



GH

高等学校 规划教材
工科电子类

现代光学系统原理

李志能 编著



北京理工大学出版社

现代光学系统原理

李志能 编著

北京理工大学出版社

(京)新登字 149 号

内 容 简 介

本书是电子工业部的工科电子类教材，书中以线性空间不变系统的分析方法，对现代光学系统作了扼要、全面、系统的论述。第一至四章是现代光学系统的数学及电磁理论等必备基础，包括光波的数学描述、卷积、相关和傅里叶变换，及标量衍射理论和相干现象。第五至七章是现代光学系统的基本部分，包括普遍的的光学系统、传递函数、光学信息处理、模拟计算机系统及全息技术。第八至十一章是现代光学最新发展的最重要的几个应用领域，包括光波导、光通信系统、光纤传感系统及数字光计算机。

本书以线性系统的分析方法为基础，将波动光学、傅里叶光学、光信息处理等基本内容有机地联系起来，层次分明，概念清楚，系统性强。因此，本书既适用于本科生，也适用于研究生和专业工程技术人员。

现代光学系统原理

李志能 编著

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 18.625 印张 475 千字

1994 年 6 月第一版 1994 年 6 月第一次印刷

ISBN 7-81013-113-3/O·26

印数：1—2000 册

定价：16.00 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我公司承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1990年，已编审、出版了三轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，调动广大教师编写教材，依靠学校管理部门和有关出版社，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想。我公司所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的教材，以主要专业的主干课程教材及其辅助教材为主，并配置一些教学参考书等约300余种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委或教学指导委员会直接组织进行。

这批教材的书稿，其一是通过教学实践，师生反应较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的；其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的；其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会、教学指导委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

1995.5.6

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

中国电子工业总公司教材办公室

前 言

本教材系接电子工业部的工科电子类教材 1990~1995 年编审出版规划，由电子物理与器件教材编审委员会电子物理与器件编审小组征稿，推荐出版，责任编委杨祥林教授。

本教材由浙江大学李志能教授编著，上海机械学院凌世德教授担任主审。

本课程的参考学时数为 72 学时，其主要内容包括光波的电磁理论和数学描述，卷积、相关和傅里叶变换，光波的部分相干和标量衍射理论，光学成像系统和传递函数，光学信息处理系统，全息技术，光导波，光纤通信系统，光纤传感，数字光计算机。本教材适用于高年级本科生和一年级硕士生，前者的重点应放在本教材的前七章的基础理论和基本内容上，后者的重点应放在应用最广、发展最快的后五章上。

本教材经过多届本科生和硕士研究生使用的讲义修改而成的。蒋欣荣同志参与了第三、六章的编写。在编审过程中，得到杨祥林教授、陈抗生教授、凌世德教授支持，并提出了许多宝贵意见，这里表示诚挚的感谢。由于编著者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

绪 言

光学是一门古老的学科。光现象是和人们日常生活关系最为密切的物理现象之一。早在17世纪，牛顿、惠更斯等人对光现象作了系统的理论研究。当时牛顿认为光是一种微粒子流，惠更斯认为光是一种波动的传播。到了19世纪40年代，法拉第发现磁场对光的振动面产生偏转的影响，表明光现象与电磁现象有着内在的联系。1860年麦克斯韦总结了前人大量的实验结果，断定光波与电磁波具有完全相同的特性。这个论断于27年后被赫兹的实验所证实。次年（1888）发现了光电效应，用光的波动学说无法解释。1900年，普朗克从物质的分子结构理论中借用了不连续性概念，提出了辐射的量子论，能量微粒称为量子。1905年爱因斯坦推广量子论，提出光量子学说，说明光的本质是量子微粒性，从而导出光电方程，为光电效应找到了理论根据。直至1921年康普顿直接观察到光量子与电子碰击后产生的散射现象，证实了光的本质既有波动性又有量子微粒性，为近代光学奠定了基础。然而近代光学的兴起并得到蓬勃发展还是近30年的事情。1948年戈巴提出了全息技术；1955年为像质评价建立了光学传递函数概念；1960年第一只红宝石激光器——新型光源的诞生，是现代光学发展史中具有重要意义的三件大事。特别是新型光源的出现，使现代光学产生突飞猛进的发展，还产生了傅里叶光学、光电子学、量子电子学等许多学科。现代光学已渗透到许多领域，得到了极其广泛的应用。光纤技术的发展，光纤通信已变为主要的通信手段。光通信系统在现代光学系统中占有十分重要的地位，已形成了一个重要产业。相干傅里叶光学的二维信息处理技术在图像处理、模式识别、机器人视觉等领域也得到广泛的应用。70年代后

