小改变等都可以反映在为适当的装置中干涉条纹的移动,可达到精确的测量效果。

1.1.3 光的衍射

光的干涉现象证明了光具有波动性,为了进一步了解光的波动特性,我们下面将介绍光的衍射现象。

光遇到障碍物时,偏离直线传播而进入障碍物的几何阴影中,这种光绕过障碍物的绕射现象叫做光的衍射。产生明显的衍射现象需要以下条件:障碍物或孔的线度(大小)与波长相差不多。由于光的波长较短,不足 10^{-6}m (即 $1\mu\text{m}$),所以一般情况下,很难看到光的衍射现象。

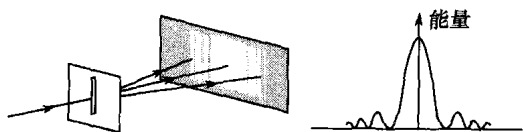


图 1-2 光的衍射

如图 1-2 所示单缝衍射实验现象,是明暗相间的图样,但中央亮条纹较宽、较亮,两边条纹明暗相间逐渐变暗,即能量大部分集中在中央亮纹。若减小单缝的宽度,则中央亮纹宽度及明暗条纹间距增大,反之则减小。对光的“限制”越厉害,光在这个方向上展开的也越厉害。眯起眼睛或通过羽毛、纱巾会见到“光芒”现象,就是光的衍射现象。

按照光源、衍射物、接收屏三者的相互位置可把衍射分为两种:当光源、接收屏与衍射物之间的距离有限时,这种衍射叫做菲涅耳衍射。当光源、接收屏都距衍射物无限远时,这种入射光和衍射光都是平行光的衍射称为夫琅和费衍射。

按照光源、衍射物、接收屏三者的相互位置可把衍射分为两种:当光源、接收屏与衍射物之间的距离有限时,这种衍射叫做菲涅耳衍射。当光源、接收屏都距衍射物无限远时,这种入射光和衍射光都是平行光的衍射称为夫琅和费衍射。

1.1.4 光的偏振

如果波的振动方向和波的传输方向相同的,该波称为纵波;若相互垂直,则该波称为横波。对横波来说,振动方向对于传播方向的不对称性叫做偏振,它是横波区别于纵波的一个最明显标志,只有横波才有偏振现象。而光波是电磁波,是横波,故它具有偏振性。

讨论光的作用时,只需考虑电矢量 E 的振动, E 称为光矢量, E 的振动称为光振动。光的横波性只表明电矢量与光的传播方向垂直,在与传播方向垂直的平面内还可能有各种振动状态,光矢量的某一确定的振动状态称为光的一种偏振态。

1.1.4.1 常见的偏振态

(1) 自然光:在垂直于光传播方向的平面上,光矢量在各个可能方向上的取向是均匀的,光矢量的大小、方向具有无规律性变化,这种光被称为自然光[如图 1-3(a)所示],也称为非偏振光。图中,圆点表示偏振光的振动面垂直于图面的线偏振光,双向箭头表示偏振光的振动面平行于图面的线偏振光。普通光源发出的光一般是自然光,不能直接显示出偏振现象。自然光可以沿着与光传播方向垂直的任意方向上分解成两束振动方向相互垂直、振幅相等、无固定相位差的非相干光[如图 1-3(b)所示]。

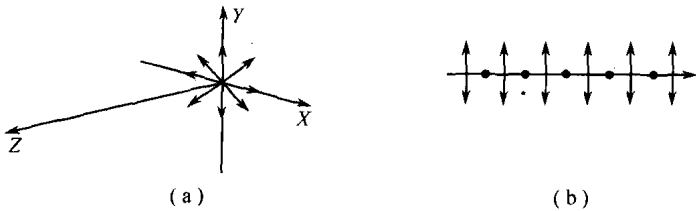


图 1-3 自然光

(2) 完全偏振光:如果光在传播过程中,电矢量的振动只限于某一确定平面内,则这种光称为平面偏振光。由于平面偏振光的电矢量在与传播方向垂直的平面上投影为一条直线,故又称为线偏振光(如图 1-4 所示)。线偏振光的光矢量端点的轨迹为直线,即光矢量只沿着一个确定的方向振动,其大小、方向不变。如果光矢量端点的轨迹为一椭圆,即光矢量不断旋转,其大小、方向随时间有规律的变化,则叫做椭圆偏振光。如果光矢量端点的轨迹为一圆,即光矢量不断旋转,其大小不变,但方向随时间有规律地变化,则叫做圆偏振光。圆偏振光是椭圆偏振光的一个特例。

