



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程光学

(第二版)

张志刚 主审

韩建国 侯庆文 王颖 喻长远 编著



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程光学

(第二版)

张志刚 主审

韩建国 侯庆文 王 颖 喻长远 编著

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程光学/韩建国等编著. 一二版. —北京: 中国计量出版社, 2009. 9
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5026-3134-5

I. 工… II. 韩… III. 工程光学-高等学校-教材 IV. TB133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 149063 号

内 容 提 要

本书简明扼要、重点突出地介绍当今光学的全貌及其与一些重要的现代学科的密切联系。主要内容包括三大部分: 第一部分(1至3章)较系统地介绍传统光学的基本核心内容, 包括光学发展概况、几何光学和物理光学; 第二部分(4至7章)初步介绍光学的一些重要的现代、近代发展分支, 包括信息光学、统计光学、量子光学和矩阵光学; 第三部分(8至11章)重点介绍光学的现代应用技术, 包括激光技术、光调制技术、光电子技术和光学计量技术; 第12章介绍了一些典型光学信息处理 Matlab 软件工具程序设计与应用实例。

本书可供电子、信息、通信、测量、计量、自控、电工、计算机类大学高年级学生、研究生使用, 也可供从事光学工程应用技术研究与开发的人员参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

电话 (010)64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京密东印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787mm×1092mm 16开本 印张 16.5 字数 387千字

2009年11月第2版 2009年11月第2次印刷

*

印数 3 001—6 000 定价: 30.00 元

前 言

本书根据普通高等教育“十一五”规划立项教材的精神要求编著完成,主要面向非光学专业的电子、信息、通信、测量、计量、自控、电工、计算机类大学本科高年级学生、研究生。

考虑到光学不仅与早期的物理学、数学紧密联系,而且历经了一系列近代、现代新理论、新观点、新技术的飞速发展而自身衍生出一系列新理论、新观点、新分支;在 IT 技术广泛应用的今天,光学在各个现代高科技领域中发挥着独特的促进作用而构成了高等教育学科范畴中重要的一部分;为适应即将从事上述领域学习、研究、开发工作的学生与科技工作者需求,本教材在保持与原版教学大纲一致的基础上,在重点介绍光学的基本核心内容的同时,注重体现如下三个特点:

1) 深入浅出、统观全局——从传统的、理想的光学开始,引向实际的、现代的光学发展与应用,力求简明扼要、重点突出地以较短的学时、较小的篇幅介绍当今光学的全貌及其与现代学科的密切联系;

2) 立足本行、纵横衔接——引导学生立足于数字电子-计算机-IT 技术领域,从工程技术的角度来学习光学及其应用技术,培养自己在未来的工作中从自身的领域出发对光学领域进行学习、实践、应用与创新的能力;

3) 分析精髓、启发创意——从典型的光学的发展中展示出基础学科乃至人类认识论与自身生产、科学实践过程的相辅相成的发展规律,帮助学生在培养未来创新意识与能力上获益。

本教材共分 3 篇、12 章:第一篇(1 至 3 章)较系统地介绍传统光学的基本核心内容;第二篇(4 至 7 章)初步介绍光学的一些重要的现代、近代发展分支;第三篇(8 至 11 章)重点介绍光学的现代应用技术;第 12 章介绍了一些典型光学信息处理 Matlab 软件工具程序设计与应用实例。全书力求在实现上述宗旨的目标下构成一个完整的框架,而在不同教学环境和要求的情况下,可按实际目标和学时的允许而节选不同大小的范围来使用。

由于编撰者水平和能力有限,教材中必定存在不少缺点和错误,恳请各位读者指正。

我们愿藉此机会对所有关心、帮助、指导过我们编撰本教材的本单位和兄弟单位的朋友、同事、相关人士,特别是北京大学杨东海教授、山东大学蔡屺中教授、北

京工业大学陶世荃教授、天津大学郁道银教授、浙江大学谈恒英教授表示衷心的感谢；他们的热心帮助、工作成果和优秀论著使我们受益匪浅。

参加本教材编著的还有北京化工大学讲师林冬蔚、中央人民广播电台高级工程师杜毅、北京联合大学生物化学工程系 2005 届毕业生汪月波和王明辉女士、北京冠城苑热力厂总工程师赵珍荣女士，谨在此向他们表示衷心感谢。

