



21世纪高职高专电子信息系列规划教材

激光基础

北京希望电子出版社 总策划

王 臻 主 编

施亚齐 副主编

张雅娟 罗 威 许胜辉 编 著

 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书主要讲述了激光基本原理和基本技术应用。内容包括激光的基本原理、光学谐振腔理论、典型激光器及其特点、激光基本技术及激光特性改善与控制技术、对激光在工程技术上的应用也作了简要介绍。

本书内容全面,语言通俗易懂,注重理论与实践相结合,实用性强,可作为高职高专院校光电电子技术类基础课程的教材,也可供从事激光工作的研究人员、技术人员以及高等院校有关专业的师生参考。

需要本书或需要得到技术支持的读者,请与北京中关村 083 信箱(邮编:100080)发行部联系,电话:010-82702660, 010-82702658, 010-62978181 转 103 或 238, 传真:010-82702698, E-mail: tbd@bhp.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

激光基础/王臻主编. —北京:科学出版社, 2005.5

21 世纪高职高专电子信息系列规划教材

ISBN 7-03-014766-9

I. 激... II. 王... III. 激光—基本知识

IV. TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 134133 号

责任编辑:王玉玲 / 责任校对:佳 宜
责任印刷:媛 明 / 封面设计:梁运丽

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>

北京市媛明印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
2005 年 5 月第一次印刷 印张: 9 3/4
印数: 1-3 000 册 字数: 217 000

定价: 18.00 元

21 世纪高职高专电子信息系列规划教材

编 委 会 成 员 名 单

主 任：杨坤涛 马必学 安志鹏 陆卫民

副主任：张学礼 姚建永 李 旭 王 臻

编 委：（排名不分先后）

郑明红 贺占魁 熊 绪 王建庄 唐汝元

魏少峰 程远志 陈元芳 汪建立 杨殿生

金 鸿 王 蓉 李 丽 杨 凡 陈华林

王 立 李建利 韩全力 刘明伟 全卫强

序

进入21世纪,随着科技进步,高新技术已成为当前的热门话题。光电子技术以其独特的功能应用在各行各业之中,人们给予高度的关注,该专业各层次人才的需求量越来越大。作为高职院校,我们有义务也有必要担负起该专业人才培养的责任。2001年在华中科技大学专家的指导下,以武汉中国光谷为依托,武汉职业技术学院在全国高职院校率先开办光电子技术专业。2004年6月,武汉职业技术学院电信学院与北京希望电子出版社通力合作,邀请了国内20多所高职院校的专家和学者,成功举办了高职光电子技术专业教学与教材研讨会,并取得圆满成功,与会专家一致认为,培养光电子技术专业人才有着广泛的就业市场,当务之急是建设适合本专业的系列教材。

为此,武汉职业技术学院电信学院经过大量的市场调研,听取专家意见,最后在原有自编教材的基础上推出系列光电子技术专业教材,本系列教材以最大限度地满足社会应用型人才综合能力的要求为价值取向。课程体系以能力为主线,以能力训练为轴心,淡化普通文化课、技术基础课和专业课的界限,重新整合课程。强化基本职业能力训练,综合开发学生的职业能力;强化学生创新意识、创新精神和创新能力的培训,提高学生对就业上岗和职业变化的适应力。增加课程的灵活性,形成模块化、弹性化的课程体系,在整体上适应行业和社会对人才规格多变的需求。本套教材填补了国内高职光电子类专业教材的空白。

作为一种尝试和探索,难免存在这样或那样的问题,望广大从事光电子技术教育和应用的科技工作者,不吝赐教,提出宝贵意见。

吴志明

前 言

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下,各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,特别是正在兴起的光电子技术专业,不少院校尚在借用本科教材,教材建设仍落后于高职高专发展的教育需要。因此,为了做好全国高职院校光电子技术专业教材的规划和出版工作,根据国家教育部制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》,我校组织有关高职院校、出版社、各专业教学指导委员会,总结了前三轮本教材初稿的使用过程中的经验,并借鉴参考其他相关专业教材,我校出版了《激光基础》这本教材。

本教材是由编者申报,经各学校和出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我们与各专业指导委员会、出版社协商后审批确定的。本教材是在高职院校光电子技术专业教学急需、尚无适用的正式教材情况下,优先列于高职教材规划。

本教材包括激光基础最基本的 6 部分内容:激光概论、激光产生的基本原理、光学谐振腔、典型激光器、激光基本技术,以及激光在工程技术上的应用。在介绍基本原理和技术时,力求做到概念准确、内容精炼、重点突出,注重理论联系实际,注重方法论的叙述;在讲解上,力求做到通俗易懂、便于自学。书中给出了相应的习题,以帮助学生掌握和巩固所学知识。

本书可供高等职业技术学院、高等工程专科、成人高等学校光电子技术类、通信技术类、激光测量类专业作为教材使用,也可供有关科技人员和相近专业的本科学生、自学考试人员参考。

本书大纲由武汉职业技术学院王臻副教授起草。本教材第 1、2 章由张雅娟编写,第 2 章由罗威编写,第 3、4 章由许胜辉编写,教材绪言和第 5、6 章由施亚齐编写。全书由王臻和施亚齐共同统稿、修改和定稿,施亚齐负责全书的绘图工作。

