



GH

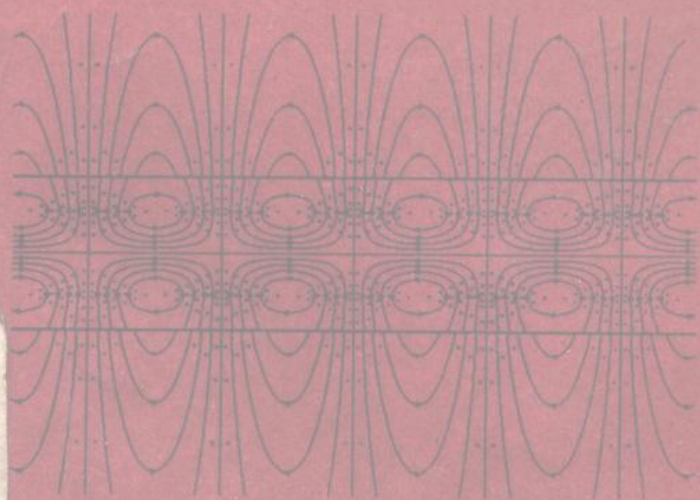
高等学校 规划教材
工科电子类

**ELECTROMAGNETIC THEORY
IN MICROWAVES
AND OPTOELECTRONICS**

**微波与光电子学中的
电磁理论**

ZHANG KEQIAN LI DEJIE

张克潜 李德杰



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONIC INDUSTRY

73.117
588

高等学校
工科电子类

规划教材

**ELECTROMAGNETIC THEORY IN
MICROWAVES AND OPTOELECTRONICS**
微波与光电子学中的电磁理论

张克潜 李德杰
ZHANG KEQIAN LI DEJIE

电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONIC INDUSTRY

(京)新登字 055 号

内 容 提 要

10014/13

本书系作者据在清华大学多年讲授研究生学位课程的讲稿写成。全书共十章：第一至第四章概述电磁理论的基本规律及相关的数学知识；第五至第八章深入系统地阐述导波的场理论，即有边界限制的电磁波（包括第五章导体边界，第六章介质边界及第七章周期边界与模式耦合；第八、九两章进一步深入讨论无界空间的电磁波（包括第八章色散及各向异性媒质中的波及第九章高斯波束）；第十章是标量衍射理论及其应用。它们是无线电工程、微波与毫米波技术、微波电子器件、光电子技术与器件和光纤传输的理论基础。

本书内容翔实、重点突出、脉络清晰，概念剖析深入浅出，数学推导层次分明，适用专业范围广，既是研究生和高年级学生的好教材，也可作为科技书供科学技术人员阅读和参考。

ABSTRACT

This book is a first year graduate text on electromagnetic fields and waves. The material in the book has been used and renewed year by year in Tsinghua University for more than 10 years. Chapter 1 through Chapter 4 provide the physical and mathematical foundations of electromagnetic theory. Chapter 5 through Chapter 7 cover the field analysis of electromagnetic waves confined in material boundaries, or so called guide-waves, including conducting boundary (Chapter 5), dielectric boundary (Chapter 6) and periodic boundary (Chapter 7). The mode coupling theory is also covered in Chapter 7. Chapters 8 and 9 deal with electromagnetic waves in open space, including wave propagation in dispersive media and anisotropic media (Chapter 8), and wave propagation in the form of Gaussian beams (Chapter 9). Chapter 10 presents scalar diffraction theory. They are the theoretical foundations of wireless engineering, microwave and millimeter-wave techniques, microwave devices, optoelectronics and optical fiber transmission.

The intended readers of the book are graduate students on electrical/electronic engineering. It should also be useful as a reference book for the researchers and engineers. It is assumed that the reader have had the knowledge of field and circuit theories of undergraduate level, as well as the mathematical background of calculus, Fourier analysis, function of complex variables, differential equations, vector analysis and matrix theory.

The size of the book is about 600 pages, including 600 illustrations.