编者

2009 年 6 月

目 录

第一篇 基本理论与概念

第一章 概论	3
第一节 光的本质学说的发展	3
第二节 光学及其应用技术的发展	4
第三节 光学纵览	6
第二章 几何光学	8
第一节 几何光学的基本概念	8
第二节 成像的基本概念与完善成像条件	16
第三节 光路计算与近轴光学系统	19
第四节 理想光学系统	22
第五节 平面系统成像特殊技术与应用	27
第六节 实际光学系统的像差与评价	34
第三章 物理光学	51
第一节 从电磁场理论到光干涉原理	51
第二节 光衍射与傅里叶变换	62
第三节 傅里叶光学	66
第四节 从光学的发展看科学	75

第二篇 近代与现代光学理论导论

第四章 信息光学	79
第一节 标量衍射理论	79
第二节 光学成像系统的频率特性	82
第三节 相干光学	88
第四节 全息干涉计量	92
第五章 统计光学	98
第一节 光的某些一阶统计特性	98
第二节 随机非均匀媒质成像统计分析	108
第三节 光电探测中的基本限制	113
第六章 量子光学	118
第一节 光辐射的二象性	118

第二节 光电效应与光量子描述	121
第三节 光的发射与吸收	123
第四节 爱因斯坦系数关系	125
第七章 矩阵光学	128
第一节 几何光学中的矩阵方法	128
第二节 高斯光束传播变换描述	139
第三节 光学谐振腔理论中的矩阵描述	144

第三篇 现代光学应用技术简介

第八章 激光技术	153
第一节 激光的获取	153
第二节 激光特点及常用激光器	157
第九章 光调制技术	164
第一节 光的调制	164
第二节 声光调制	168
第三节 电光调制	173
第四节 磁光调制	179
第十章 光电子技术	182
第一节 光电测试技术	182
第二节 光电探测器件	183
第三节 光电成像原理	202
第四节 光电显示技术	210
第十一章 光学计量技术	222
第一节 光学系统中的光能及其计算	222
第二节 目视光学系统 1—显微与放大系统	230
第三节 目视光学系统 2—望远系统	237
第四节 投影仪	241
第十二章 光信息处理 Matlab 程序设计例举	244
第一节 杨氏光干涉实验算法 1—以孔径角 β 为依据	244
第二节 光干涉实验算法 2—以双孔距 d 为依据	246
第三节 最小二乘(系统辨识)参数估计算法	247
第四节 BP-NN 神经算法	251
参考文献	256

基本理论与概念

第一篇

第一章

概 论

人类很早就对光的现象及其规律有了深入的了解,并着手研究它的应用和本质。公元前我国就有小孔成倒像的记载,而古希腊的学者最早提出了光是物质微粒的观点。近代科学对光的研究是围绕着探讨光的本质性问题发展的,这种探讨有力地推动了光学以及整个物理学的发展。对光本性的认识,从“光是物质的微粒流”到“光是以太的振动”,从“光是电磁波”到“光是波粒二象性的统一”,经历了三百多年的探索。人们遵循实验—假设—理论—实验的途径,逐步加深对光的本性的认识:光和电磁的统一,光的波动性和微粒性的统一。在近代和现代科学技术发展阶段,光学又衍生出许多分支学科和应用技术,散发出无限的生命力。

第一节 光的本质学说的发展

17 世纪,法国物理学家笛卡儿认为光在本质上是一种压力,它在一种完全弹性的、充满一切空间的介质(以太)中以波动形式传播。但他又从光的微粒观念推导出了反射和折射定律:把光线设想为无数球形微粒,其速度可以分解为垂直分量和水平分量,当入射到两种假定有空隙的介质之间的界面时,可以穿过这些空隙,而垂直方向的速度减小、水平方向的速度不变,由此可以得到光的折射公式: $\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{v_2}{v_1}$ 。这时人们对光的本性的认识刚刚开始,这种描述只是一种猜想,而且与很多实际的现象相矛盾。

在后来对光的研究中,先后产生了较完整的波动说与微粒说。英国物理学家、天文学家胡克明确提出:光是一种振动,“在一种均匀介质中,这一运动以各向分量相等的速度传播,所以发光体的每一个脉动或振动都必须形成一个球面,这个球面将不断地增大”。这实际上就是波前或波面的概念。