本书送审稿承蒙华中科技大学光电子工程系杨坤涛教授仔细审阅,提出了许多宝贵意见,在此表示深切地感谢。

本书的初稿经武汉职业技术学院、武汉交通职业学院、武汉铁路职业学院、襄樊职业技术学院、鄂州大学、九江职业学院、南京职业学院、南阳高等专科学校试用后,提出了许多宝贵意见,对本书的修改帮助很大,对于所有提出意见的同志,在此表示衷心地感谢。另外,本书在编写过程中,也参阅了一些编著者的著作和文章,在此也谨向他们表示诚挚地感谢。

纵然如此,限于编者的水平和经验,本教材的编审,出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材、教师、学生和其他广大读者提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为高职光电子技术类专业教材建设服务。

编 者

目 录

绪言.....	1	第3章 光学谐振腔.....	39
第1章 激光概论.....	3	3.1 光学谐振腔的稳定条件.....	39
1.1 准备知识.....	3	3.1.1 光学谐振腔概述.....	39
1.1.1 光的波粒二象性.....	3	3.1.2 共轴球面腔的稳定条件.....	39
1.1.2 光的电磁波理论.....	4	3.1.3 共轴球面腔分类及稳定性图.....	40
1.1.3 电磁波谱.....	6	3.2 光学谐振腔的模式.....	42
1.2 光的能量及量度物理量.....	7	3.2.1 谐振腔的纵模.....	42
1.2.1 光的能量.....	7	3.2.2 谐振腔的横模.....	43
1.2.2 光的辐射度量.....	8	3.3 共焦腔中的光束特性.....	43
1.2.3 光度学量.....	11	3.3.1 基模高斯光束的特性.....	43
1.3 激光的特性及应用.....	13	3.3.2 衍射损耗.....	49
1.3.1 激光的方向性和高亮度.....	13	3.4 连续运转激光器中稳定状态工作特性.....	53
1.3.2 激光的单色性和时间相干性.....	15	3.4.1 均匀增宽谱线稳定态激光的 工作特性.....	53
1.3.3 激光的空间相干性.....	18	3.4.2 非均匀增宽谱线稳定态激光器 工作特性.....	54
1.4 思考与练习题.....	20	3.5 思考与练习题.....	56
第2章 激光产生的基本原理.....	21	第4章 典型激光器.....	58
2.1 光的自发辐射、受激吸收和受激辐射.....	21	4.1 激光器的基本结构.....	58
2.1.1 原子的能级.....	21	4.2 固体激光器.....	60
2.1.2 爱因斯坦系数.....	22	4.2.1 固体激光器的概述.....	60
2.1.3 光的自发辐射.....	23	4.2.2 一般固体激光器.....	61
2.1.4 光的受激吸收和受激辐射.....	24	4.2.3 新型固体激光器.....	62
2.1.5 自发辐射、受激吸收和受激 辐射的关系.....	25	4.2.4 高功率固体激光器.....	64
2.2 谱线的增宽.....	26	4.3 气体激光器.....	65
2.2.1 光谱线、线型和光谱线宽度.....	26	4.3.1 放电激励形成反转分布.....	65
2.2.2 光谱线的自然增宽.....	27	4.3.2 氦-氖激光器.....	66
2.2.3 光谱线的碰撞增宽.....	29	4.3.3 二氧化碳激光器.....	67
2.2.4 光谱线的多普勒增宽.....	30	4.3.4 准分子激光器.....	68
2.2.5 均匀增宽和非均匀增宽.....	32	4.3.5 氩离子激光器.....	69
2.3 介质对光的增益作用.....	33	4.4 液体激光器.....	70
2.3.1 介质的增益系数.....	33	4.4.1 染料激光器的激发机理.....	70
2.3.2 介质的增益和饱和.....	34	4.4.2 染料激光器的主要类型.....	72
2.4 光的受激辐射放大.....	36	4.5 半导体激光器.....	73
2.4.1 实现激辐射和放大的必要条件.....	36	4.5.1 LD的基本结构.....	73
2.4.2 实现光的自激振荡的条件.....	37	4.5.2 LD的基本特性.....	74
2.5 思考与练习题.....	38		

4.5.3 LD 激光的产生机理.....	74	5.5.1 概述.....	107
4.5.4 高性能 LD 的主要类型.....	76	5.5.2 横模选择技术.....	109
4.6 思考与练习题.....	77	5.5.3 纵模选择技术.....	116
第 5 章 激光基本技术.....	78	5.6 稳频技术.....	121
5.1 电光调制.....	78	5.6.1 概述.....	121
5.1.1 电光效应.....	78	5.6.2 兰姆凹陷稳频.....	122
5.1.2 纵向电光调制器.....	82	5.6.3 塞曼效应稳频.....	124
5.1.3 横向电光调制器.....	84	5.7 思考与练习题.....	129
5.1.4 电光相位调制.....	86	第 6 章 激光在工程技术中的应用.....	132
5.1.5 电光偏转.....	87	6.1 激光干涉测长仪.....	132
5.2 声光调制.....	90	6.1.1 单波长干涉测量.....	132
5.2.1 声光效应.....	90	6.1.2 双波长干涉测量.....	133
5.2.2 声光调制器.....	95	6.2 激光测距.....	134
5.2.3 声光偏转.....	96	6.2.1 激光大气传输和测程问题.....	134
5.3 磁光调制.....	97	6.2.2 相位法测距.....	136
5.3.1 磁致旋光效应.....	97	6.2.3 脉冲法测距.....	137
5.3.2 磁光调制器.....	99	6.3 激光加工.....	138
5.4 调 Q 技术.....	99	6.3.1 激光焊接.....	139
5.4.1 概述.....	99	6.3.2 激光焊接工艺和参数选择.....	141
5.4.2 转镜调 Q 技术.....	103	6.3.3 激光切割.....	143
5.4.3 声光调 Q 技术.....	104	6.3.4 激光热处理.....	144
5.4.4 电光调 Q 技术.....	106	6.4 思考与练习题.....	146
5.5 模式选择技术.....	107	参考文献.....	147