微波与光电子学中的电磁理论

张克潜 李德杰

责任编辑 吴金生

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路173信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

电子工业出版社计算机排版室 排版

北京科技印刷厂印刷

开本:787×1092毫米 1/16 印张:41.25 插页:1 字数:1056千字

1994年11月第一版 1994年11月北京第一次印刷

印数:2000册 定价:23.50元

ISBN 7-5053-2460-8/TN·716

2010100

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和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1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时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能更好地适应“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,“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,组织我部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,根据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,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、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(小组)、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。

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

电子工业部教材办公室

序

自从远古以来人们对静磁与静电有了初步的定性认识,但是一直到十九世纪初才由几位物理大师把这些知识置于深入的定量的基础之上。尽管如此,磁与电仍是两个并行的互不关联的学科。十九世纪六十年代麦克斯韦发现当他试图把电与磁的已知定律归并在一起时其中有不合理的互相矛盾部分。是他创造性地引入了位移电流的新概念才铲除了不自恰的地方。这样就形成了有名的麦克斯韦方程,奠定了电磁波理论的基础。从此,人们知道电与磁不再是并行而互不关联的概念,而是事物本身的两个方面。麦克斯韦不但把电与磁融为一体,他还证明光乃是电磁波的一部分。电磁波包括了从所谓的“超长波”到长波、中波、短波、超短波、米波、分米波、厘米波、毫米波、远红外光、红外光、可见光、紫外光以至X射线、 γ 射线等这一大电磁波家族。它们的频率从几千赫延展到 10^{20} 赫,是物理量中范围延伸得最广的一个。

赫兹的实验证实了电磁波的存在并测定了它的一些性质,他用的是超短波段的阻尼波。但在二十世纪初最先得到应用的则是长波。以后的几十年中科学家们一方面在无线电波的范围从较长的波长向更短的波长推展,另一方面又在光波的范围从可见光分别向长和短的波长延伸。现在可以说电磁波中的无线电波和光波这两大部分已在远红外波段会师,从而把整个电磁波谱连接起来了。

本书将要涉及的是电磁波家族里的微波段和光波段的一部分。所谓微波就是波长从米到毫米量级的一段,也就是无线电波中波长最短的一段。微波在二次大战以前就由少数科学家涉猎过,到了二次大战期间由于在雷达中的应用而得到飞跃发展,战后转而用于通信、工业及科学研究,技术日臻成熟,近年已发展到毫米波及亚毫米波段,与光学范围的远红外波段相连接。书中所涉及的光波段主要是近十年来迅速发展的用于信息传输的波段,其波长在微米量级,属于近红外范围。这一段电磁波是在60年代后期半导体激光器及光学纤维相继问世之后才被人们重视和研究。

为什么微波和光波这样诱人呢?原因是它们能载负甚大的信息量。任何信息都需要一定的频率数。信息越复杂,如活动的图像,就需要越宽的频段。载负信息的载波的频率又必须是被载信息频率的许多倍,所以载负更多的信息量就必须采用非常高的频率,即波长更短的电磁波。

微波与光波的另一个优点是它们的传播特性。我们可以把它的波束很容易地约束在一个很窄的方向,从而避免了互相干扰。同时可以用适当的波导实现低损耗远距离传输。

以上的特性使得微波和光波非常适合于现代信息量爆炸的社会需要,所以它们得以蓬勃发展。形成微波学与光光学或称微波与光电子学这样的前沿学科。

微波与光波同属电磁波,它们的行为和特性有许多相同或相通之处,分析方法亦互相借鉴。然而,以往微波和光学分属两大学科,迄今尚缺少将二者紧密结合,引导初学者进入这个研究领域的专著。国内外电动力学或电磁理论书籍不少,但多只为此方面打下一个初步基础的,读后尚难于直接参阅前沿科研论文及从事进一步研究。克潜和德杰的这本《微波与光电子学中的电磁理论》正好满足了这个需要。我们看到,本书既给出了电磁场与波的基础理论和相关的数学知识,使读者站稳第一步;同时所讨论的微波与光波的各个方面又相当深入、详尽。在给出