牛顿则主张微粒说,提出了光是微粒流的理论,认为这些微粒从光源飞出,在真空或均匀介质中由于惯性而作匀速直线运动。他认为波动说不能解释阴影这个现象:“如果光是瞬时传播或在时间过程中传播的压力或运动,它就应当朝影子内部弯曲”。他还对光做了很多研究工作,包括“牛顿环”的发现,提出并确立了光的周期性,以及光的色散现象。

荷兰物理学家惠更斯发展了波动说。他认为光波是纵波,以非常大但又有限的速度在以太中传播;以太由不均匀的、微小的、弹性的、压缩得非常紧密的颗粒组成,因此光是一种“运动的趋势”而不是实际上的物质的迁移。惠更斯原理确定了波的传播方向:在传播中,波前的每

一点都可以看作一个新的波或子波的波源,新的波前位置就是这些小子波的包络线,这些子波是从原先波前上所有的点发出的。惠更斯成功地解释了反射和折射现象,并得出稠密介质中光的速度小于稀疏介质中光的速度的正确结论。

19 世纪初的一系列发现使人们普遍接受波动理论。英国物理学家托马斯·杨和法国物理学家菲涅尔等人进行了大量的实验和理论工作,他们解释了光的干涉和衍射现象、初步测定了光的波长并根据光的偏振现象确定光是横波。托马斯·杨提出了光波的频率和波长的概念并将其用干涉原理,从而解释了“牛顿环”现象:“同一束光的两个不同部分以不同的路径而完全一样地、或者在方向上十分接近地进入眼睛;在光线路程差等于某个长度的整数倍的地方,光增强,而在干涉区域的中间部分,光最强;对于不同颜色的光束来说,这个长度不同。托马斯·杨提出了光的干涉现象产生的条件及获得相干光的方法,并演示了光干涉的实验。菲涅尔将惠更斯的子波假设发展为惠更斯—菲涅尔原理。他认为:由于子波的互相干涉而使合成波具有显著的强、弱分布。惠更斯将其包络面作图法与杨氏干涉理论相结合,定量计算了圆孔、圆板等形状的障碍物产生的衍射花纹,并用实验验证了圆孔衍射的中央亮斑。

19 世纪中叶,麦克斯韦在电磁学理论研究的基础上,从理论上推导出电磁波的传播速度等于光速,由此推测:光的传播也是一种电磁现象,是电磁振荡在空间的传播。20 年后,赫兹第一次通过实验证实了光波就是电磁波,从而肯定了麦克斯韦的预言,建立起光的电磁理论。这一理论给出了电磁波的波动方程,解释了光在不同界面(电介质界面、金属表面)的反射、折射、透射及干涉、衍射、偏振等现象,并在此基础上发展了全息、散斑、光学多普勒等技术,奠定了现代光学的基础,推动了光学以及整个物理学的发展。尽管由现代光学派生出很多新的领域,但是光的电磁理论仍然是阐明大多数光学现象及建立现代光学的重要基础。

光的电磁理论揭示了光的电磁波本质,很好地解释了光传播时的干涉、衍射、偏振等具有波动性质的光现象,但同时又遇到了很多新的不能用解释的现象,如黑体辐射、光电效应等辐射和物质之间的相互作用。为了解释黑体辐射分布的函数曲线问题,普朗克于 1900 年提出了辐射能量子的假设。1905 年爱因斯坦又进一步推广了普朗克的能量子假设,引进了光子的概念,成功地解释了光电效应。至此,人们对光的本性的认识发展到了新的阶段,物理学的概念产生了从连续状态到量子化的飞跃。

第二节 光学及其应用技术的发展

在近代、现代科学技术的发展进程中,微电子技术、数字电子技术、信息获取与处理的软硬件处理与智能化技术为光学的发展提供了物质基础并提出了新的需求。而现代控制理论、信号与系统理论、非线性与不确定性理论等学科领域的发展又从本质上提高了人们认识理解客观世界的思考层面,为光学的发展提供了原动力,发展起了信息光学、统计光学、矩阵光学等颇具现代特色的光学分支和一系列应用技术。

1916 年,爱因斯坦在讨论辐射的电磁场与物质粒子相互作用而发生能量交换的问题时,提出了自发辐射、受激辐射和受激吸收的假说,并推导出普朗克辐射定律,为以后激光的诞生奠定了理论基础。在此基础上,1960 年美国人梅曼研制出世界上第一台红宝石激光器,而伊朗物理学家贾万则研制出第一台气体激光器。气体激光器利用氦、氖两种气体作为激活介质,第一次得到了连续输出的激光束,为激光应用开辟了广阔的前景。以红宝石激光器为代表的固体