绪 言

世界上第一台激光器的成功演示距今已有 45 年了。45 年来, 激光科学技术以其强大的生命力谱写了一部典型的学科交叉的创造发明史。激光的应用已经遍及科技、经济、军事和社会发展的许多领域, 远远超出了人们原有的预想。在此, 我们来回顾一下它的发展历史并了解一下其应用前景。

激光的发展简史

导致激光发明的理论基础可以追溯到 1917 年, 著名物理学家爱因斯坦在研究光辐射与原子相互作用时发现除了受激吸收跃迁和自发辐射跃迁这两种过程之外, 还存在第三种过程——受激辐射跃迁, 即在能量相应于两个能级差的外来光子作用下, 会诱导处在高能态的原子向低能态跃迁, 并同时辐射出能量相同的光子。这就已经隐含了, 如果能使组成物质的原子(或分子)数目按能级的热平衡分布出现反转, 就有可能利用受激辐射实现光放大(Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation——LASER)。后来理论物理学家又证明了受激辐射跃迁所产生的光子具有的特性, 它的频率、相位、传播方向、偏振方向都与诱导产生这种跃迁的光子相同。也就是说, 受激辐射具有很好的相干性和方向性。这些都为激光的出现奠定了理论基础。但是, 当时的科学技术和生产发展还没有提出这种实际的需求, 所以激光也不可能凭空地被发明出来。

爱因斯坦从理论上阐明了受激辐射的存在之后, 直到 20 世纪 50 年代初, 电子学、微波技术的应用提出了将无线电技术从微波推向光波的需求。这就需要一种能像微波振荡器一样地产生可以被控制的光波振荡器, 这也就是当时光学技术迫切需要的强相干光源。虽然光波振荡器从本质上也是由光波放大和谐振腔两部分组成, 但是如果沿袭发展微波振荡器的思想——即在一个尺度和波长可比拟的封闭的谐振腔中利用自由电子与电磁场的相互作用实现电磁波的放大和振荡——是很难实现光波振荡的。这时, 少数目光敏锐又勇于创新的科学家: 美国的汤斯(Charles H. Townes)、苏联的巴索夫(Nikolai G. Basov)和普洛霍洛夫(Aleksander M. Prokhorov)创造性地继承和发展了爱因斯坦的理论, 提出了利用原子、分子的受激辐射来放大电磁波的新概念, 并于 1954 年第一次实现了氨分子微波量子振荡器(MASER)。它抛弃了利用自由电子与电磁场的相互作用来放大和振荡的传统概念, 开辟了利用原子(分子)中的束缚电子与电磁场的相互作用来放大电磁波的新路。道路一经打开, 人们立即开始了向光波振荡器(即激光器, LASER)进军。1958 年, 汤斯和他的年青合作者肖洛(Arthur L. Schawlow)又抛弃了尺度必需和波长可比拟的封闭式谐振腔的老思路, 提出了利用尺度远大于波长的开放式光谐振腔(巧妙地借用传统光学中早有的 F-P 干涉概念!), 实现了激光器的新思想。布隆伯根(Nicolaas Bloembergen)又提出了利用光泵浦三能级原子系统实现原子数反转分布的新构思。之后, 全世界许多研究小组参与了研制第一台激光器的竞赛。

1960 年 7 月, 世界第一台红宝石固态激光器产生。当时美国休斯公司实验室的一位从事红宝石荧光研究的年青人梅曼敏锐地抓住机遇, 勇于实践, 使用今天看起来非常简单的方法, 演示了世界第一台红宝石固态激光器, 获得了波长为 694.3nm 的激光。继而, 全世界许多研究小

组很快地重复了他的实验。中国第一台红宝石激光器于 1961 年 8 月在中国科学院长春光学精密机械研究所研制成功。这台激光器在结构上比梅曼所设计的有了新的改进,尤其是在当时我国工业水平比美国低得多,研制条件十分困难,全靠研究人员自己设计、动手制造。在这以后,我国的激光技术也得到了迅速发展,并在各个领域得到了广泛应用。1987 年 6 月,1012W 的大功率脉冲激光系统——神光装置,在中国科学院上海光学精密机械研究所研制成功,多年来为我国的激光聚变研究作出了很大的贡献。