规矩的数学分析的同时,对每个问题的物理概念作了清楚、生动的描述。学习了这些知识就能相当顺利地阅读与这些问题有关的现代文献,掌握进行这方面科学研究的基本概念和分析方法,进而达到“登堂入室”的境地。作者经过多年的教学及研究实践,提炼出其中的精华,形成了这百万余言的著作,它是一本颇有特色的电动力学方面的专著。我为此书的完稿与出版深感庆幸,也为将进行这方面研究的读者和相邻学科的读者能有这样一本教科书或参考书而庆幸。

孟昭英

作 者 序

本书是根据作者在清华大学讲授研究生课程“高等电动力学”的手稿写成的。十余年来选修该课的研究生约计 250 人。他们分别来自电子工程系和物理系,研究方向均属物理电子学与光电子学及微波领域,包括微波与毫米波技术,微波电子学,微波声学,激光与光电子学,导波光学与集成光学,电子离子光学,薄膜物理与技术,表面物理与表面分析技术以及加速器物理与工程等。正如书名所示,本书的取材及举例主要集中在微波与光电子学中的电磁问题。本书的性质是物理电子学与光电子学学科的研究生基础课教材,但从事相近领域研究工作的研究生或科技工作者也可将本书作为一本中级电磁理论的参考书。

本书的主要目的是在本科电动力学的基础上将研究生的电磁理论水平提高一步,使读者达到能够较顺利地阅读有关的现代文献及从事应用基础性研究。本书的特点是对电磁场与波的属性及其各种形态作了比较广泛的论述,它们属于应用在多种不同技术领域的场与波问题。其目的是使读者获得较广泛和较全面的知识而不仅局限于其研究课题所涉及的狭窄范围,以收融汇贯通和触类旁通之效。作者认为知识的必要的广度同深度一样,对于培养研究工作者的创造性都是十分重要的。

考虑到选修本课的研究生及本书的读者将会来自不同的专业,具有不尽相同的知识背景,因此书中包括了一部分大学本科高年级课程的内容,特别是“微波技术”和“物理光学”中的内容。凡在大学本科阶段学习过上述课程的读者可将这些章节略去或仅作复习参考之用。读者只需学过大学本科水平的“电动力学”或“电磁场理论”及“高等数学”中的矢量分析、复变函数、线性代数、数理方程及特殊函数等内容,则阅读本书的基础就具备了。

第一章至第四章是全书的基础,包括电磁理论的基本定律——第一章,电磁波的基本规律——第三章,以及相关的数学知识——第二、四章。在第二章中除给出所需的数学工具外,还较系统地介绍了静态场问题的解析求解方法,这部分内容对某些研究方向是重要的,同时在近似分析某些微波或光电子器件中的场时也是有帮助的,即所谓“准静态法”。在第三章中除均匀平面波的基础知识外,还介绍了电磁波的传输线模拟和网络模拟,它们都是分析电磁波系统的有力工具,即所谓“等效电路法”,由此所引出的概念对理解波动系统的物理过程也是有帮助的。这些方法与概念主要是在微波研究中发展起来的,但现已越来越多地用于光波、声波等广泛领域。

第五章至第七章的内容属于在有边界限制情况下电磁波传播的规律和各种形态,即导波系统或传输系统。按边界类型分为导体边界——第五章,介质边界——第六章和周期性边界——第七章。在这三章中按理论体系分门别类地剖析了微波与光电子学中及其他相近领域中涉及的多种导波系统。将散见于各种书籍、文献中的,用不同方法处理的导波问题统一用“博格斯位函数法”进行分析求解,力求前后呼应,脉络清楚,望能有助于读者理解和掌握。

模式耦合理论本应独立成章,但因全书篇幅所限,只能作初步介绍,故将它与周期系统合为第七章。

第八章及第九章的内容承接第三章,属于电磁波在无边界限制情况下的传播规律和各种形态。第八章叙述电磁波在色散媒质和各向异性媒质中的传播;第九章介绍高斯波束在空间的

传播。这些都是现代微波技术与光波技术中越来越多地涉及的问题。此外,在第八章中还介绍了两种非麦克斯韦波,它们不是基于电场与磁场之间相互作用而形成的,即空间电荷波和静磁波。它们只是众多的非麦克斯韦波的两个例子,希望能帮助读者涉猎更广泛的波动领域。受篇幅的限制,对它们的论述只能是初步的。