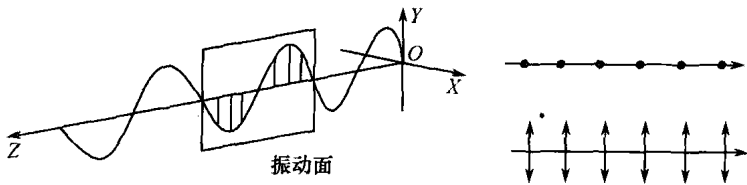


图 1-4 线偏振光

(3) 部分偏振光

在垂直于光传播方向的平面上,含有各种振动方向的光矢量,但光振动在某一方向更显著,具有这种特点的光称为部分偏振光,如图 1-5 所示。图(a)表示在图面内电矢量较强的部分偏振光;图(b)表示垂直于图面方向上电矢量较强的部分偏振光。通常用偏振度来度量偏振的程度,即

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1-2)$$

式中, $I_{\max}$ 为某一部分偏振光沿某一方向上所具有的能量最大值; $I_{\min}$ 为在其垂直方向上具有的能量最小值。自然光是偏振度等于 0 的光,反射光是偏振度最大的光。

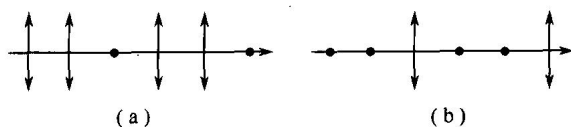


图 1-5 部分偏振光

1.1.4.2 马吕斯定律

用能吸收某一方向光振动的某些物质制成的透明薄片称为偏振片,偏振片的这一特殊方向称“偏振化方向”或“透振方向”。振幅为 A_0 的偏振光,垂直入射偏振片,从偏振片透出的是线偏振光,振幅为 $A_0 \cos \alpha$; 振动方向为平行于偏振片的偏振化方向;强度为 $I = I_0 \cos^2 \alpha$, 该式为马吕斯定律,即振幅投影定律,其中 α 为入射光矢量的振动方向与偏振片的偏振化方向的夹角。

1.1.4.3 反射和折射光的偏振,布儒斯特定律

自然光在两种各向同性介质的分界面上反射和折射时,在一般情况下反射光和折射光都是部分偏振光。当入射角满足 $\tan i_0 = n_2/n_1$ 时,则反射光是振动方向垂直入射面的线偏振光,折射光是部分线偏振光,折射光线与反射光线垂直(如图 1-6 所示),上式为布儒斯特定律。

1.1.4.4 双折射

一束自然光入射于单轴晶体时,会变成两束折射光,其中一束遵守折射定律的称为 o 光,另一束不遵守折射定律的称为 e 光,如图 1-7 所示。o 光、e 光都是线偏振光,o 光的振动方向垂直于 o 光的主平面,e 光的振动方向在 e 光的主平面内。

o 光和 e 光在晶体的光轴方向传播速率相等,在其他方向两者的传播速率不相等。

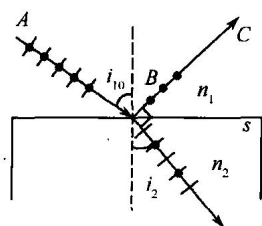


图 1-6 反射和折射光的偏振

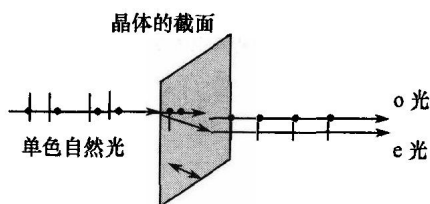


图 1-7 自然光在单轴晶体的双折射

1.1.4.5 波片

厚度为 d , 光轴平行于晶面的单轴晶片称为波片,线偏振光垂直入射波片上,折射光分解为 o 光和 e 光,若线偏振光振动方向与光轴成 α 角时

$$A_e = A \cos \theta, A_o = A \sin \theta \quad (1-3)$$

经过晶体后,e 光、o 光之间的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d \quad (1-4)$$

当 $\delta = 2\pi$ 时,称为全波片;当 $\delta = \pi$ 时,称为 $1/2$ 波片;当 $\delta = \pi/2$ 时,称为 $1/4$ 波片。所以,又把波片称为位相延迟片。

1.1.4.6 偏振光的干涉

在适当条件下,偏振光和自然光一样也可产生干涉现象。从干涉现象来看,与自然光的干涉现象相同,但实验装置不同:自然光干涉是通过分振幅法或分波阵面法获得两束相干光后进行干