激光的应用

实验证实激光确实具有理论预期的、完全不同于普通光(自发辐射光)的性质:单色性、方向性、相干性和高亮度。这些正是激光应用的物理基础。

40 多年来,激光的发明不仅导致了一部典型的学科交叉的创造发明史,而且生动地体现了人的知识和技术创新活动是如何推动经济、社会的发展,以造福人类的物质与精神生活的。首先是具有不同学科和技术背景的一批发明家接二连三地发明了各种不同类型的激光器和激光控制技术。例如半导体(GaAs, InP 等)激光器、固体(Nd:YAG 等)激光器、气体原子(He-Ne 等)激光器、气体离子(Ar^+ 等)激光器、气体 CO_2 分子激光器、气体准分子(XeCl、KrF 等)激光器、金属蒸汽(Cu 等)激光器可调谐染料及钛宝石激光器、激光二极管泵浦(全固化)激光器、光纤放大器和激光器、光学参量振荡及放大器、超短脉冲激光器、自由电子激光器、极紫外及 X 射线激光器等。与此同时,各种科学和技术领域纷纷应用激光并形成了一系列新的交叉学科和应用技术领域,包括信息光电子技术、激光医疗与光子生物学、激光加工、激光检测与计量、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快光子学、激光化学、量子光学、激光(测污)雷达、激光制导、激光分离同位素、激光可控核聚变、激光武器等。

展望未来,激光在科学发展与技术应用两方面都还有巨大的机遇、挑战和可创新的空间。在技术应用方面:以半导体量子阱激光器和光纤器件为基础的信息光电子技术将继续成为未来信息技术的基础之一,宽带光纤传输将组成全球信息基础设施的骨干网络,光纤接入网也将作为信息高速公路的神经末梢进入楼房或家庭,为人们提供高清晰度电视、远程教育、远程医疗等质高价廉的信息服务;光盘、全息以至更新型的信息存储技术将为此提供丰富的信息资源;光子技术将和微电子技术、微机械技术交叉融合形成微光机电技术。激光医疗与光子生物学在本世纪的发展前景和重要性绝不亚于信息光电子技术,激光和光纤(传像光纤和传能光纤)技术可能帮助人们找到攻克心血管病、癌症等危害人类的疾病的新方法,包括基于激光的诊断、手术和治疗。激光光谱分析和激光雷达技术将对环境保护和污染检测提供了有力的手段。工业激光加工与计量将和工业机器人结合,为未来的制造业提供先进的、精密的、灵巧的特殊加工与测量手段。光纤传感技术和材料工程的交叉正在创造未来的灵巧结构材料(Smart Structure),它能感知并自动控制自己的应力、温度等状态,从而为未来的飞机、桥梁、水坝等结构提供安全的保障。

总之,激光这种新型技术自 20 世纪 60 年代初发展起来之后,它的奇异特性使其得到迅速发展和广泛应用。可以毫不夸张地讲:今天,激光已经成为信息时代的心脏,成为社会进步的推动力,成为人类现代生活的重要组成部分。

第1章 激光概论

1.1 准备知识

激光是英文词“Laser”的中译名。Laser一词是“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”的词头缩写，译为“通过辐射的受激发射实现光放大”，实质是“光的受激辐射放大”，简称“激光”。

激光不同于普通光源所发射的光，而是由激光振荡器（简称激光器）所产生的能够像电子振荡器所产生的电磁波那样被利用的光波。从这个意义上来说，激光的发明，把电子学推到了光频段，产生了一门崭新的学科——光电子学，开辟了一个崭新的技术领域——光电子技术领域。

激光是怎样产生的？它有些什么特性？激光技术的状况如何？它有哪些应用？发展前景如何？本书将依次讨论这些问题。

1.1.1 光的波粒二象性

我们周围的世界充满光，光现象是人们最熟悉的物理现象之一。对光本性的探求，自有史以来一直是人们追求的一个科学目标。

对于光本性的认识，早在17世纪就形成了两派相互对立的学说。一派以牛顿为首，认为光是一种微粒流，微粒从光源飞出来，在均匀物质内以力学规律作等速直线运动。这就是所谓的光的微粒说。微粒说很自然地解释光直线传播性，并且对光的折射和反射定律也作了成功的解释。然而，微粒说在解释光的干涉和衍射现象时却遇到了困难。另一派以惠更斯为首，他们是微粒说的反对者，认为光是在一种特殊的介质——“以太”中传播的弹性波，这种“以太”介质充满宇宙的全部空间。这就是所谓的光波动说。波动说可以顺理成章地解释光的干涉和衍射现象。然而惠更斯的关于光波的概念是很不完全的，因为世界上根本不存在那种不可思议的“以太”介质，光波也不是弹性波。

在光学萌芽的17世纪和整个18世纪中，光的微粒说一直占据优势，而波动说被忽视了，甚至被遗忘。直到19世纪初，人们发现了光的干涉、衍射和偏振等现象，这些现象是波动的特征，光的波动说才重新引起人们的重视，逐渐发展起波动光学体系。然而，“以太”的概念仍然是一个重大的缺陷。19世纪中，由于电磁理论的发展才确认光是一种电磁波，而不是惠更斯的弹性机械波，人们彻底摒弃了“以太”概念，光的波动理论获得了新的生命力。

