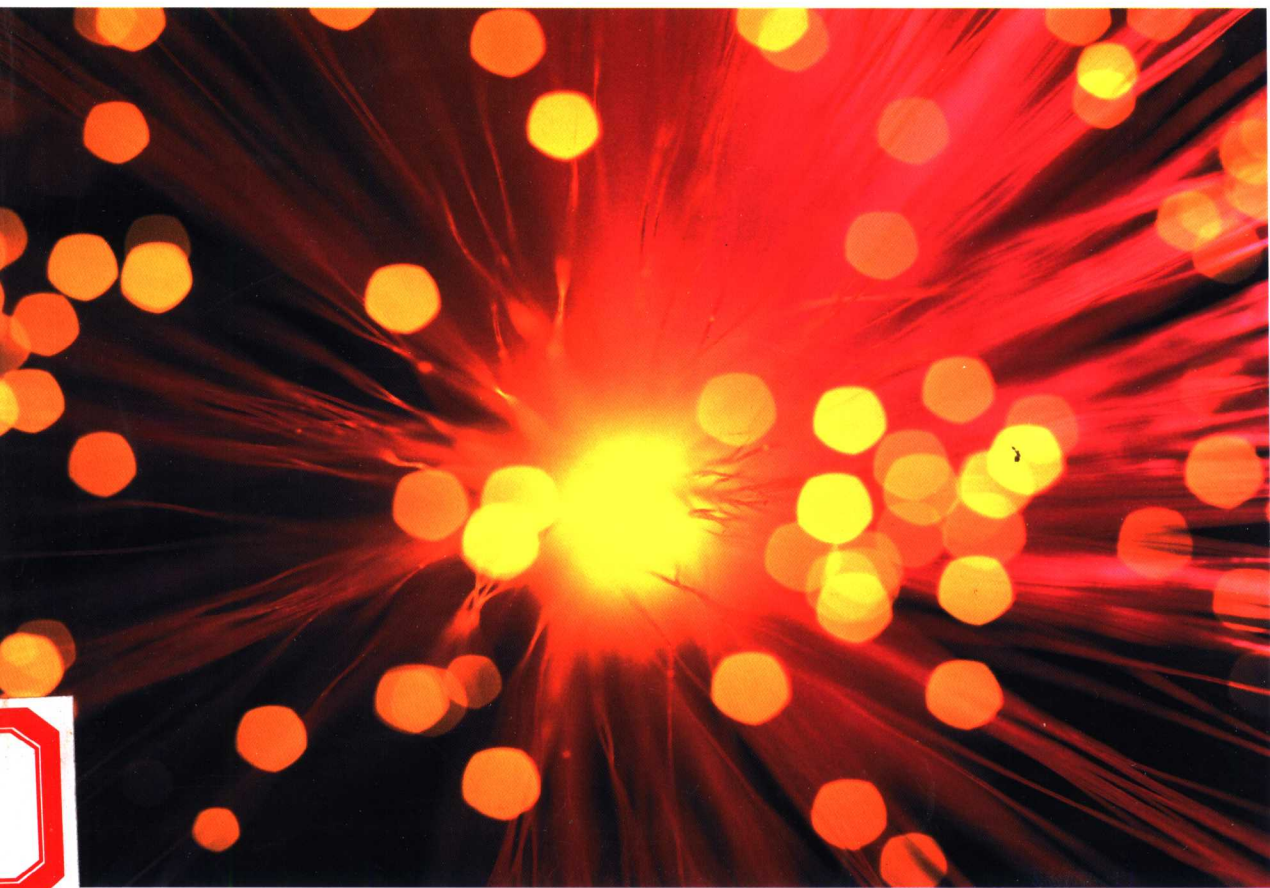


21 世纪高等院校教材

光电子技术基础

朱京平 编著



 科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材

光电子技术基础

朱京平 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统全面地介绍了光电子系统信息传递与处理各个环节的基本概念、基本原理与应用基础。本书一方面注重光电子技术基础内容,体现光电子技术全貌;另一方面适当加入了一些相关领域的近年研究、应用成果,使其更符合光电子技术迅速发展的要求。

本书可作为高等院校电子信息、电子科学与技术、光信息科学与技术等专业本科生或研究生教材,亦可作为相关专业科研人员和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

光电子技术基础/朱京平编著. —北京:科学出版社,2003

(21世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-011657-7

I. 光… II. 朱… III. 光电子技术—高等学校—教材 IV. TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 048125 号

策划编辑:巴建芬 / 文案编辑:邱 璐 贾瑞娜 / 责任校对:柏连海

责任印制:安春生 / 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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003年9月第一次印刷 印张:20