激光器和以氦、氖激光器为代表的气体激光器的相继问世,引起了全世界科技界研究激光的热潮,各种新型的激光器陆续出现,其中有可获得大功率脉冲的钕激光器、连续输出大功率激光的二氧化碳激光器、可以在室温下工作的小型半导体激光器、从化学反应获得能量的化学激光器、具有很宽的光谱线而且输出波长可连续改变的染料激光器等。这些成果为光学的实际应用提供了大量优质的光源装置,使光学及其应用飞速地发展。

此后,激光器日趋成熟地发展为按照增益介质的种类划分的气体激光器、固体激光器、半导体激光器、液体激光器四类和按照工作方式划分的连续激光器与脉冲激光器。激光器因其发光亮度高、强单色性、远距离平行性等优势而在许多领域代替了传统的光源并得到了更广泛的应用,在激光加工、激光精密测量与定位、光学信息处理的全息技术、模式识别、光通信、激光存储、激光印刷等方面,都显现出特有的优势。

光纤是根据光的全反射原理制成的光传输器件,但是早期的玻璃纤维在远距离传输时会有很大的衰减。1970年,玻璃纤维的光波衰减从1000dB/km下降到20dB/km,与此同时,室温下连续工作的半导体激光器获得了突破性进展,这两项进展使得1970年被称为光纤通信年。人们提出了光纤通信的概念而快速发展和发现了这项技术并发现:通信质量受干扰的一个原因是光纤对外界环境因素十分敏感,如压力、温度、电场、磁场等环境条件的变化将引起光波参量(如强度、相位、频率、偏振态等)的变化,这一现象启发人们提出了光纤传感的概念,而使光学的发展又增添了一个重要分支。

现代科学技术的飞速发展使得光学在自身发展中增加了与其他学科的联系。人类利用自然界存在的光线进行科学研究,最早是在天文和地理方面。自从望远镜和显微镜出现,光学与精密机械的结合使许多传统的光学原理被广泛应用到各个计量和生产领域。而激光器的出现和傅里叶光学技术的形成、特别是激光技术与微电子技术、计算机技术的结合产生了光、机、电、算一体化的近代光学应用技术,形成了一个金字塔如图1-1;塔顶为光学的基本原理的应用和新发展,而全息、干涉、衍射等光学原理则是这个基本体系的基础;精密机械、电子技术与计算机技术构成塔底——近代光学应用技术的支撑面。

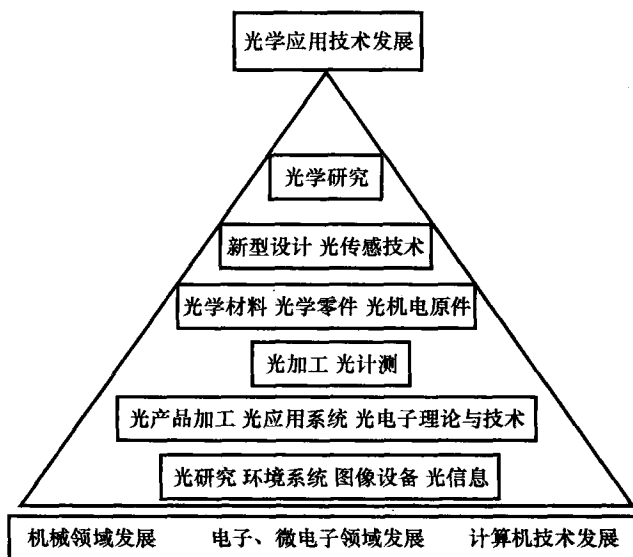


图 1-1 光学与其他领域的关系

综上所述,近代、现代光学应用技术的特点主要有:

(1) 从主观光学发展为客观光学,即用光电探测器代替人的眼睛,提高了精度、效率并实现自动控制;

(2) 从光、机结合的模式向光、机、电、算一体化的模式转换,实现测量、处理、控制、存储、显示的一体化与自动化;

(3) 用现代观点去分析光的存在、运动、变化与作用的规律,使之与现代应用技术相融合;

(4) 用激光这个单色性、方向性、相干性、稳定性都很好的光源代替传统光源,获得了性能极好的实际光束,用于各种光学系统;