1900年，普朗克在研究黑体辐射的过程中提出了辐射的量子论，他认为光波的能量是不连续的，光波由一份份能量组成，这种能量微粒称为光量子或光子。1905年，爱因斯坦将光的量子论用于解释光电效应，他对光子的概念作了更明确的表示。他指出，在光作用于物质时，光也是以光子为最小单位进行的。在19世纪末和20世纪初，许多实验都证明了光的量子性。这样一来，光的微粒性（量子性）又提到了首位。

20世纪初，一方面从光的干涉、衍射、偏振以及运动物体的光学现象确证了光是电磁波，证明了光的波动性，而另一方面又从热辐射、光电效应、光压现象及光化学作用等无可怀疑地证明了光的量子性——微粒性。光的波动理论和光的量子论各自统治着自己的领域，都可以解

释一部分光现象。但波动理论不能解释光的量子行为，而光的量子论也不能说明光的波动现象。表面上看，这种对立类似于牛顿的微粒说同惠更斯的波动说的对立，但是就对光本性的认识而言，光的量子论和光的电磁波理论都进入了比较高级阶段，两者的对立有着深刻的内在联系。普朗克首先揭示出这种联系，他指出一定频率的光对应一定能量的光子，而爱因斯坦进一步证明了光子的动量与光波的波矢间的对应关系，这就是光的波、粒二象性。光的波、粒二象性的数学表述如下：

$$\begin{aligned} E &= h\nu \\ \vec{P} &= \hbar \vec{K} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 h 是普朗克常数， E 和 $\vec{P}$ 分别是光子的能量和动量， ν 是光波的频率， $\vec{K}$ 是光波的波矢，在数值上与波长的倒数 ($K=2\pi/\lambda$) 有关，方向为光波传播的方向。至此，光的波动性和粒子性辩证地统一起来，我们应用光的量子理论和光的电磁波理论就能够令人满意地解释我们周围发生的各种现象。

1.1.2 光的电磁波理论

光是一种电磁波，它同普通的无线电波一样，在传播过程中具有确定的频率、波长、位相、传播速度和传播方向。根据电磁波理论，光波电磁场随时间和空间的变化规律满足麦克斯韦方程组，即

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \\ \nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \end{aligned} \quad (1-2)$$

光波在介质中传播时还应满足物质方程，即

$$\begin{aligned} \vec{J} &= \sigma \vec{E} \\ \vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \end{aligned} \quad (1-3)$$

式 1-2 和式 1-3 是光在传播过程中光波电磁场应满足的基本方程组，光的一切特性可以从基本方程组推导出来。求解基本方程组，我们可以得到光波具有不同的传播形式，即平面波、球面波或柱面波。平面波的电磁场可表示为

$$\begin{aligned} E(r,t) &= E_0 \cos(\omega t - \vec{K} \cdot \vec{r}) \\ H(r,t) &= H_0 \cos(\omega t - \vec{K} \cdot \vec{r}) \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 E_0 和 H_0 分别为光波场的电场强度和磁场强度的振幅； ω 为光波的角频率 ($\omega=2\pi\nu$)； $\vec{K}$ 为光波沿传播方向的波矢，其大小称为波数 ($K=2\pi/\lambda$)； $\vec{r}$ 为空间坐标矢。有时为了运算方便，常把式 1-4 写成复数的形式

$$\begin{aligned} E(r,t) &= E_0 \exp[-i(\omega t - \vec{K} \cdot \vec{r})] \\ H(r,t) &= H_0 \exp[-i(\omega t - \vec{K} \cdot \vec{r})] \end{aligned} \quad (1-5)$$

如果光在无限大的均匀介质 (ϵ, μ 为常数) 中传播，并且远离辐射源 ($\rho=0, \vec{J}=0$)，可以证明光波电磁场满足同一种形式的微分方程，即

$$\nabla^2 E = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 H = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (1-6)$$

式 1-6 称波动方程。式中 V 是光波在介质中的传播速度，其大小由下式给出，即

$$V = \frac{c}{n} = \lambda \nu \quad (1-7a)$$

式中 c 是光波在真空中的传播速度； n 是介质的折射率； λ 是在介质中的波长。 n 由下式给出：

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1-7b)$$

式中 ϵ_r 和 μ_r 分别是介质的相对介电常数和相对磁导率。将式 1-5 代入麦克斯韦基本方程组可以证明：

$$\begin{aligned} \mathbf{K} \cdot \mathbf{E} &= 0 \\ \mathbf{K} \cdot \mathbf{H} &= 0 \\ \mathbf{K} \times \mathbf{E} &= \mu \omega \mathbf{H} \\ \mathbf{K} \times \mathbf{H} &= -\epsilon \omega \mathbf{E} \end{aligned} \quad (1-8)$$

式 1-8 表明平面波具有横波的特性，其电场和磁场的振动方向相互垂直，并且垂于光波的传播方向，如图 1.1 所示。由于光效应是由电场强度引起的，今后我们讨论光波的运动只用电场强度来描述。