印数:1-3 000 字数:383 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

自 1960 年激光器问世以来,光电子技术呈现出勃勃生机。在信息化的 21 世纪,光电子与微电子组成信息技术两大支柱,21 世纪可称为光电子技术的世纪,因而培养和造就一大批掌握光电子技术基础知识、基本理论与基本技能,了解光电子技术最新发展动态的高级专业技术人才成为当今社会的迫切需要。学习“光电子技术基础”课程可以为今后从事现代信息光学、激光技术、光纤技术、光通信技术、光信号探测技术、光信息存储与处理技术、显示技术及光计算等方面学习与工作打下基础。

作者于 1997 年编著了《光电子学基础》讲义,该讲义注重基础知识、基本概念与物理描述,深入浅出,面向具有一般工科数理基础的本科生,受到学生的广泛好评。但在实际使用中也体会到原有内容从深度和广度上都欠完善,特别是随着国内外学校光通信无源器件、光存储、光显示方面研究工作的开展与不断突破,原有内容已难以适应学生发展的要求,为此我们在 4 届研究生和 7 届本科生的教学中,不断研究国内外有关方面的教材、专著、资料,吸收有用成分,充实有关内容,力图反映光电子技术的全貌,最终形成了本书。本书一方面注重双基知识学习,另一方面注重全面反映光电子系统中信息传输各个环节有关的技术基础内容,并加入一些有关领域的新成果,适于电子信息科学类电子科学与技术、光信息科学与技术本科及硕士生教学的需要,也希望能为对光电子学有兴趣的科研人员和工程技术人员提供有益的帮助。

全书共 9 章。第 1 章为绪论,扼要介绍光电子技术及其应用、光电子技术发展史及本书主要内容体系。第 2 章介绍学习光电子技术基础必备的光学知识。第 3~9 章系统介绍光电子系统的源、传输通道、信号加载、探测、显示、存储及光无源器件。每一章自成体系,从基本原理入手,系统诠释基本概念、基础知识、基本理论与相关技术。本科生学习时可根据先修课程情况及学习要求选用部分章节。每章后附有习题,供练习选用。

本书由朱京平编著,周英、陈耀辉、张孝良、唐锐歆、李阳等在插图、编排、校稿过程中做了不少工作,近几届本科生与研究生从学习角度对讲义提出了不少宝贵建议,本单位师长也给予了很多帮助,在编写过程中还得到西安交通大学电信学院、教务处以及教材科的热情鼓励与大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

本书被列为西安交通大学面向 21 世纪本科生系列教材,还得到国家自然科学基金“平面单片集成 $N \times N$ 互连路由光开关研究”、陕西省博士后基金“新型波分复用器研究”、国家教育振兴行动计划项目“海量信息技术”等的资助。

由于笔者水平有限,本书在内容取材、体系安排、文字表述等方面难免有所疏漏,敬请读者批评指正。

编著者

于西安交通大学

2002年12月

目 录

前言

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 光电子技术 | 1 |
| 1.2 光电子技术发展史 | 1 |
| 1.3 信息光电子技术与器件 | 3 |
| 1.4 光电子技术应用 | 4 |
| 1.5 本书主要内容 | 6 |
| 习题 | 6 |
| 第 2 章 光学基础知识与光场传播规律 | 7 |
| 2.1 光学基础知识 | 7 |
| 2.2 麦克斯韦方程 | 16 |
| 2.3 电介质 | 18 |
| 2.4 波动方程 | 21 |
| 2.5 光波的表示与传播特性 | 24 |
| 2.6 高斯光束 | 31 |
| 习题 | 37 |
| 第 3 章 激光原理与技术 | 39 |
| 3.1 相干光源、非相干光源与激光 | 39 |
| 3.2 光与物质相互作用理论——激光产生与传播基础 | 42 |
| 3.3 激光产生的条件 | 61 |
| 3.4 激光器的基本结构及输出 | 67 |
| 3.5 激光的特点 | 75 |
| 3.6 激光器的种类 | 77 |
| 3.7 激光脉冲技术 | 85 |
| 3.8 激光选模技术 | 90 |
| 3.9 激光稳频技术 | 92 |
| 3.10 其他激光技术 | 92 |
| 习题 | 93 |
| 第 4 章 光波导技术基础 | 95 |
| 4.1 平面介质光波导中的光传播与导引波、消逝波、波导 | 96 |
| 4.2 平面介质光波导中光导模的几何光学分析 | 100 |
| 4.3 平面介质光波导中光导波的物理光学分析 | 103 |
| 4.4 光纤——圆柱介质光波导 | 113 |
| 4.5 光纤中光导波的线光学分析 | 115 |
| 4.6 阶跃光纤中光导波的物理光学分析 | 118 |