第十章的内容是标量衍射理论。除一般的平面波标量衍射外,还探讨了高斯波束的衍射问题和各向异性媒质中的衍射问题,这是光电子学中的重要课题。矢量衍射理论艰深繁冗,非本书篇幅所能容纳,书中未予涉及。因此,这一章主要适用于光电子学或光波技术中的衍射问题,即波长远小于障碍物线尺寸的情况。

电磁理论中还有许多重要论题,如辐射理论,非线性理论,导波系统不均匀性分析,变截面导波系统,相对论电动力学,电磁场的数值解法等在本书中都未能涉及。这是受本书的性质、对象、篇幅及作者知识范围所限。一个人学得越多就越知道自己已经学习和掌握的知识与尚未学习和尚未掌握的知识相比只是沧海一粟。古语云“学然后知不足”,信哉。

电磁理论及其应用的中外著作浩如烟海。书后列出的参考书目是写作本书时曾经参阅过的书籍和作者认为值得推荐给读者的参考书。为了深入学习某些章节的内容需要阅读一些原始文献,作者认为重要的都以脚注的形式列出。

本书第一至第八章由张克潜执笔,第九、十两章由李德杰执笔,最后由张克潜总成全书。

在本书蕴酿和写作的漫长过程中,曾与作者所在的清华大学电子工程系电子物理教研组的许多同事一起研习、切磋,获益匪浅。清华大学电机工程系宫莲教授校对了大部分书稿。电子物理与器件教材编审组组长、东南大学杨祥林教授,责任编辑、浙江大学周文教授及编审组全体委员对本书提出了许多有益的建议。北京大学徐承和教授认真审阅了书稿并提出许多中肯的、有价值的意见和建议。电子工业出版社吴金生副社长及有关人员为本书的编辑、出版做了出色的工作。在此一并表示感谢。

四十年前,在清华大学,故业师常迥教授讲授“电波学”,业师孟昭英教授讲授“微波技术”,并开创微波电子学研究工作,引导作者及作者所在的教研组入场与波的领域,并为其后的发展打下了基础。在本书成书之际,作者深切怀念先师常迥教授。作者愿将此书献给孟昭英教授以表敬意。

作者于清华大学

1994. 10.

符号一览表

<p>A 复数值 } ①任意矢量函数②矢量位 \mathcal{A} 瞬时值 }</p> <p>A ①A的分量②常数</p> <p>\mathcal{A} \mathcal{A}的分量</p> <p>B 复数值 } ①任意矢量函数 \mathcal{B} 瞬时值 } ②磁感应强度矢量</p> <p>B ①B的分量②常数</p> <p>\mathcal{B} \mathcal{B}的分量</p> <p>C ①电容②常数</p> <p>c 真空中的光速</p> <p>A, B, C, D 转移矩阵参量</p> <p>a, b, c, d ①归一化转移矩阵参量 ②代表尺寸</p> <p>D 复数值 } 电感应强度或电位移矢量 \mathcal{D} 瞬时值 }</p> <p>D ①D的分量②常数</p> <p>\mathcal{D} \mathcal{D}的分量</p> <p>E 复数值 } 电场强度矢量 \mathcal{E} 瞬时值 }</p> <p>E E的分量</p> <p>\mathcal{E} \mathcal{E}的分量</p> <p>e ①自然对数的底②电子电量</p> <p>F 复数值 } ①力 ②附加矢量函数 \mathcal{F} 瞬时值 }</p> <p>F F的分量 } 或附加标量函数 \mathcal{F} \mathcal{F}的分量 }</p> <p>f ①任意标量函数②频率</p> <p>G 标量格林函数</p> <p>g 任意标量函数</p> <p>H 复数值 } 磁场强度矢量 \mathcal{H} 瞬时值 }</p> <p>H H的分量</p> <p>\mathcal{H} \mathcal{H}的分量</p> <p>h_1, h_2, h_3 拉梅系数</p> <p>I 电流</p>	<p>J 电流密度</p> <p>j $\sqrt{-1}$</p> <p>k 波矢</p> <p>k 波矢的分量, 相移常数</p> <p>l 长度, 曲线</p> <p>dl 线元</p> <p>l, m, n, p 正整数, 模式号, 函数的阶</p> <p>M 复数值 } 磁化强度矢量 \mathcal{M} 瞬时值 }</p> <p>M M的分量</p> <p>\mathcal{M} \mathcal{M}的分量</p> <p>m 磁偶极矩</p> <p>n 法向单位矢量</p> <p>n 折射率</p> <p>P 复数值 } 极化强度矢量 \mathcal{P} 瞬时值 }</p> <p>P ①P的分量②功率</p> <p>\mathcal{P} \mathcal{P}的分量</p> <p>p 电偶极矩</p> <p>p ①功率密度②p的分量</p> <p>J, N, I, K, H, P, Q 贝塞尔函数及勒让德函数</p> <p>q 电荷电量</p> <p>r, R 距离, 半径</p> <p>S 坡印亭矢量</p> <p>dS 面元</p> <p>S ①面积, 曲面②散射矩阵参量</p> <p>t 时间</p> <p>T ①周期②横向坐标③横向本征值 ④传输矩阵参量</p> <p>u_1, u_2, u_3 任意曲坐标</p> <p>v 速度, v, 相速, v, 群速, v, 能速</p> <p>V 体积</p> <p>dV 体元</p> <p>w ①能量密度②复函数</p>
--	---