涉;而偏振光干涉则是利用晶体的双折射效应,将同一束光分成振动方向相互垂直的两束线偏振光,再经检偏器将其振动方向引到同一方向上进行干涉。我们通过晶片和一个检偏器即可观察到偏振光干涉现象。偏振光的干涉可以分为平行偏振光的干涉和会聚偏振光的干涉两类。

分振动面的干涉装置如图 1-8 所示,M 和 N 是两个偏振片,C 是波片,单色自然光通过 M 变成线偏振光,线偏振光在波片 C 中分解为 o 光和 e 光,最后投影在 N 上,形成干涉。

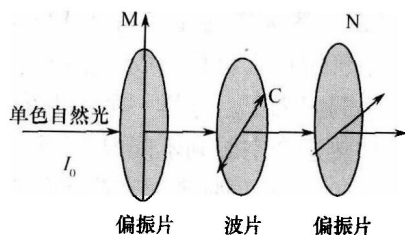


图 1-8 分振动面干涉装置

1.1.4.7 旋光性

当平面偏振光通过某种介质时,有的介质对偏振光没有作用,即透过介质的偏振光的偏振面保持不变;而有的介质却能使偏振光的偏振面发生旋转,即当偏振光通过某些介质后,振动方向绕着光传播方向转过一个角度,这种现象称为旋光现象,如图 1-9 所示。具有旋光性的物质称作旋光性物质或光活性物质。

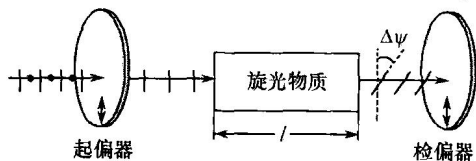


图 1-9 旋光现象

能使偏振光的偏振面向右旋的物质,称作右旋物质;反之,称作左旋物质。通常用“d”(拉丁文 dextro 的缩写,“右”的意思)或“+”表示右旋;用

“l”(拉丁文 laevo 的缩写,“左”的意思)或“-”表示左旋。偏振光的偏振面被旋光物质所旋转的角度,称作旋光度,用“ α ”表示。物质旋光性的大小可用比旋光度表示。

1.1.5 光的吸收、色散和散射

光的吸收、色散、散射都是光波与物质的相互作用过程。

光的吸收是指光波通过介质后,光强减弱的现象。物质对某些波长的光具有选择吸收性;若物质对某些波长的光的吸收特别强烈,则称为选择吸收。对可见光进行选择吸收,会使白光变为彩色光。绝大部分物体呈现颜色,都是其表面或体内对可见光进行选择吸收的结果。在无线通信中,就要考虑大气对电磁波的吸收问题。光纤对于某种波长的光波也具有强烈的选择吸收性。光的吸收和光波的波长有关,吸收随光波波长的变化就构成吸收光谱。

色散是介质的折射率 n 随光波波长 λ 变化的现象。介质的折射率 n 是随波长 λ 的增加而减小的色散称为正常色散。反常色散是介质的折射率 n 随着波长 λ 的增加而增加,与正常色散正好相反。

当光通过不均匀介质时,会偏离原来的方向而向四周传播,这种现象称为光的散射。散射光的频率等于入射光的频率,散射光中没有新频率的光产生,这类散射称为线性散射。散射光中除了入射光的频率或谱线之外,还有新频率的光或新谱线产生,这类散射称为非线性散射。拉曼散射和布里渊散射都属于非线性散射。

1.1.6 光的量子性

光的电磁理论成功地解释了光在传播过程中的反射、折射、干涉和衍射等宏观现象,但无法解释微观领域的一些实验现象(诸如黑体辐射、光电效应、康普顿散射等),这迫使人们对光的本性做进一步探索,从而导致了光的量子性概念的建立。对光的量子性的认识导致了激光

技术的发展,更导致了通信史上的革命。

1.1.6.1 黑体辐射和普朗克(Planck)量子假说

不管用什么材料制成一个空腔,如果在腔壁上开一个小洞,则射入小洞的光就很难有机会再从小洞出来了。这样一个小洞实际上就能完全吸收各种波长的入射电磁波而成为一个黑体。加热这个空腔到不同温度,小洞就成了不同温度下的黑体。

1900年,德国物理学家普朗克抛弃了能量是连续的传统经典物理观念,导出了与实验完全符合的黑体辐射经验公式。在理论上导出这个公式,必须假设物质辐射的能量是不连续的,只能是某一个最小能量的整数倍。普朗克把这一最小能量单位称为“量子”。普朗克假设如下:

黑体是由带电的线性谐振子所组成,物质中振子的能量不能连续变化,只能取一些分立值,这些分立值是最小能量 ϵ_0 的整数倍,即 $0, \epsilon_0, 2\epsilon_0, \dots, n\epsilon_0, \dots$,称为谐振子的能级(n 为量子数)。当谐振子从这些能级中之一过渡到其他能级时就发射或吸收辐射。频率为 ν 的谐振子的最小能量单元 ϵ_0 为

$$\epsilon_0 = h\nu \quad (1-5)$$

式中, ϵ_0 称为量子,也简称量子; h 为普朗克常数。

量子理论现已成为现代理论和实验的不可缺少的基本理论。普朗克由于创立了量子理论而获得了诺贝尔物理学奖。

1.1.6.2 光电效应和爱因斯坦(Einstein)量子假说

由于光的照射,使电子从金属中逸出现象称为光电效应。光电效应有如下规律:

- ① 光电子的发射几乎是瞬时的;
- ② 任何一种金属,都有一个极限频率 ν_0 ,只有当入射光的频率 $\nu > \nu_0$,才会发射光电子;
- ③ 光电子的最大初动能与入射光的强度无关,只随入射光的频率的增大而增大;
- ④ 当入射光频率 $\nu > \nu_0$ 时,光电流的强度与入射光的强度成正比。

为了解释光电效应现象,爱因斯坦于1905年提出了光量子假说:光是由一粒粒运动着的光子组成的,每个光子具有确定的能量,只能作为一个整体被吸收或产生。每个光子的能量 E 与光的频率 ν 成正比。即

$$E = h\nu \quad (1-6)$$

则可解释光电效应:①光照射金属时,一个光子的能量全部被电子吸收,电子的动能立即增大,不需要有一个积累能量的过程。②电子从金属表面逸出,需克服金属原子核的引力做功,逸出功为 W_0 ;③电子吸收光子的能量 $h\nu$ 后,一部分消耗于克服核的引力做功,即 W_0 ,另一部分转化为初动能。对于确定的金属, W_0 是一定的,故光电子的初动能随入射光频率的增大而增大;④入射光越强,单位时间内入射到金属表面每单位面积的光子越多,产生的光电子也越多。

1.1.6.3 光的波粒二象性

Planck-Einstein理论揭示了光的微粒性,但这并不否定光的波动性,因为光的干涉、衍射等现象完全证实了光的波动性。这样,光具有微粒和波动的双重性,这种性质称为光的波粒二象性。光的双重性没有能统一的反映出来,因为上述理论是在经典理论中加进了与经典理论不相容的假说(光量子)的原因,真正把光的波粒二象性统一地反映出来的理论是量子电动力学,它是在量子力学的基础上建立起来的。

1924年,路易·维克多·德·布罗意提出“物质波”假说,认为和光一样,一切物质都具有波粒二象性。根据这一假说,电子也会具有干涉和衍射等波动现象,这被后来的电子衍射试验

所证实。德·布罗意注意到原子中电子的稳定运动需要引入整数来描写,与物理学中其他涉及整数的现象如干涉和振动简正模式之间的类似性,构造了德·布罗意假设,提出正如光具有波粒二象性一样,实物粒子也具有波粒二象性。他将这个波长 λ 和动量 p 联系成:

$$\lambda = h/p \quad (1-7)$$

这是对爱因斯坦等式的一般化,因为光子的动量为 $p=E/c$ (c 为真空中的光速),而

$$\lambda = c/\nu$$

德·布罗意的方程三年后通过两个独立的电子散射实验被证实于电子(具有静止质量)身上。在贝尔实验室 Clinton Joseph Davisson 和 Lester Halbert Germer 以低速电子束射向镍单晶,获得电子经过单晶衍射后,测得的波长与德·布罗意公式一致。在阿伯丁大学,George Paget Thomson 以高速电子穿过多晶金属箔,获得类似 X 射线在多晶上产生的衍射花纹,确凿证实了电子的波动性;以后又有其他实验观测到氦原子、氢分子,以及中子的衍射现象,微观粒子的波动性已经被广泛地证实。根据微观粒子波动性发展起来的电子显微镜、电子衍射技术和中子衍射技术已经成为探测物质微观结构和晶体结构分析的有力手段。