| | |
|---|------------|
| 4.7 光纤色散与脉冲展宽 | 122 |
| 习题 | 131 |
| 第 5 章 光调制技术——光信息系统的信号加载与控制 | 133 |
| 5.1 晶体光学基础 | 134 |
| 5.2 光在晶体中的传播 | 138 |
| 5.3 电光调制 | 146 |
| 5.4 声光调制 | 162 |
| 5.5 磁光调制 | 173 |
| 习题 | 174 |
| 第 6 章 光电探测技术 | 176 |
| 6.1 光探测器性能参数 | 176 |
| 6.2 光电探测方式 | 178 |
| 6.3 光电探测的物理效应 | 182 |
| 6.4 光电探测器 | 189 |
| 习题 | 197 |
| 第 7 章 光电显示技术 | 198 |
| 7.1 光电显示技术基础 | 198 |
| 7.2 阴极射线显示 | 206 |
| 7.3 液晶显示 | 215 |
| 7.4 等离子体显示 | 225 |
| 7.5 场致发光显示 | 232 |
| 习题 | 237 |
| 第 8 章 光通信无源器件技术 | 238 |
| 8.1 光纤连接器 | 238 |
| 8.2 光衰减器 | 248 |
| 8.3 光耦合器 | 255 |
| 8.4 光波分复用器 | 262 |
| 8.5 光隔离器 | 268 |
| 8.6 光开关 | 272 |
| 习题 | 280 |
| 第 9 章 光盘与光存储技术 | 281 |
| 9.1 光存储与光盘 | 282 |
| 9.2 只读存储光盘 | 283 |
| 9.3 一次写入光盘 | 285 |
| 9.4 可擦重写光盘 | 289 |
| 9.5 光盘衬盘材料 | 296 |
| 9.6 光信息存储新技术 | 298 |
| 习题 | 312 |
| 参考文献 | 313 |

第 1 章 绪 论

1.1 光电子技术

光电子技术是光子技术与电子技术相结合而形成的一门技术。这里所说的电子技术包括真空电子技术、气体电子技术、固体电子技术等,它们研究电子的特性与行为及其在真空或物质中的运动与控制;而光子技术研究光子的特性及其与物质的相互作用以及光子在自由空间或物质中的运动与控制。二者相结合的光电子技术主要研究光与物质中的电子相互作用及其能量相互转换的相关技术,以光源激光化、传输波导(光纤)化、手段电子化、现代电子学中的理论模式和电子学处理方法光学化为特征,是一门新兴的综合性交叉学科。它将电子学使用的电磁波频率提高到光频段,产生了电子学所不可能实现的许多功能,成为继微电子技术之后兴起的又一门高新技术,并与微电子技术共同构成信息技术的两大重要支柱。

1.2 光电子技术发展史

有关光电子技术的发展历史有两种看法:一种认为应从 19 世纪 70 年代电光源及光电探测装置的发明算起,另一种认为应从 1960 年激光器发明算起。

很多人比较倾向第二种看法。原因在于:从 19 世纪 70 年代到 1960 年这一阶段,虽然对光电现象的研究已经有了相当的成就,也出现了不少实用的光电子器件,但光学与电子学仍然是两门独立的学科,因而只能算作光电子学与光电子技术的孕育期。

随着 1960 年激光的出现,光电子技术有了一个强有力的研究武器,从而开始了其日新月异的发展。

20 世纪 60 年代,光电子技术领域最典型的成就是各种激光器的相继问世。1960 年,美国的梅曼研制成功世界上第一台激光器——红宝石激光器,这一突破在科技界引起了轰动,并形成了连锁反应,在短短的几年时间内,氦氖激光器、半导体激光器、钕玻璃激光器、氩离子激光器、二氧化碳激光器、YAG 激光器、化学激光器、染料激光器等固体、气体、液体、半导体激光器相继出现,这些激光器为光与物质相互作用的研究提供了一个崭新的、极其有效的工具。技术上的重大突破,也引发了对光与物质相互作用过程研究的空前活跃,导致了激光物理学、半导体光电子学、导波光学、非线性光学和相干光学等一系列新学科的涌现。而激光的应用,特别是军事应用,从第一台激光器问世就开始了。1961 年,第一台激光测距机问世,

其后,各种激光制导武器、激光致盲武器、激光毁灭性武器等相继研制成功,激光可控核聚变等也在不断成熟中。

20世纪70年代,光电子技术领域的标志性成果是低损耗光纤的实现、半导体激光器的成熟以及 CCD 的问世。1970年,美国研制成功损耗为 20dB/km 的石英光纤和室温连续运转的半导体激光器,这些重要突破,导致以光纤通信、光纤传感、光盘信息存储与显示以及光信息处理等为代表的光信息技术蓬勃发展。有关成果不仅从深度和广度上促进了相应各学科,特别是半导体光电子学、导波光学和非线性光学的发展和彼此之间知识的相互渗透,而且还和数学、物理学、材料学等基础学科交叉,形成新的边缘领域,如:半导体超晶格量子阱理论与技术、纤维光学技术等。技术发展的同时,应用也在展开:70年代中后期,日本、美国、英国开始建设光纤通信骨干网,1972年荷兰飞利浦公司演示了其模拟式激光视盘,70年代初美国激光制导炸弹投入使用。