期，继光纤通信和光信息处理之后，光纤传感器受到人们的关注，它具有较低的热和机械惯性、较高的敏感度、抗电磁干扰等优点，所以在工业上、军事上、医学上具有重要意义，各种各样的光纤传感器像雨后春笋一样出现。光计算机和光神经网络是现代光学系统又一发展趋向。其中光学存贮盘已经实用化了，在5到14吋的光盘上能存贮近 10^{10} bytes的信息。

现代光学系统原理这本教材分成两个部分。第一部分是基础部分——现代光学的基本概念；第二部分是现代光学系统的主要应用。前者包括光的传播、衍射、相干、全息、光学信息处理和光波导，后者包括光纤通信、光纤传感和光计算机等应用。现代光学的重大进展之一是引入傅里叶变换的概念，形成了所谓“变换光学”，它与电子学时域频域变换一样，把电子学中系统概念和分析技术应用到光学中。这对于信息电子类的学生和读者是易于接受的，但对于多数读者来说，也许感到数学处理太多，物理概念不太清楚。其实现代变换光学与传统的波动光学的关系，犹如分析力学与牛顿力学的关系。现代变换光学的基本规律并未超出传统的波动光学的范围。我们以变换光学这一方法讲授光的传播、衍射和干涉，可非常自然地推进到光学系统的滤波、抽样、重建、光学传递函数、点扩展函数等许多概念。为了加强物理概念，我们尽可能地结合传统的波动光学基本原理——惠更斯-菲涅耳原理给予解析。这一原理的核心是次级子波学说以及子波的叠加，把一个波前作为形成下一个波前的子波源。而用现代变换光学观点来看，这个原理就是光场中的一个波前变换到另一个波前；一个波前的传播问题就是衍射问题，同一空间二个波前相互作用就是干涉。因此，波前这一概念成为连接传统波动光学和现代变换光学的纽带，我们紧紧掌握了这一纽带，可驾轻就熟了。

对于本教材第二部分，我们只能重点介绍几种应用，即使如此，其内容仍然较庞大。因为每一个“应用”又是一个学科，或又是一门新课。我们着重于这些“应用”的基本原理、技术关键

和发展方向，以使读者对现代光学系统有一个全面的了解，为进一步深入研究打下一个基础。

目 录

| | |
|---|-------|
| 第一章 光的电磁理论及其数学描述 | (1) |
| § 1-1 光的电磁理论 | (1) |
| § 1-2 均匀平面电磁波 | (3) |
| § 1-3 导引波和消逝波——非均匀平面波 | (8) |
| § 1-4 球面波·柱面波·高斯光束 | (15) |
| § 1-5 光波的能量 | (19) |
| § 1-6 波动光学与几何光学 | (22) |
| 习题一 | (28) |
| 第二章 光波分析与积分变换 | (30) |
| § 2-1 光源的光能分布与其照明屏幕上的光能分布成 傅里叶变换关系 | (30) |
| § 2-2 光波衍射与数学卷积 | (32) |
| § 2-3 光学中常用的函数 | (35) |
| § 2-4 卷积与相关 | (43) |
| § 2-5 傅里叶变换 | (52) |
| 习题二 | (63) |
| 第三章 部分相干基本理论 | (67) |
| § 3-1 光波分析 | (67) |
| § 3-2 光波的相干性 | (77) |
| § 3-3 光源限度对干涉条纹的影响·空间相干性 | (80) |
| § 3-4 光源非单色性对干涉条纹的影响·时间相干性 | (85) |
| § 3-5 部分相干理论基础 | (88) |
| § 3-6 范西特-泽尼克定理及其应用 | (95) |
| § 3-7 互相干函数的传播 | (99) |
| 习题三 | (103) |