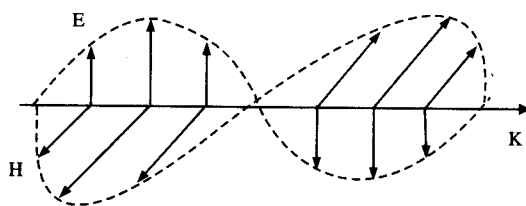


图 1.1 E 和 H 相互垂直并垂直 K

如果光波是由点源发出的，则光波为球面波，表示公式为

$$E(r, t) = \frac{E_1}{r} \exp[-i(\omega t - \kappa \cdot r)] \quad (1-9)$$

式中 E_1 是距点源单位距离处的电场强度。

如果光波是由一无限长的线光源发出的，则光波为柱面波，表示式为

$$E(r, t) = \frac{E_1}{\sqrt{r}} \exp[-i(\omega t - k \cdot r)] \quad (1-10)$$

光是一种电磁波，它的波动性主要表现在具有干涉、衍射和偏振等特性，分别介绍如下。

1. 干涉

当频率相同、振动方向相同、位相相同或位相不同但具有固定位相差的两束或多束光波相遇时，在相遇区内产生光强相长或相消的条纹，这就是干涉现象。在日常生活中我们常会遇到干涉现象，例如肥皂泡上和漂浮在水面油膜上的美丽的彩色条纹就是太阳光干涉的结果。在科学技术中，人们用干涉仪使激光产生干涉，利用干涉条纹进行几何尺寸的精密测量。

2. 衍射

衍射是波动性的一个主要标志。在日常生活中我们常见在平静水面上传播的水波，当遇到障碍物时，水波会绕到障碍物的几何阴影中去，并且在几何阴影边界区域，波的强度有较大的起伏。但是，在日常生活中我们经常见的是光的直进性和反射、折射现象，极少发现光的衍射现象。这是因为衍射是有条件的，只有当障碍物的尺寸与波长相近时，衍射现象才比较显著。我们知道，可见光的波长为 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ ，人眼要分辨这样小的障碍物阴影区内的光强变化显然是不可能的。

3. 偏振

如果光在传播过程中电场强度的振动遵循一定的规律，我们称该光为偏振光。如果光电场的振动方向漫无规律，则该光为非偏振光或自然光。若光电场沿一条直线方向振动，该光为线偏振光。线偏振光的振动方向与传播方向所在的平面称振动面，而包含传播方向的并与振动面垂直的平面称偏振面。显然，偏振动的法线方向就是线偏振光电场强度的振动方向。除了线偏振光外，人们发现电场强度的振动有时沿着一个椭圆轨迹变化，称之为椭圆偏振光。在特殊情况下，轨迹为一个圆，称之为圆偏振光。如果变化的方向是沿着顺时针前进，称之为右圆偏振光，反之称为左圆偏振光。

1.1.3 电磁波谱

大量的实验证实，光、无线电波、 χ 射线和 γ 射线的本性都是电磁波，不同的是它们的频率（或波长）范围，而且彼此差别很大。如果按其频率（或波长）次序排列成一个频谱，称之为电磁波谱，如图 1.2 所示。我们这里所说的光是广义的，它包括红外线、可见光和紫外线，可见光只是其中的一小部分。如果把各种光的频率范围排列成一个谱，称之为光谱。

光的频率极高，频率覆盖范围为 $10^{12}\sim 10^{16}\text{Hz}$ ，相应的波长范围为 $10^{-1}\sim 10^{-7}\text{cm}$ 。为了方便，人们通常根据光的某些特性的差异再细分区。红外线细分为极远外、远红外、中红外和近红外；可见光细分为红色、橙色、黄色、绿色、青色、兰色和紫色。各类光按波长的分区如表 1.1 所示。

表 1.1 光谱分区

光		$\lambda(\mu\text{m})$	$\Delta\lambda(\mu\text{m})$
红外线	极远红外	15~1000	985
	远红外	6~15	9
	中红外	3~6	3
	近红外	0.76~3	2.24
可见光	红色	0.63~0.76	0.13
	橙色	0.60~0.63	0.03
	黄色	0.57~0.60	0.03
	绿色	0.50~0.57	0.07
	青色	0.45~0.50	0.05
	兰色	0.43~0.45	0.02
	紫色	0.40~0.43	0.03
紫外线		$1\times 10^{-3}\sim 0.40$	0.397