20世纪80年代,人们对超晶格量子阱结构材料和工艺的深入研究,导致了超大功率量子阱阵列激光器的出现;对量子阱结构材料的非线性光学研究,使得以往只有在强激光作用下的介电材料中才能观察到的非线性光学效应,发展到在弱光激发的量子阱材料中也可以观察到很强的三次非线性,从而导致半导体光学双稳态功能器件的迅速发展;对光纤物理特性的深入研究,出现了利用光纤的偏振和相位敏感特性制作的光纤传感器;对光纤非线性光学效应和色散特性的研究,形成了光孤子概念,进一步推动了对特种光纤的研究,并于80年代末研制成功了掺稀土的光纤放大器与光纤激光器。应用方面,80年代初,日、美、英等国的光纤通信骨干网相继建成,其他国家也竞相开始自己的光纤干线网建设;1982年,第一台数字式激光唱机诞生。

20世纪90年代,光电子技术在通信领域取得了极大成功,无论是器件还是系统,均有大量产品走出实验室,形成了光纤通信产业:海底光缆铺设、各国新铺设的通信骨干网纷纷实现光纤化,并向城域、区域网发展;各国光电子器件研制取得了实质性进展,半导体激光器已走向产业化,出现了分布反馈激光器;光无源器件得到长足发展,光纤耦合器、衰减器、放大器、隔离器、光开关、波分复用器等实用化,大大扩展了通信容量以及光通信在通信领域中的份额,使互联网深入到千家万户;光纤光栅等研究取得重大进展。到1998年3月,美国单根光纤的传输容量已经达到 TB/s,并已尝试光纤入户。另外,光电子技术在光存储方面也取得了很大进展,光盘已成为计算机存储数据的重要手段,CD、VCD已深入到千家万户,DVD也于90年代中期走向家庭。光计算机的研究也开展了起来,加拿大多伦多大学等都报道了其光计算机研究的重大进展。

21世纪,我们正在步入信息化社会,信息与信息交换量的爆炸性增长对信息的采集、传输、处理、存储与显示都提出了严峻的挑战,国家经济与社会的发展、国防实力的增强等都更加依赖于使用信息的广度、深度和速度,而这取决于我们获

取、传输、处理和存储信息的速度。随着现代科学技术的迅速发展,在空间科学、现代防御体系、生命科学、遥感及管理科学等领域中都拥有巨量科学信息,需要在有限的时间、空间,甚至实时地进行准确处理。以智能化超高速计算机系统和全光网为代表的超高速、超大容量信息处理和传输将成为未来信息科学发展的两个重大方向。这一战略目标向微电子提出了挑战,因为微电子技术受分布电容影响,难以突破纳秒的门槛,在实现超高速、超大容量、超低功耗的集成系统方面遇到了根本的困难;另一方面,光存储也在向超高密度、超大容量方向发展,达到或超过光的衍射极限(达到纳米量级)的高密度光存储技术和超大容量三维体存储技术,是研究和开发的热点;而光显示逐渐呈现出等离子体显示(PDP)、液晶显示(LCD)、场致发射显示(EL)等平板显示取代阴极射线管(CRT)显示的趋势。

1.3 信息光电子技术与器件

电子技术经过 100 多年发展已产生了完善的电子器件,并已实现了高度集成化,而光电子技术从激光出现以来仅有 40 多年历史,正在发展期,有关器件尚不完善,集成化也仅在探索之中,发展空间很大。

信息光电子系统按信息传递的各个环节划分,应包括光电子发射源、光的控制或信号加载模块、光信号的传输体系、光信号的接收和处理装置等几个基本部分,每一部分均需大量的光电子器件以实现其各自的功能,由此将光电子器件分为光