| | |
|------------------------------|-------|
| 第四章 光波标量衍射理论 | (106) |
| § 4-1 亥姆霍兹和基尔霍夫积分定理 | (107) |
| § 4-2 菲涅耳-基尔霍夫衍射公式 | (110) |
| § 4-3 平面光波场的复振幅和波谱 | (114) |
| § 4-4 菲涅耳衍射 | (118) |
| § 4-5 夫琅和费衍射 | (124) |
| § 4-6 透镜对衍射的影响 | (134) |
| 习题四 | (151) |
| 第五章 光学成像系统与传递函数 | (155) |
| § 5-1 无像差光学系统的一般特性 | (155) |
| § 5-2 成像系统的基本模型 | (161) |
| § 5-3 相干成像系统特性 | (165) |
| § 5-4 几种典型的相干成像装置 | (173) |
| § 5-5 非相干光成像系统 | (178) |
| § 5-6 非相干光成像系统传递函数 | (183) |
| § 5-7 实际光学系统的传递函数 | (192) |
| § 5-8 光学成像系统中记录元件 | (198) |
| 习题五 | (204) |
| 第六章 光学信息处理系统 | (208) |
| § 6-1 光学滤波系统及其应用 | (209) |
| § 6-2 光学相关运算和图像识别系统 | (222) |
| § 6-3 光学数学运算系统 | (228) |
| § 6-4 非相干光处理系统 | (238) |
| § 6-5 光学控制系统理论基础 | (242) |
| § 6-6 光学控制系统实例 | (252) |
| 习题六 | (257) |
| 第七章 全息术 | (262) |
| § 7-1 全息学基本原理及全息图类型 | (262) |
| § 7-2 平面全息图 | (269) |
| § 7-3 傅里叶变换全息图 | (280) |
| § 7-4 体全息图 | (287) |
| § 7-5 彩色全息术 | (295) |

| | |
|------------------------|--------------|
| § 7-6 计算机产生的全息图 (计算全息) | (304) |
| 习题七 | (316) |
| 第八章 光导波 | (320) |
| § 8-1 概述 | (320) |
| § 8-2 多层结构介质光波导 | (321) |
| § 8-3 三层介质平板波导 | (327) |
| § 8-4 四层介质平板波导 | (334) |
| § 8-5 矩形多层波导 | (341) |
| § 8-6 光波在均匀纤芯光纤中传输 | (344) |
| § 8-7 均匀纤芯光纤的性质 | (354) |
| § 8-8 非均匀纤芯光纤的波动理论 | (366) |
| 附录 | (377) |
| 第九章 光纤通信系统原理 | (382) |
| § 9-1 数字光纤通信系统的编码原理 | (383) |
| § 9-2 光源的直接调制 | (390) |
| § 9-3 光源的间接调制 | (397) |
| § 9-4 光信息的检测 — 光接收机 | (413) |
| § 9-5 光接收机的特性 | (427) |
| 第十章 光纤传感 | (445) |
| § 10-1 光纤传感器的一般原理 | (445) |
| § 10-2 光在晶体中传播 | (454) |
| § 10-3 本征型光纤传感器 | (466) |
| § 10-4 非本征光纤传感器 | (472) |
| § 10-5 光纤陀螺 | (480) |
| § 10-6 光纤传感器网络 | (489) |
| § 10-7 分布式光纤传感器 | (497) |
| § 10-8 光纤传感器的发展及应用前景 | (504) |
| 第十一章 数字光计算机 | (516) |
| § 11-1 数字光计算机基本原理 | (517) |
| § 11-2 光逻辑器件 | (522) |
| § 11-3 光学互连 | (537) |
| § 11-4 光盘存储器 | (551) |