W	能量
x, y, z	矩坐标
x	坐标矢量
X, Y, Z	矩坐标中分离变量函数
$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$	矩坐标单位矢量
Y	导纳, 导纳矩阵参量
y	归一化导纳, 归一化导纳矩阵参量
Z	阻抗, 阻抗矩阵参量
z	①归一化阻抗, 归一化阻抗 矩阵参量②复函数

希腊字母

α	①角度②衰减系数
β	①角度②相移系数
γ	①角度②传播系数③旋磁比
δ	① δ 函数②穿透深度
ϵ	介电率
ζ, η, ξ	任意坐标
η	波阻抗
θ	角度
θ_B	布儒斯特角
θ_c	临界角
κ	耦合系数
λ	波长
λ_c	临界波长

λ_g	导波波长
μ	导磁率
ν	函数的非整数阶数
π	圆周率
π	赫兹矢量瞬时值
ρ	电荷密度
ρ, ϕ, z	圆柱坐标
$\hat{\rho}, \hat{\phi}, \hat{z}$	圆柱坐标单位矢量
r, θ, ϕ	球坐标
$\hat{r}, \hat{\theta}, \hat{\phi}$	球坐标单位矢量
σ	导电率
τ	横向本征值
φ	①任意标量函数②电位
χ	极化率或磁化率
ψ	任意标量函数
ω	角频率

大写希腊字母

Γ	反射系数
$R, \Theta, \Phi,$	球坐标分离变量函数
$R, \Phi, Z,$	圆柱坐标分离变量函数
Π	赫兹矢量复数值
Π	Π 的分量
Ω	立体角

目 录

出版说明
序
作者序
符号一览表

第一章 宏观电磁理论基本定律

1.1 麦克斯韦方程..... (1)	1.4.1 瞬时值的坡印亭定理 (23)
1.1.1 基本的麦克斯韦方程 (1)	1.4.2 复数坡印亭定理 (25)
1.1.2 媒质的极化与磁化,媒质中的麦克斯韦 方程 (3)	1.4.3 无损色散媒质中的复数坡印亭定理 (27)
1.1.3 复数麦克斯韦方程 (9)	1.5 电磁场的位函数 (29)
1.1.4 色散媒质,复数介电率与复数导磁率 (11)	1.5.1 动态位,达朗伯方程 (29)
1.1.5 等效磁荷与等效磁流,电磁场的 对偶性 (13)	1.5.2 达朗伯方程的解,滞后位 (32)
1.2 边界条件方程 (13)	1.5.3 复数达朗伯方程,简谐滞后位 (34)
1.3 波动方程 (17)	1.6 赫兹矢量 (36)
1.3.1 简单媒质中瞬时值形式的波动方程—— 时域波动方程 (17)	1.7 电磁场的几个基本原理和定理 ... (38)
1.3.2 无源波动方程的时域解,电磁场的 波动性 (19)	1.7.1 叠加定理 (38)
1.3.3 复数形式的波动方程—频域波动 方程 (22)	1.7.2 对偶定理 (39)
1.4 坡印亭定理 (23)	1.7.3 唯一性定理 (40)
	1.7.4 等效性原理 (40)
	1.7.5 镜像原理 (41)
	1.7.6 洛仑兹互易定理 (42)
	习题 1 (43)