(5) 光技术与计算机网络通信技术、遥感测量技术、数字信号处理器制造技术紧密结合,对整个光学学科及其他学科领域的发展起到重要的促进作用。

目前,光学已经在科学研究、现代工业生产、空间技术、国防等领域中得到广泛应用,以光学理论为核心的技术已成为现代科技发展中不可取代的表征型技术之一,并向着微型化、集成化、经济化的方向发展,而在技术上更上一个层次,成为保证科学技术、工业生产日新月异地向前发展的主要高新技术之一。

第三节 光学纵览

以欧几里得平面几何为主要理论基础、以直射、折射和反射规律为核心依据的古典几何光学理论,不但至今还在直接指导着人们日常生活中的各种光学分析,而且正确处理了各种公差问题而从理想系统进入实际系统之中,从而被广泛地应用到各种测量、分析技术与产品生产技术中。

以波动学说为基础、电磁波理论为核心的物理光学注重研究光的属性和光在媒质中传播时的各种性质及其传播规律,如光干涉、衍射、偏振等物理现象,将经典理论与现代技术紧密结合,具备了很强的应用性。

光学与迅速发展的通信、信息理论的互动使其自身融入了许多属于前者的概念和方法,从而产生了新的分支。以物理学信息系统对光的作用为着眼点和傅里叶变换、频谱分析为起点的信息光学结合了应用光学、计算机科学和信息科学,从传统的经典波动光学中脱颖而出,形成了现代光学的核心——一门新的光学学科,成为信息科学的一个重要组成部分。而采用随机过程、相关函数、统计与估计等统计学方法来分析处理光学问题的统计光学又构成了光学的另一个现代分支,与现代科学技术领域中不确定性与确定性、宏观与微观有机结合的描述客观事物的观点与方法相吻合,适应了现代科学技术应用技术的需要。

半经典理论时期的量子光学理论把物质看成是遵守量子力学规律的粒子集合体,而激光光场则遵守经典的麦克斯韦电磁方程组原则。此理论能较好地解决有关激光与物质相互作用的许多问题,但不能解释与辐射场量子化有关的现象。在全量子理论中,把激光场看成是量子化的光子群,这种理论体系能对辐射场的量子涨落现象以及涉及激光与物质相互作用的各种现象给予严格而全面的描述。现代意义上的量子光学对激光的产生机理,包括自发辐射和受激辐射进行更详细的研究,其主要任务是研究光场的各种经典和非经典现象的物理本质,揭示光场的各种线性和非线性效应的物理机制,揭示光场与物质(原子、分子或者离子)相互作用的各种动力学特性及其与物质结构之间的关系,揭示光子自身相互作用的基本特征、机理、规律

以及光子的深层次结构等。

矩阵运算在光学发展的全过程中都起到了一项得力工具的作用。在计算机和激光技术迅速发展的现代时期,矩阵形式的计算、分析与描述方法又与激光技术紧密相连。迄今,光腔的矩阵解法、光学矩阵算子理论、非对称系统的矩阵光学理论与列阵光学等构成了矩阵光学的新发展领域。

由光学和电子学结合形成依赖于光-电和电-光转换、光学传输、加工处理和存储等技术的发展而发展的光电子学涉及电磁波在光学频段辐射的光学图像、信号或能量与电学信号或能量的相互转换,并进行处理和传输的问题,研究以光波代替无线电波作为信息载体而实现光发射、控制、测量和显示等技术,同时还包括光电子能谱的研究——利用光电子发射时携带的信息研究固体内部和表面的成分和电子结构。光电子器件,包括作为信息载体的光源、用于控制与处理的元器件、光学纤维以及显示显像器件,以各种形式组合成具有重大应用价值的光电子学系统,如光通信系统、电视系统、微光夜视系统等。

与光网络通信紧密结合的光纤光学涉及光网络通信器、光纤通信系统、传感系统、无源和有源的光器件、各种光交换器及光在光网络中传输的基本理论及网络基本知识,研究光在介质—光纤波导中的传输原理及波导特性。该学科目前正表现出重大的发展趋势。

基于上述理论体系的发展,适应了现代科学技术发展的需求,以光学为基础的一系列现代技术,如激光技术、光调制技术、光电子技术、光-电-数字/图像转换与处理技术、谱分析技术、颜色光学技术、计量光学技术,如雨后春笋般地发展起来。