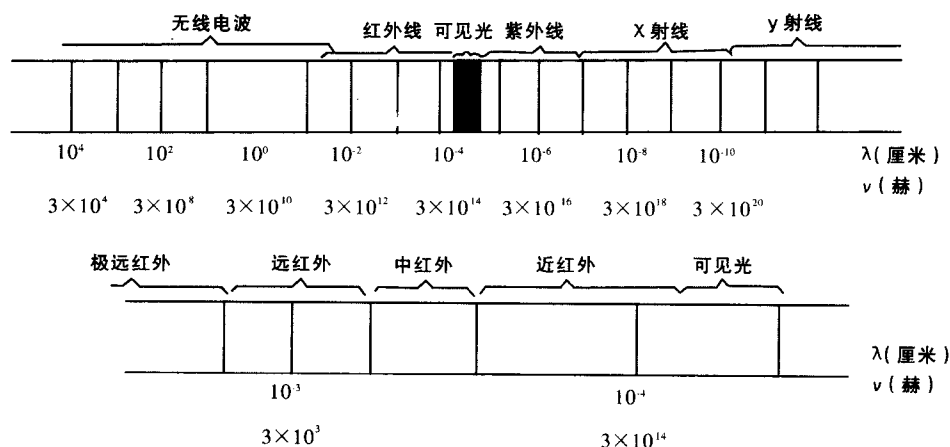


图 1.2 电磁波谱

在电磁波谱中的各类电磁波, 虽然其波长范围不同, 产生的方法及其与物质相互作用的效应各不相同, 但由于本性相同, 所以在传播及与物质相互作用过程中都遵守普遍的运动规律。例如, 电磁波在真空中的传播速度为 $c=2.9979 \times 10^8$ 米/秒, 在介质中的传播速度为 $v=c/n=c\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$, 在传播过程遵守反射、折射、干涉、衍射和偏振规律等。

1.2 光的能量及量度物理量

1.2.1 光的能量

光是人们最熟悉的一种物质。前面已经指出, 光是一种电磁波, 具有波、粒二象性。电磁理论证明, 伴随着光的传播, 光的电磁能量也不断在空间传播。单位时间通过垂直于传播方向单位面积的电磁能量称为光辐射的强度矢量或玻印亭矢量, 定义为 S , 并且满足

$$S=E \times H \quad (1-11)$$

式 1-11 描述了光的能量在空间的传播特性。光波的频率极高 ($10^{12} \sim 10^{16}$ Hz), 所以 S 值的变化极快, 人眼和任何接收器都不可能察觉 S 的瞬时变化, 接收到的 S 值只能是其平均值。对于平面波光波来说, 一个周期内的能量平均值为

$$\bar{S} = \frac{1}{T} \int_0^T S dt = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E^2 \quad (1-12)$$

式中 ϵ 为介质的介电常数, μ 为磁导率, 在实际应用中, 把光辐射强度的平均值 $\bar{S}$ 称为光强度, 即单位时间通过垂直于光的传播方向单位面积的能量, 用 I 表示。

另外, 还可以用光的微粒性来表示光的能量。光的微粒性理论认为, 光是由光子组成的, 每个光子的能量为 $E=h\nu$, 光的频率不同, 光子的能量也不同。光波传输的能量是由许多单个光子组成的光子流的能量。

设一束频率为 ν 的单色光的强度为 I , 光束的光子密度为 n (单位体积内的光子数), 则

$$I = nh\nu c \quad (1-13)$$

单个光子除具有能量外,还具有动量,所以光波在传输能量的同时还传输动量。光波传输的动量就是光子流的动量。由光的波粒二象性可知,波长为 λ 的光子的动量为 h/λ 。设光子流的能量密度为 w , 动量密度为 p , 则有

$$\begin{aligned} w &= nh\nu \\ p &= n \frac{h}{\lambda} = \frac{nh\nu}{c} = \frac{w}{c} \end{aligned} \quad (1-14)$$

式中, w 和 p 的流动方向指向光的传播方向。

因此,光子流是能量流,也是动量流。光子流的能量效应为光电效应、 χ 射线的散射及光作用下的化学反应等大量实验规律所证实,而光子流的动量效应则为自然界中的光压现象所证明。在真空中,当沿着某一方向传输的光子流入射到物体表面上时,部分光子流被吸收,而另一部分光子流被反射,光子流的动量发生改变,这表明物体受到一定力的作用。假设光子流垂直于物体表面入射,物体表面的反射系数为 R (显然 $R < 1$), 则很容易证明,垂直于物体表面单位面积的作用力即光压 $P_{\text{光压}}$ 为

$$P_{\text{光压}} = (1+R)w \quad (1-15a)$$

或

$$P_{\text{光压}} = (1+R)\frac{1}{c} \quad (1-15b)$$

因为光的传输速度非常大,所以对于各种实际上能得的光能量而言,光压都非常小。例如,在晴天直射的阳光被完全吸收时,它所产生的光压仅为每平方米 0.4 毫克重。所以只有设计精密的仪器才能察觉到光压的存在。

1.2.2 光的辐射度量

历史上,人们早先对光的认识是通过眼睛产生的“光亮”的感觉来认识的,根据光辐射能对正常人眼产生的视觉刺激的大小引入光度学量(例如光通量、光强、亮度和照度等物理量)来描述光的能力分布。显然,光度学量受主观视觉的影响太大,只适用于可见光,不是客观的物理学描述方法。光的辐射度量是用能量单位来描述光辐射能,是建立在物理测量基础上的不受人的主观视觉影响的客观物理量,适用于包括可见光在内的各种波段的电磁辐射量的计算和测量。最常用的基本辐射量有以下 6 个。