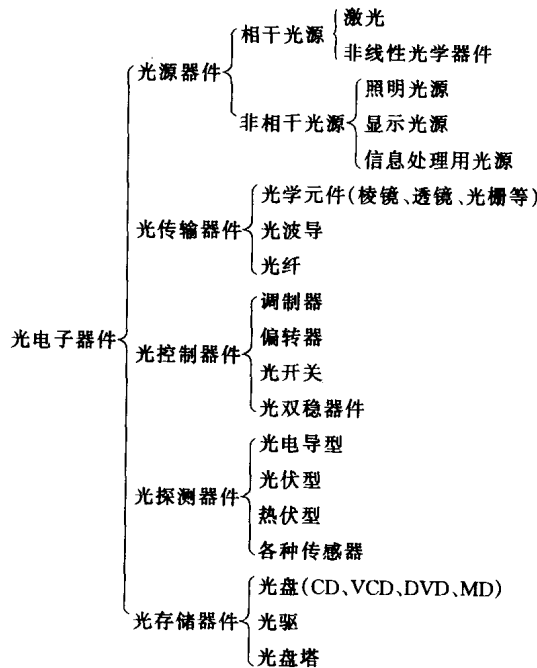


图 1-1 光电子器件

源器件、光调制器件、光传输器件、光探测器件、光显示器件、光存储器件等,如图 1-1 所示。在信息光电子技术中,光源主要指各种激光器,特别是半导体激光器;光调制器件涉及开关、偏转、调制、传感和复用等功能;光传输器件包括光波导、光纤、光耦合器、光隔离器、偏振器、中继和反馈器件等部分;光探测和显示技术涉及光信号的解调、整形、放大、探测和显示等;光存储主要指信息的写入、保留、读出等;有关技术包括光盘技术、光读写技术、存储格式问题等。

1.4 光电子技术应用

从光电子技术研究初期开始,人们就在不停地探索其应用价值,而且军事应用被优先考虑,并投入了大量的人力、物力和财力。20 世纪 50 年代末,美军将光电探测器用于代号为响尾蛇的空-空导弹,取得了明显的作战效果,之后,美、英、法等国相继开发了中波($3\sim 5\mu\text{m}$)和长波($8\sim 10\mu\text{m}$)红外多元探测器组件、红外焦平面阵列等,广泛应用于夜视、侦查、观瞄、火控、制导等系统;1961 年,第一台激光测距仪问世,20 世纪 70 年代初,美军在侵越战争中用激光制导炸弹一举摧毁了曾用普通炸弹付出很大代价都没有炸毁的一座桥梁,当时还盛传美军准备在越南战场使用激光致盲武器,谋求取得心理威慑作用。

现在,激光器的波长覆盖了从软 X 射线到远红外的各个波段,最高的峰值功率可达 10^{14}W 量级,最高平均功率达到兆瓦级,最窄脉宽达 10^{-15}s 量级,最高频率稳定度达 10^{-15} ,调谐范围从 190nm 到 $4\mu\text{m}$,同时其结构、工艺日趋成熟,稳定性、可靠性和可操作性显著改进,成为由战士、工人、医生和其他专业人员等稍加训练即可运用自如的仪器设备或工具,而不再需要专业工程师精心操作和维护了。

总之,光电子技术具有许多优异的性能特征,这使得它具有很大的实用价值,概括如图 1-2 所示。

1) 光纤通信:光波与电波相比近乎无限的带宽,以及光纤微小的传输损耗,使其在长距离、大容量、超高速通信和信息处理中成为主体。

2) 光存储:半导体激光器小巧、驱动功率小、可以聚焦到衍射极限大小的微光斑,可以制成小型、大容量的光存储装置,而光的并行性又有利于二维、三维图像信息的存储与处理。