| | |
|--------------------|-------|
| § 11-5 光学智能机 | (563) |
| 参考资料 | (579) |

第一章 光的电磁理论及其数学描述

§ 1-1 光的电磁理论

从波动光学的观点看,光是具有很高频率的电磁波,它的频谱通常包括紫外、近红外及可见光区,如表 1-1 所示。因此光同样遵循电磁场的基本规律。

表 1.1-1 电磁波谱

| 电磁波类型 | 波 长 | 频 率 | 量子能量(eV) |
|-------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| 无线电波 | 100 m | 3×10^6 | 1.2×10^{-8} |
| 微 波 | 300 mm | 10^9 | 4×10^{-6} |
| 红外光 | 0.3 mm | 10^{12} | 4×10^{-3} |
| 可见光 | 0.7 μm | 4.3×10^{14} | 1.8 |
| 紫外光 | 0.4 μm | 7.5×10^{14} | 3.1 |
| x 射线 | 0.03 μm | 10^{16} | 41 |
| γ 射线 | 0.1 nm | 3×10^{18} | 1.2×10^4 |
| | 1.0 pm | 3×10^{20} | 1.2×10^4 |

电磁波是随时间变化的交变电磁场。变化着的电场强度 E 和磁场强度 H 是紧密地相互联系的,在场空间的每一点,各场量之间的时空变化关系服从着麦克斯韦电磁方程组

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.1-1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1.1-2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1.1-3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.1-4)$$

式中 B 为磁感应强度, D 为电位移, J 为传导电流密度, ρ 为介质

中的自由电荷密度。在场强较弱的情况下,各场量之间存在如下的线性关系

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.1-5)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (1.1-6)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (1.1-7)$$

式中 σ 、 ϵ 和 μ 分别表示介质的电导率、介电常数和导磁系数,在各向异性介质中它们均为张量,在各向同性介质中则简化为标量。 ϵ_0 和 μ_0 为真空介电常数和导磁系数。 \mathbf{P} 为电极化矢量, \mathbf{M} 为磁极化矢量。在许多情况下,可以假设 σ 、 ϵ 和 μ 与场强无关。然而当场非常强时(例如聚焦激光束产生的场强),或者介质处在外加低频电场、磁场或交变电场作用时,就必须考虑这些介质参量与电磁场 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 或其它场的关系,这就是非线性效应。

从麦克斯韦方程组(1.1-1)~(1.1-4)和物质方程组(1.1-5)~(1.1-7)能推出描述介质中电磁波动现象的方程。首先将(1.1-1)式两边取旋度

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (1.1-8)$$

式中已将对时间和空间接的微商符号交换。对于常用的光学材料, $\mu = \mu_0$,将(1.1-7)和(1.1-2)式代入上式,得

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \quad (1.1-9)$$

利用(1.1-5)和(1.1-6)式,则写成

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.1-10)$$

亦可写成

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (1.1-11)$$

这就是普遍形式的波动方程。方程右边的两项分别为介质中的传导电流和极化电流,它们是电磁波的波源。对于金属导体, $-\mu_0 \sigma \cdot (\partial \mathbf{E} / \partial t)$ 这一项是主要的,方程的解将说明电磁波在金属中的迅速

衰减及在金属表面的强烈反射；在非导电介质中($\sigma = 0$)， $-\mu_0(\partial \mathbf{P}/\partial t)$ 这一项最为重要，正是这一极化波源导致电磁波的散射、吸收及色散等现象；而对于半导体，这两项都必须考虑。

在线性介质中，麦克斯韦方程是线性方程。频率为 ω 的正弦激发(如正弦电流密度分布 \mathbf{J})产生正弦响应(即 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 随时间按正弦变化)，任何其它形式的激发和响应均可以用正弦函数的叠加表示。因此，研究麦克斯韦方程的正弦稳态解是最基础的问题。它通常采用复变量处理。