第二章 泊松方程和拉普拉斯方程的边值问题

2.1 泊松方程和拉普拉斯方程 (46)	2.5.3 二维格林函数 (58)
2.2 标量位函数的边界条件 (49)	2.5.4 一些简单边界的狄利克里格林函数 (58)
2.2.1 面电荷 (49)	2.5.5 泊松积分公式 (63)
2.2.2 面偶极 (50)	2.5.6 格林函数应用举例 (63)
2.2.3 导体边界条件 (52)	2.6 格林互易定理 (65)
2.3 泊松方程边值问题的积分公式 ... (52)	2.6.1 格林互易定理的表达式 (65)
2.4 泊松方程边值问题的唯一性定理 (54)	2.6.2 格林互易定理应用举例 (66)
2.5 标量格林函数 (56)	2.7 分离变量和正交函数展开 (67)
2.5.1 狄利克里边值问题的格林函数 (56)	2.7.1 正交曲坐标中的矢量分析展开式 ... (67)
2.5.2 诺依曼边值问题的格林函数 (57)	2.7.2 可分离变量的坐标系统 (69)

2.7.3	本征值问题和正交展开	(70)	的加法定理	(103)	
2.7.4	几种常用坐标系统中的谐函数集	(72)	2.9.2	点电荷电位的柱谐函数展开式,柱谐函数的加法定理	(107)
2.7.5	用分离变量法求泊松积分公式的正交函数展开式	(87)	2.9.3	电位函数的多极展开	(108)
2.7.6	分离变量法求解拉普拉斯方程举例	(88)	2.9.4	用分离变量法求解泊松方程举例	(111)
2.8	格林函数的正交展开	(90)	2.10	二维位场问题,复位函数及保角映射	(112)
2.8.1	三维 δ 函数在正交曲坐标中的表达式	(90)	2.10.1	解析复变函数与复位函数	(113)
2.8.2	球面格林函数的正交展开	(92)	2.10.2	用保角映射法求解二维位场	(114)
2.8.3	柱面格林函数的正交展开	(97)	2.10.3	多角形域的映射,施瓦兹变换	(120)
2.8.4	格林函数正交展开应用举例	(101)	2.10.4	施瓦兹变换举例	(124)
2.9	泊松方程的正交函数展开求解	(102)	2.10.5	椭圆函数的应用	(129)
2.9.1	点电荷电位的球谐函数展开式,球谐函数	(102)	习题 2	(133)	

第三章 电磁波基础

3.1	简谐均匀平面电磁波	(137)	3.3.8	渐消场和表面波	(170)
3.1.1	不导电媒质中的均匀平面波	(137)	3.3.9	介质界面反射系数的模和角及偏振态变化	(172)
3.1.2	沿任意方向传播的均匀平面波	(139)	3.3.10	电磁波在导电媒质界面的反射和透射	(176)
3.1.3	均匀平面波的能量流与能量	(142)	3.4	电磁波的传输线模拟	(178)
3.1.4	导电媒质中的平面波,电磁波的衰减	(143)	3.4.1	电报方程及其解	(179)
3.2	电磁波的偏振	(146)	3.4.2	无损传输线上的反射、驻波及阻抗	(182)
3.2.1	由两个线偏振波合成任意偏振态的波	(147)	3.4.3	传输线圆图	(189)
3.2.2	琼斯矩阵	(151)	3.4.4	电磁波系统的等效传输线	(193)
3.2.3	由两个圆偏振波合成任意偏振态的波	(151)	3.5	电磁波的网络模拟	(194)
3.2.4	斯托克斯参数和邦加球	(152)	3.5.1	线性多口网络的网络矩阵和网络参量	(194)
3.2.5	单色波和多色波,完全偏振波,部分偏振波和非偏振波	(153)	3.5.2	网络矩阵的性质	(199)
3.3	电磁波的反射与透射	(154)	3.5.3	双口网络	(203)
3.3.1	斯奈尔定律,电磁波的方向关系	(154)	3.5.4	基本电路元件的网络参数	(210)
3.3.2	菲涅尔定律,电磁波复数振幅的关系	(156)	3.6	电磁波在多层媒质界面上的反射和透射,阻抗变换器	(216)
3.3.3	电磁波垂直入射于理想导体表面	(160)	3.6.1	单介质层的两个界面,单节阻抗变换器	(217)
3.3.4	电磁波垂直入射于媒质界面	(163)	3.6.2	双介质层,二节阻抗变换器	(220)
3.3.5	电磁波斜入射于理想导体表面,导波	(164)	3.6.3	多层介质及多节阻抗变换器的设计问题	(222)
3.3.6	布儒斯特角,全偏振	(167)	3.6.4	小反射理论	(226)
3.3.7	全反射,临界角	(168)	3.6.5	交替变化折射指数多层光学薄膜	