3) 光计算:利用弱光激发三次非线性等现象实现光学双稳,在光计算上有重要价值。

4) 在线检测:利用光波具有直线传播性质和定向性,可以进行非接触式测量和控制,即使在有电磁场感应噪声的环境中也可以进行有效的传输、测量和控制,并可实现在线检测。

5) 危险环境测量:随着光纤技术的发展,现在可以利用光纤直接对机器进行信息的传输、测量和控制,即使在使用高压电的机器内和外围设备上也不致引起绝

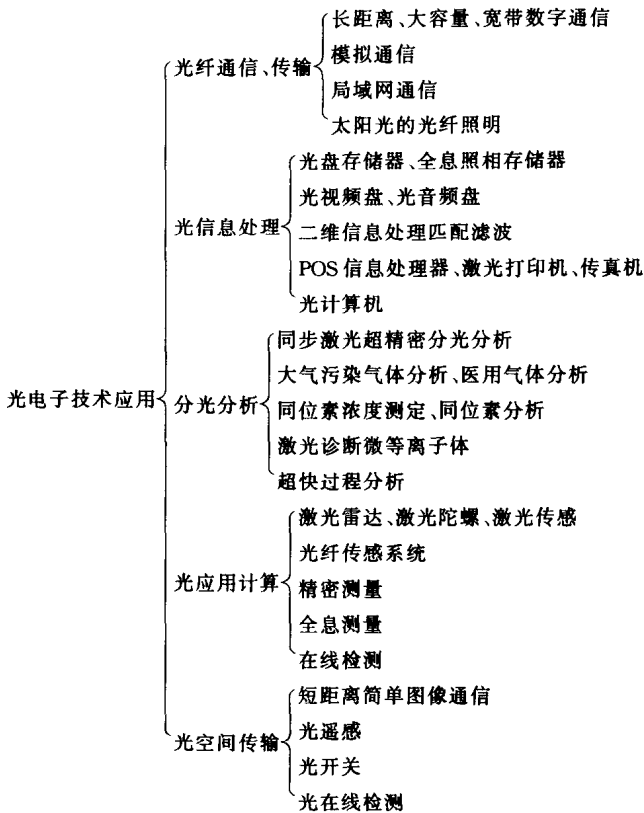


图 1-2 光电子技术的应用

缘的破坏,而且在易爆的气体、液体、固体等物质或环境中都没有产生电火花的危险性,这就从根本上可以安全地进行通信、测量和控制。

6) 激光医学:光纤的耐热、耐潮性高,芯径细,柔性好,使得人体血管、内脏、机器内部测量成为可能;焦点小,适合做角膜焊接、激光碎石等;热效应好,适合做穴位治疗仪等。

7) 激光加工:激光的方向性好,能量密度极高,可以方便地实现激光加工,进行切割、打孔、焊接等。高强激光还可用于激光可控核聚变等。

8) 军事应用:光电子技术可用于精密制导、毁灭性武器、瞄准、跟踪、监测、频谱分析等等。

9) 遥测遥感:激光不仅可以改变振幅、相位、偏振,而且可以改变频率,因而可以进行物质的光谱分析,以此进行遥感测量。

10) 光传感:利用光波的直线传播性质、光调制的非接触性、光纤的柔韧性以及各种光调制性质,可以制作温度、湿度、位移、加速度光传感器,特别是小型轻便的光纤型传感器备受瞩目。

11) 精密计量:光波长为微米量级,就此可以进行长度、时间等精密计量。

1.5 本书主要内容

本书主要有以下内容:

第1章为绪论部分,介绍光电子技术概念、发展史、光电子器件、光电子技术的应用等。

第2章复习本课程学习所必备的光学基础知识,并总结有关光的电磁理论与波动光学的有关知识。

第3章研究光电子系统的源——激光,包括激光原理与激光技术。

第4章学习光电子系统中光的传输通道——光波导有关基础知识,包括光在平板介质波导与光纤中的传播。

第5章为光电子信号加载的有关技术——光调制技术,重点学习晶体光学与光调制基础。

第6章是光电子系统接收端有关技术——光探测技术。

第7章为光电信号显示技术基础。

第8章学习光通信光无源器件技术,主要包括光纤连接器、光衰减器、隔离器、光开关、波分复用器等基本知识。

第9章讲授光信号存储,特别是光盘存储的有关知识。

习 题

1. 光电子器件按功能分为哪几类? 每类大致包括哪些器件?
2. 谈谈你对光电子技术的理解。
3. 谈谈光电子技术各个发展时期的情况。
4. 举出几个你所知道的光电子技术应用实例。
5. 据你了解,继阴极射线管显示(CRT)之后,哪几类光电显示器件代表的技术有可能发展成为未来显示技术的主体?

第 2 章 光学基础知识与光场传播规律

本章旨在回顾信息光电子技术基础课程学习中所需的一些光学基本知识,系统概括总结有关光的基本属性与波动光学的有关内容。

2.1 光学基础知识

2.1.1 光的基本属性

17 世纪中期,有关光属性的两种学说——胡克和惠更斯的波动学说以及牛顿的粒子学说——都得到了发展,接下来的 100 多年中,许多学者的进一步观测支持了波动学说,尤其是 1864 年麦克斯韦(Maxwell)建立了普遍电磁波方程,并通过方程式证明了横向电磁波的存在,还推导出了光波在真空中的传播速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2-1)$$

式中, μ_0 为真空中的磁导率, ϵ_0 为真空中的介电常量。这一学说给出了在极宽频率范围内产生电磁波的前景。20 年后,赫兹第一次在实验上证实了光波就是电磁波,肯定了麦克斯韦的理论。表 2-1 给出了电磁波谱及其主要产生方式。