第二章

几何光学

几何光学主要是一门以光线为基础、用几何的方法来研究光在介质中的传播规律及光学系统对它的作用规律、过程和最终的成像特性的学科。随着研究结果的日益完善和应用的日益广泛发展,人们还运用了泛函分析与抽象的标准化模型手段来实现光学理论与应用技术的普遍适用性。本章回顾几何光学、理想光学系统的基本概念、基本定律、基本分析与计算方法以及泛函描述和抽象模型描述在几何光学研究中的应用。

第一节 几何光学的基本概念

一、光波与光线

实质上,通常人们所指的可见光是一种波长在 $400\sim 760\text{nm}$ 之间的能为人眼所感知的电磁波;其中波长大于 760nm 的临近电磁波称为红外光;波长小于 400nm 的临近电磁波称为紫外光(图 2-1)。光波在真空中的传播速度(记作 c)是 $c=3\times 10^8\text{m/s}$,而在介质中的传播速度小于 c ,且随波长的变化而变化。

可见光随其频率的不同而引起人眼不同的颜色感觉。具有单一频率的光称为单色光,而由不同单色光混合而成的光称为复色光。太阳光是由无限多种单色光组成的。其中的可见光范围包含着红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等七种主要颜色光的频率范围。在烈日下的太阳光中各种频率的可见光强度十分接近,于是就呈现出“白光”的现象;而当这些不同频率的光被按照频率范围分解开(例如使用三棱镜进行分光)时,它们就各自呈现出相应的单独颜色。