对于简谐电磁场，可将实场量写成如下复数形式：

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(t) = \mathbf{E}(x, y, z; t) &= \text{Re}[\mathbf{E}(x, y, z)e^{-i\omega t}] \\ &= \text{Re}[\mathbf{E}e^{-i\omega t}] \end{aligned} \quad (1.1-12)$$

同样， $\mathbf{H}(t)$ 、 $\mathbf{J}(t)$ 和 $\rho(t)$ 也可取类似的形式，将它们代入方程(1.1-1)~(1.1-4)，得到麦克斯韦方程的复数形式：

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu_0\mathbf{H} \quad (1.1-13)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = i\omega\epsilon\mathbf{E} + \mathbf{J} \quad (1.1-14)$$

$$\nabla \cdot \epsilon\mathbf{E} = \rho \quad (1.1-15)$$

$$\nabla \cdot \mu_0\mathbf{H} = 0 \quad (1.1-16)$$

由于方程两边的时间因子 $e^{-i\omega t}$ 被消去，方程中的各场量均为复振幅矢量，所得麦克斯韦方程仅为空间变量的微分方程。将解得的场量复振幅乘以 $e^{i\omega t}$ 后取实部，即得实时谐波场解。

采用复数符号表示，则波动方程(1.1-10)和(1.1-11)写成

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} - \omega^2\mu_0\epsilon_0\mathbf{E} = -i\omega\mu_0\sigma\mathbf{E} + \omega^2\mu_0\mathbf{P} \quad (1.1-17(a))$$

或者

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + i\omega\mu_0\sigma\mathbf{E} - \omega^2\mu_0\epsilon\mathbf{E} = 0 \quad (1.1-17(b))$$

§ 1-2 均匀平面电磁波

介质中电磁光波的传播规律遵循麦克斯韦方程。对于均匀各向同性介质，介电系数 ϵ 为恒量，由方程(1.1-3)得到一个重要的

物理条件

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = \epsilon \nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

即 $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ (1.2-1)

利用矢量恒等式 $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla \cdot \nabla \cdot \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E}$, 即可将波动方程 (1.1-17) 左边简化。对于简谐场, 则有

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu_0 \epsilon \mathbf{E} - i \omega \mu_0 \sigma \mathbf{E} = 0$$
 (1.2-2)

如引进复介电系数

$$\epsilon_r = \epsilon_r - i \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} = \epsilon'_r - i \epsilon''_r$$
 (1.2-3)

则方程 (1.2-2) 变为

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} = 0$$
 (1.2-4)

同理, 对于磁场矢量可以得到类似的方程, 即

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{H} = 0$$
 (1.2-5)

引进复介电系数 ϵ_r , 使波动方程既适用于导体和半导体 ($\sigma \neq 0$), 也适用于存在高频介质损耗的电介质。

波动方程 (1.2-4) 平面波解的是最一般形式可写成:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(x, y, z; t) = \text{Re} E \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta_0)]$$
 (1.2-6)

其中 \mathbf{k} 是复波矢, 其大小为

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon'_r - i \epsilon''_r}$$
 (1.2-7)

在材料的光学特性研究中, 通常采用折射率这个参量, 为此引进复折射率

$$n = \sqrt{\tilde{\epsilon}_r} = n - i \mathcal{K}$$
 (1.2-8)

式中 n 就是通常说的材料折射率, \mathcal{K} 称为消光系数。由 (1.2-3) 和 (1.2-8) 式解得

$$n = \sqrt{\frac{1}{2} [\epsilon'_r + \sqrt{\epsilon'^2_r + \epsilon''^2_r}]}$$
 (1.2-9)

$$\mathcal{K} = \sqrt{\frac{1}{2} [\sqrt{\epsilon'^2_r + \epsilon''^2_r} - \epsilon'_r]}$$
 (1.2-10)