表 2-1 电磁波谱及其主要产生方式

| 电磁波谱 | 真空中的波长 | 频率/Hz | 主要产生方式 | 本质 | |
|-------------|---------------------------|--|-------------------------------------|---------------|--|
| 无线电波 | 长波 | 3~30km | $10^4 \sim 10^5$ | 由振荡电路所产生的电磁辐射 | |
| | 中波 | 200m~3km | $10^5 \sim 1.5\text{M}$ | | |
| | 短波 | 10~200m | 1.5M~30M | | |
| | 超短波 | 1~10m | 30M~300M | | |
| | 微波 | 1mm~3m | 100M~300G | | |
| | 亚毫米波 | 0.1~1mm | 300M~3T | | |
| 红外线 | 0.76 μm ~0.6mm | 500G~400T | 由炽热物体、气体放电或其他光源激发分子或原子等微观客体所产生的电磁辐射 | 外层电子跃迁 | |
| 可见光 | 0.40~0.76 μm | 400T~750T | | | |
| 紫外线 | 0.03~0.40 μm | 750T~ 10^4T | | | |
| X 射线 | 0.1nm~0.03 μm | $10^4\text{T} \sim 3 \times 10^6\text{T}$ | 用高速电子流轰击原子中的内层电子而产生的电磁辐射 | 内层电子跃迁 | |
| γ 射线 | 1.0pm~0.1nm | $3 \times 10^6\text{T} \sim 3 \times 10^8\text{T}$ | 放射性原子衰变或用高能粒子与原子核碰撞时所发出的电磁辐射 | 原子核衰变或裂变 | |

可见,光波与电波虽然同是电磁波,但其产生的本质原因不同,因而波长(频率)相差很大,且频率越高,粒子性与波动性相比越加明显;另外,电波的波导由金属导体构成,而光波的波导是由电介质构成的。

波动学说成功地将光归结为一种横电磁波,但是直到与真正电波电源一样相位一致的激光出现以前,光只是杂乱无章的、相位不整齐的噪声光,一般人根据经验很难相信光是一种横电磁波的说法。激光的出现,促进了人们对光本质的直观认识。但波动学说虽能解释光的干涉、衍射、偏振等现象,而用在能量交换场合,如光的吸收与发射、光电效应等场合,就完全失效了。

量子学说将光看做一群能量零散的、运动着的粒子,爱因斯坦提出用光频率 ν 与普朗克常量 h 的乘积所得的能量值 $h\nu$ 作为最小单位,认为光是以 $h\nu$ 的整数倍发射与吸收的,这种最小单位称为光子。量子学说可以合理地解释光的吸收、光的发射与光电效应等现象。

综上所述,迄今为止,说到光的本质,粒子性与波动性各有其存在合理性,因而通常称光具有波粒二象性。

2.1.2 折射、反射、全反射

光波射在镜面上会发生反射,射在介质界面上会发生反射、折射或全反射。这些物理现象均遵从界面波前匹配、相位相等的原则。如图 2-1 所示,设界面法线方向为 x 方向,与入射面垂直的方向为 y 方向,若一波矢为 k_1 的光以入射角 θ_1 从折射率为 n_1 的介质中射入折射率为 n_2 的介质,折射波波矢为 k_2 ,折射角为 θ_2 ,反射波波矢为 k_1' ,反射角为 θ_1' ,则在界面上所有点均满足

$$k_1 \cdot r = k_2 \cdot r = k_1' \cdot r \quad (2-2)$$

式中, r 为方位矢量,定义为: $r = xe_x + ye_y + ze_z$, e_x 、 e_y 、 e_z 分别为 x 、 y 、 z 方向单位矢量。

由式(2-2)可推导出反射定律与折射定律。

光波射在镜面或介质界面上时,会有光波发生折回原介质中的方向转折过程,称为光的反射,如图 2-1(a)所示,满足反射定律:

- 1) 反射光位于入射光与界面法线所决定的平面内;
- 2) 反射角等于入射角,即

$$\theta_1 = \theta_1' \quad (2-3)$$

光波射在介质界面上时,一部分光波会被界面反射(遵从反射定律),另一部分光波则通过界面后发生前进方向改变的折射现象,如图 2-1(b)所示,折射光线满足如下定律:

- 1) 折射光线位于界面法线与入射光线所决定的平面内;
- 2) 折射角满足

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2-4)$$

当 $n_1 > n_2$ 时, 逐渐增大 θ_1 角会发现, 当 θ_1 增加到 θ_c 时, 如图 2-1(c) 所示, $\theta_2 = 90^\circ$, 其中 θ_c 满足