1.1.7 相关方程组介绍

1.1.7.1 麦克斯韦方程

光波既然是一种电磁波,那么它必然要服从电磁场的基本规律,而一切宏观电磁现象应遵循的基本规律又是麦克斯韦方程组。因此,光波在光纤中的传输一定服从麦克斯韦方程组,即电磁场的基本方程。当用波动理论来研究光在光纤中的传输问题时,都是从麦克斯韦方程组出发的。麦克斯韦方程组主要由 4 个方程组成,第一方程称为全电流定律,是安培环路定律的推广;第二方程由法拉第电磁感应定律导出;另两个方程为电场和磁场的高斯定律。在麦克斯韦方程组中,第一方程和第二方程是最基本的方程,他们反映了电磁场量之间的相互区别和相互联系,反映了电场和磁场两个方面变化的主要特征。

下面列出麦克斯韦方程组的几种形式。

(1) 麦克斯韦方程组的积分形式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q \\ \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_S -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \\ \oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \end{array} \right. \quad (1-8)$$

它描述的是空间某一闭合曲线以及该曲线限定的曲面,或空间某一闭合曲面及该闭合曲面所包围的体积内的场源与场量之间的关系,考虑的是整体效应。积分形式的方程对求解某些复杂积分区域的问题,难以得到精确的解析解。随着计算机的发展和数值计算方法的成熟,很多难以得到精确解的问题,通过数值计算可得到满意的数值解。

(2) 麦克斯韦方程组的微分形式:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (1-9)$$

在电磁理论中,人们往往要了解场量在空间各点上的相互关系,微分形式的麦克斯韦方程组能给出空间各点场量之间及场量与场源之间的关系,它只适用于场域中媒质的物理性质不发生突变的点。

1.1.7.2 电磁波的波动现象和简谐时的波动方程

从麦克斯韦方程组可看出,时变电场可以激发出时变磁场;时变磁场又可以激发出时变电场(即物理学中的磁场变化会激发出感应电动势),如此不断地循环下去,变化电场和变化磁场之间就这样互相激发、互相支持,前者可以是后者的源。显然,这种过程中电磁场就可以脱离最初的激发源,而由变化电场和变化磁场互相激发,像波浪一样,一环一环地由近及远地传播出去,从而形成了电磁波的传播现象。

上面是从物理概念来解释电磁波的传播现象。但是,如果要定量地讨论光波(电磁波)的传播,就需要根据复数麦克斯韦方程组的微分形式推导出只有 E 或只有 H 的波动方程,即亥姆霍兹(Helmholtz)方程式。推导过程略,矢量的亥姆霍兹方程为

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} &= 0 \end{aligned} \quad (1-10)$$

在直角坐标系中,标量的亥姆霍兹方程为

$$\nabla^2 \Psi + k^2 \Psi = 0 \quad (1-11)$$

式中, k 是电磁波在自由空间传播时的相位常数,即电磁波每传播单位距离产生的相位变化。

1.1.7.3 导行波和辐射波

当存在两种不同媒质分界面时,在一定的条件下,电磁波的能量将被束缚在此表面上而沿表面传播。这时的电磁波可称为被导波,而此表面则构成一个波导。在微波系统中,这种能把电磁波能量从一处传送到另一处的装置称为导波系统。常用的导波系统有:① 波导管:由单根封闭的柱形导体空管构成,电磁波在管内传播,简称为波导,如矩形波导;② 传输线:由两根或两根以上平行导体构成,通常工作在其主模(TEM)或准横电磁波,故称为 TEM 波传输线,如同轴线;③ 表面波波导:由单根介质或敷介质层的导体构成,电磁波沿其表面传播,如微带线。

由传输线所引导的,能沿一定方向传播的电磁波称为“导行波”。导行波的电场 E 或磁场 H 都是 x 、 y 、 z 三个方向的函数。导行波可分成以下三种类型。

(1) 横电磁波(TEM波):TEM波的特征是电场 E 和磁场 H 均无纵向分量,亦即: $E_z = 0$, $H_z = 0$ 。电场 E 和磁场 H ,都是纯横向的。TEM波沿传输方向的分量为零。所以,这种波是无法在波导中传播的。

(2) 横电波(TE波):TE波即是横电波或称为“磁波”(H波),其特征是 $E_z = 0$,而 $H_z \neq 0$ 。亦即:电场 E 是纯横向的,而磁场 H 则具有纵向分量。

(3) 横磁波(TM波):TM波即是横磁波或称为“电波”(E波),其特征是 $H_z = 0$,而 $E_z \neq 0$ 。亦即:磁场 H 是纯横向的,而电场 E 则具有纵向分量。