下面介绍一些常用的概念与名称[参看图 2-2、2-3(a)、2-3(b)、2-4]。

1. 发光体与光源

通常,能够辐射(或反射)光能量的物体称为发光体或光源。发光体可看作由许多发光点或点光源组成,每个发光点向四周辐射光能。

2. 光线

在几何光学中,通常将发光点发出的光抽象为许许多多携带能量并具有方向性的几何线条,称之为光线,其方向代表光的传播方向。

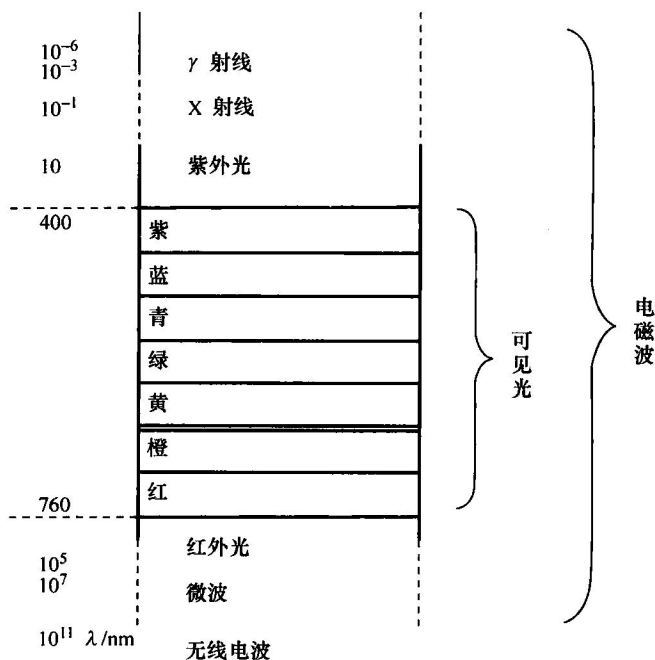


图 2-1 电磁波的不同频率区域

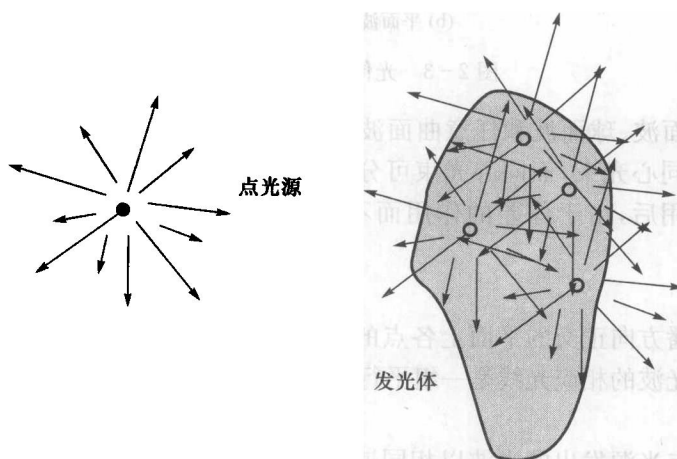


图 2-2 点光源与发光体

3. 波面

发光点发出的光以波的形式向四周传播时,某一时刻其振动位相相同的点所构成的面称为波阵面,简称波面。

4. 光束

波面法线构成波面对应的对应光线,与波面对应的所有光线的集合称为光束。

5. 光的传播方向与光线

光的传播即为光波波阵面的传播。在各向同性介质中,波面上某点的法线代表了该点处光的传播方向,即光沿着波面法线方向传播。因此,波面法线即为光线。

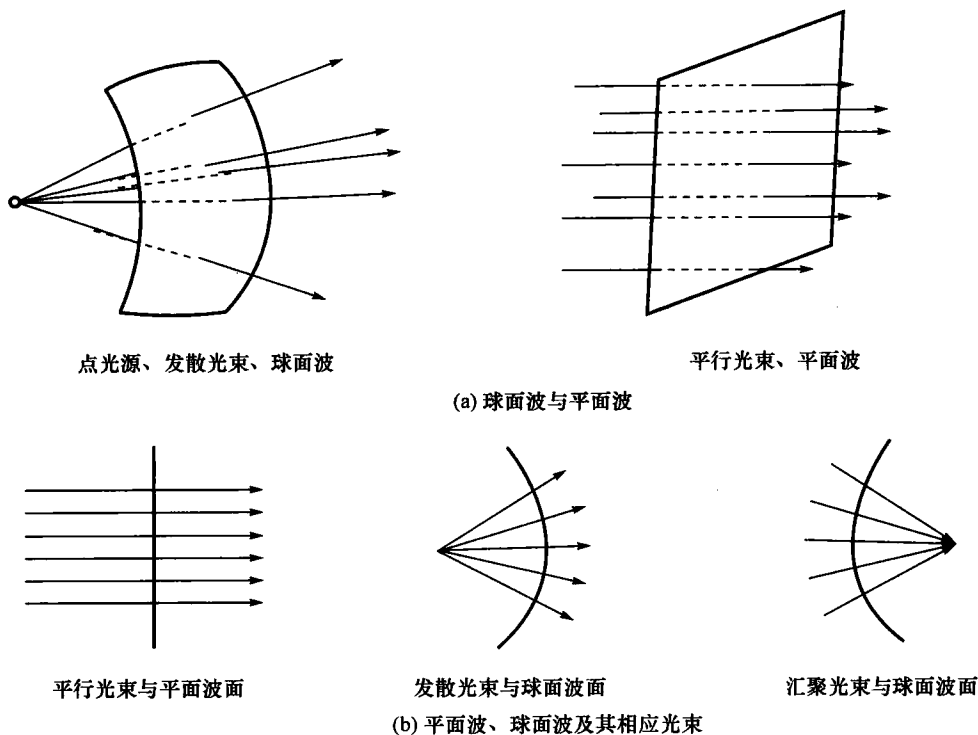


图 2-3 光传播的基本概念

波面可分为平面波、球面波和任意曲面波。与平面波对应的光束称为平行光束，与球面波对应的光束称为同心光束，而同心光束可分为汇聚光束和发散光束。实际上，同心光束经实际光学系统的作用后，由于像差的作用而不再是同心光束，与之对应的光波则为非球面光波。

6. 平面光波

若在与光的传播方向正交的平面上各点的电场和磁场具有相同的值，则此种波称为平面光波。同一个平面光波的相应光线是一组平行线，其波面曲率半径为无限长。

7. 球面光波

均匀介质中的点光源发出的光波以相同速度沿径向传播，某一时刻各向的波所到达的空间位置各点构成一个以点光源为中心的球面，在此球面上各点的波的振动相位相同，即此球面为等相面，这种光波称为球面波。与球面波对应的光束是同心光束，包括汇聚的和发散的同心光束。

二、几何光学的基本定律及其局限性

几何光学把研究光经过介质的传播问题归结为如下四个基本定律，它是研究各种光的传播现象和规律以及物体光线经过光学系统作用后的成像特性的基础，但随着物理学、特别是光学本身的发展，它们的局限性又逐渐表现出来。四个基本定律分别是：直线传播定律、独立传播定律、折射定律和全反射定律。