1. 辐射能 Q_e

辐射能是一种以辐射形式发射、传播或接收的能量,单位为 J (焦耳)。

2. 辐射通量 Φ_e

辐射通量又称辐射功率 P_e , 是以辐射形式发射、传播或接收的功率,单位为 W (瓦)。它是辐射能随时间的变化率

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1-16)$$

3. 辐射强度 I_e

辐射强度定义为在给定方向上的单位立体角内,离开点辐射源(或辐射源的面元)的辐射通量,如图 1.3 所示。

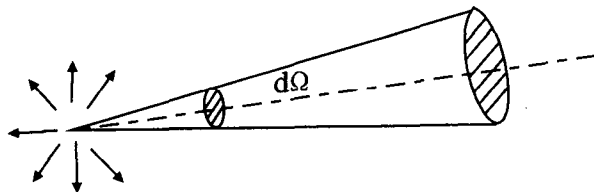


图 1.3 辐射强度的定义

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-17)$$

单位为 W/sr (瓦/球面度)。

如果点辐射源是各向同性的, 即其辐射强度在各个方向都一样, 则该辐射源在有限立体角内的辐射通量为

$$\Phi_e = I_e \Omega \quad (1-18a)$$

点辐射源向空间所有方向发射的总辐射通量为

$$\Phi_e = 4\pi I_e \quad (1-18b)$$

实际上, 一般辐射源是各向异性的, 其辐射强度随发射方向而改变, 可用极坐标辐射强度表示, 即 $I_e = I_e(\varphi, \theta)$ 。这样点辐射源各整个空间发射的辐射通量为

$$\begin{aligned} \Phi_e &= \int I_e(\varphi, \theta) d\Omega \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_e(\varphi, \theta) \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad (1-18c)$$

4. 辐射出射度 M_e

如果辐射源为面辐射源, 辐射出射度定义为源表面单位面积向半空间 (2π 立体角) 内发射的辐射通量, 即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1-19)$$

单位为 W/m^2 (瓦/平方米)。由于辐射源面辐射不一定均匀, 所以 M_e 通常是源面上位置的函数。

5. 辐射亮度 L_e

辐射亮度定义为辐射源表面一点处的面元在给定方向上的辐射强度除以该面元在垂直于该方向的平面上的正投影面积 (称之为表观面积), 如图 1.4 所示。表达式为

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos \theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos \theta} \quad (1-20a)$$

单位为 $\text{W/sr} \cdot \text{m}^2$ (瓦/球面辐射度 · 平方米)。

一般情况, 辐射源表面各处的辐射亮度及向各个方向的辐射亮度都是不相同的, 即辐射亮度是位置和方向的函数, 因此辐射亮度的一般表达式为

$$L_e(\varphi, \theta) = \frac{d^2\Phi_e(\varphi, \theta)}{d\Omega dS \cos \theta} \quad (1-20b)$$

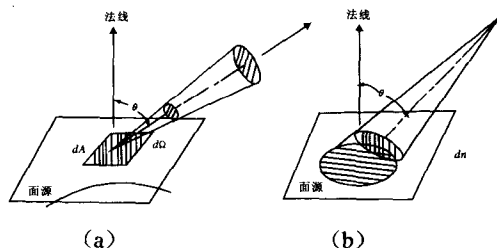


图 1.4 (a) 辐射亮度的定义; (b) 源的表现面积

尺寸很大的面辐射源称之为扩展源, 辐射出射度和辐射亮度是为了描述扩展源的辐射功率在空间和源面上的分布情况而引入的物理量。辐射强度是为了描述尺寸很小的点源的辐射功率在空间不同方向分布情况而引入的物理量。这里所说的尺寸很大或很小是一个相对的概念, 它与观察者的位置有关, 或者更进一步说, 与它对于观察者 (或探测器) 所张开的立体角大小有关。例如, 距地球非常遥远的一颗恒星, 其绝对物理尺寸可能很大, 但相对于地球上的观察者所张开的立体角很小, 所以我们完全可以把它看成一个点辐射源。同样的道理, 一个光源尽管它的物理尺寸不大, 但如果距观察者很近, 相对于观察者所张开的立体角很大, 我们就应该把它看作扩展源。一般说来, 只要观察者的距离比源本身的最大尺寸大 10 倍以上, 并且观测装置中不带任何光学系统, 这样的辐射源可看作点源。采用光学系统观测时, 如果辐射源的像比探测器大或者说充满光学系统的视场, 则该辐射源为扩展源。

6. 辐射照度 E_e

辐射照度为接收面上单位面积被照射的辐射通量, 即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1-21)$$

单位为 W/m^2 (瓦/平方米)。

辐射出射度和辐射照度的表达式和单位完全相同, 但其概念完全不同。前者是描述面辐射源向外发射的辐射特性, 而后者是描述辐射接收面上所接收的辐射特性。

7. 光谱辐射量

实际上, 辐射源发射的能量往往是由很多波长的单色辐射组成的, 因此上面所引入的辐射量都是波长的函数。为了研究辐射源的各种波长的辐射能量的分布, 我们引入光谱辐射量的概念。光谱辐射量又称辐射量的光谱密度, 它是辐射量随波长的变化率。相应的定义为光谱辐射能量。

$$\Phi_e(\lambda) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad (1-22a)$$

单位为 $\text{W}/\mu\text{m}$ (瓦/微米), 或 W/nm (瓦/纳米)。

光谱辐射强度

$$I_e(\lambda) = \frac{dI_e}{d\lambda} \quad (1-22b)$$

光谱辐射出射度

$$M_e(\lambda) = \frac{dM_e}{d\lambda} \quad (1-22c)$$