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-5)$$

当 $\theta_1 > \theta_c$ 时, 入射光的能量全部被界面反射回光密介质, 这种现象称为全反射, 如图 2-1(d) 所示。

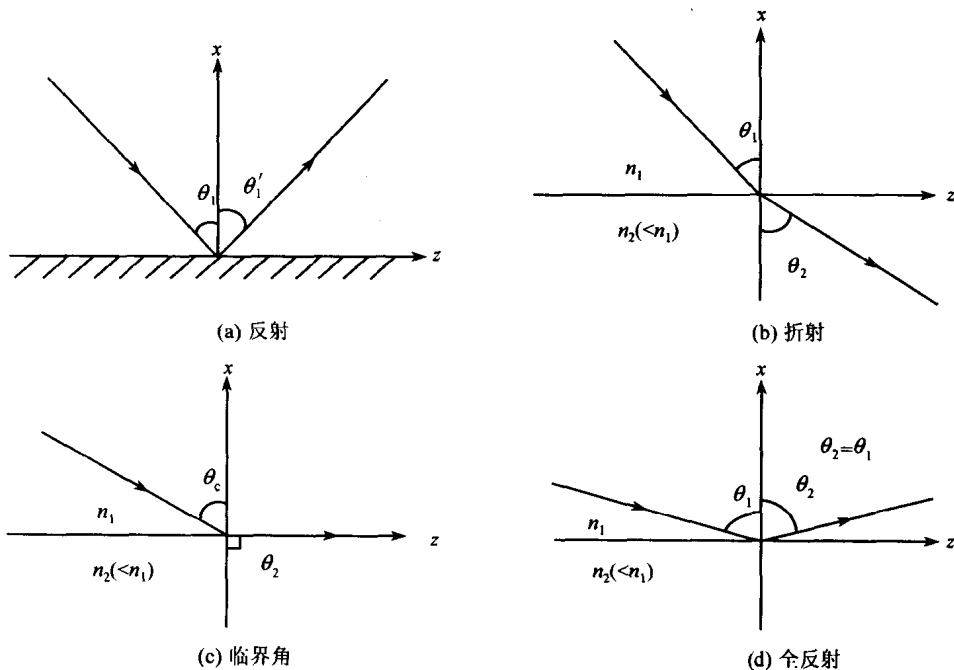


图 2-1 反射、折射与全反射

2.1.3 光的独立传播原理

几列波在空间某点相遇后, 仍保持各自的特性(频率、波长、振幅、偏振)不变, 按照各自原来的方向继续传播, 相遇点的电场为各波在该点单独作用的电场的矢量和, 这就是所谓的光的独立传播原理。

任一频率为 ω 的空间平面波可表示为正弦函数形式

$$E_i = E_{0i} \sin(\omega t - kz + \varphi_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (2-6)$$

多波叠加的结果为

$$E = \sum_i E_i = E_0 \sin(\omega t - kz + \varphi) \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (2-7a)$$

式中

$$E_0^2 = \left(\sum_i E_{0i} \cos \varphi_i \right)^2 + \left(\sum_i E_{0i} \sin \varphi_i \right)^2$$

$$= \sum_i E_{0i}^2 + \sum_i \sum_j E_{0i} E_{0j} \cos(\varphi_j - \varphi_i) \quad (i \neq j) \quad (2-7b)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\sum_i E_{0i} \sin \varphi_i}{\sum_i E_{0i} \cos \varphi_i} \quad (2-7c)$$

如果光来自各自完全独立的光源,则 $(\varphi_j - \varphi_i)$ 将随机变化,但 $\cos(\varphi_j - \varphi_i)$ 平均值为0,于是合成场强为 $E_0^2 = \sum_i E_{0i}^2$,这种光源称为非相干光源。

若来自各光源的光不仅 ω 相同,而且相位关系维持不变,则所涉及各光源称为相干光源。多个相干光源照射时,其光场叠加形成干涉花纹。

当全部相干光源间保持相位相同或为 2π 的整数倍时,有

$$I = \left(\sum_i E_{0i} \right)^2 \quad (2-8)$$

当频率相同、传播方向相反的两个波

$$E_1 = E_0 \sin(\omega t + kz) \quad (2-9a)$$

$$E_2 = E_0 \sin(\omega t - kz) \quad (2-9b)$$

叠加时(即入波与返波叠加),则有

$$E = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos kz \sin \omega t \quad (2-10)$$

可见合成波为驻波。

2.1.4 偏振

1. 线偏振与部分偏振

如果空间传播的电磁波,其电场矢量在某一特殊的平面内振动,就称这种电磁波为平面偏振波或线偏振波。许多实际的光束都是由许多个别的光波合成的,而一般情况下这些个别光波的电场矢量取向都是任意的,于是合成光波方向不断变化,因而光束是非偏振的。由于一般光源包含各个方向上平均振幅相等的电场矢量,因而称为自然光。而部分偏振光可以看成是偏振光和非偏振光的混合,用偏振度来描述。

由自然光得到偏振光的过程称为起偏,所用器件为起偏器;如该器件用来检验某一光束是否为偏振光,则称之为检偏器。常见起偏方式有以下几种:

(1) 基于晶体双折射原理的起偏

这是最有效的一种起偏方式,将在晶体光学与光调制中学习。

(2) 布儒斯特(Brewster)角起偏

这是利用光在界面上的反射与吸收过程获得偏振光的一种起偏方式。如图2-2所示,当自然光入射到折射率分别为 n_1 、 n_2 的两种介质界面上时,若将入射光