TE波和 TM波均为“色散波”。矩形波导中,既能传输 TE_m 波,又能传输 TM_m 波(其中 m

代表电场或磁场在 x 方向半周变化的次数, n 代表电场或磁场在 y 方向半周变化的次数)。

平面波在同一种物质中是沿直线传播的,当遇到两种物质的交界面时,将产生反射和折射现象。若入射角大于临界角,则电磁波不再进入第二种物质,而由交界面全部反射回第一种物质,这种现象称为全反射。全反射是光纤通信中遇到的一个主要的物理现象。当平面波入射到两介质分界面,不满足全反射条件,形成部分反射。即一部分能量反射回介质 I 中,另一部分能量透射到介质 II 中,将这种波称为辐射波。

1.2 光纤通信的发展简况

一般来说,由一地(发送端)向另一地(接收端这一过程称为信号的调制)传送信息称为通信。通常是将需要传递的信息加载在某种载体(例如电磁载波)上进行传送(这一过程称为信号的调制),在接收端再将信息从载体上解调出来。通信的容量可用所能调制的频带宽度来描述,调制带宽又直接受载体(载波)频率的限制,载波频率越高,通信容量也越大。整个通信的发展过程是载波从长波长到短波长、从低频到高频,即从射频(Radio Frequency)到微波(Micro Wave)进而开拓光波频段,如图 1-10 所示。光载波的通信容量大约是微波的 10^5 倍,具有诱人的前景和实际意义,因此,通信向光通信进展是必然的。

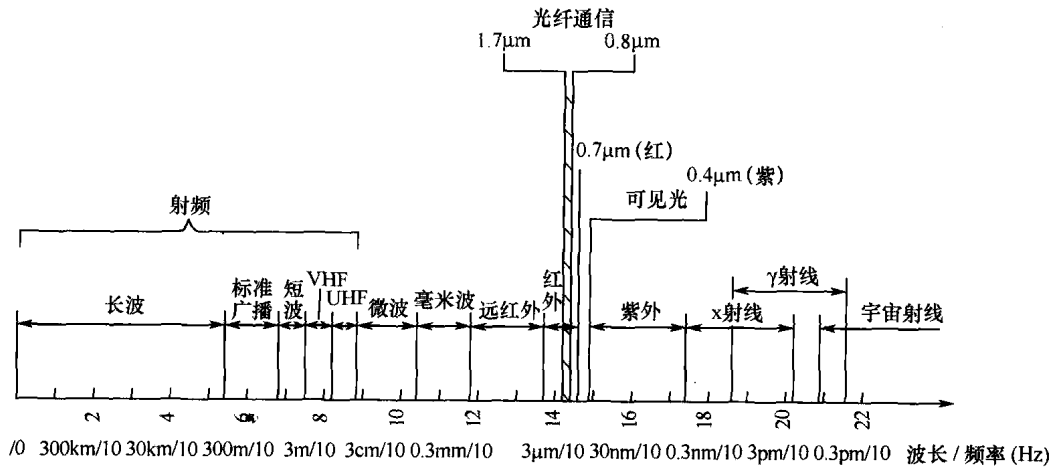


图 1-10 光纤通信在电磁频谱中的位置

从广义上讲,凡使用光作为通信手段的,都称为光通信。其频率位于远红外、红外、可见光和紫外光几个频区。光通信并不是一个全新的概念,其历史可以追溯到三千多年前,我国周朝使用烽火台的“烽火”目视光通信,此后,信号灯、旗语、信号弹甚至交通红绿灯等均是沿用这种利用可见光进行视觉通信方式,都可划入光通信的范畴。

现代光通信的概念是采用光波作为载波来进行信息传送的通信方式。从工作原理上说,它和目视光通信方式有很大的差别。严格地说,目视光通信不能视为真正的光通信。这样,光波通信的历史只能从 1880 年由美国贝尔(Alexander Groham Ball)发明“光电话”开始。他用阳光作为光源,通过振动镜将话音调制在光波上,即光的强度随话音而变化,在大气空间传输 200m 距离。在接收端,用硅光电池将光能转换成电流,实现解调,把电流送到受话器就可以听到发送端的话音。贝尔的光电话证明了利用光载波传递信息的可能性,连贝尔本人也说“光电话是我一生最伟大的发明”。但受当时技术条件的限制,主要是没有理想的相干光源和合适的传输媒质,使光通信沉睡了 80 年。