第四章 亥姆霍兹方程的边值问题

4.1 时变场问题的唯一性定理..... (235)	4.5.2 矢量本征函数的正交性及正交展开 (253)
4.1.1 混合问题的唯一性定理 (235)	4.6 矩坐标系统中亥姆霍兹方程的解 (255)
4.1.2 亥姆霍兹方程边值问题的唯一性定理 (236)	4.6.1 以 z 作为 u_3 (255)
4.1.3 分区求解亥姆霍兹方程边值问题的 唯一性定理 (237)	4.6.2 以 x 或 y 作为 u_3 (257)
4.2 正交曲坐标系统中矢量亥姆霍兹 方程的化简..... (239)	4.7 圆柱坐标系统中亥姆霍兹方程 的解..... (258)
4.2.1 博格斯位函数法 (240)	4.8 球坐标系统中亥姆霍兹方程的解 (260)
4.2.2 赫兹矢量法 (244)	4.9 亥姆霍兹方程复杂边值问题的 近似解..... (265)
4.2.3 纵向分量法 (245)	4.9.1 本征值的变分原理 (265)
4.3 亥姆霍兹方程的边界条件..... (247)	4.9.2 近似边界条件 (267)
4.4 柱形系统中的电磁波..... (249)	习题 4 (270)
4.5 矢量本征函数..... (251)	
4.5.1 亥姆霍兹方程边值问题的本征值 (251)	

第五章 金属波导与谐振腔

5.1 金属波导的一般特性..... (271)	5.4.4 圆波导及圆柱谐振腔 (303)
5.1.1 金属波导的传播特性 (272)	5.4.5 柱面喇叭波导和渐开双平板传输线 (308)
5.1.2 金属波导的波阻抗 (274)	5.4.6 径向传输线及径向线谐振腔 (311)
5.1.3 金属波导中的功率流 (274)	5.5 球坐标系统的谐振腔与传输线 (314)
5.1.4 金属波导中电磁波的衰减 (276)	5.5.1 球形谐振腔 (314)
5.2 谐振腔的一般特性..... (277)	5.5.2 双锥传输线与双锥谐振腔 (316)
5.2.1 谐振腔的固有频率和能量平衡 (278)	5.6 重入谐振腔,复杂边界条件问题 (319)
5.2.2 谐振腔的损耗,品质因数 (278)	5.6.1 重入谐振腔的严格解 (321)
5.3 矩形系统的波导与谐振腔..... (279)	5.6.2 重入谐振腔的近似解 (323)
5.3.1 矩形波导 (279)	5.7 微扰原理..... (327)
5.3.2 双平板传输线 (286)	5.7.1 谐振腔的导体微扰 (327)
5.3.3 矩形谐振腔 (289)	5.7.2 谐振腔的介质微扰 (330)
5.4 圆柱坐标系统的波导与谐振腔 (293)	5.7.3 波导的微扰 (332)
5.4.1 扇形截面柱谐振腔 (293)	习题 5 (333)
5.4.2 扇形截面波导 (297)	
5.4.3 同轴线及同轴谐振腔 (298)	

第六章 介质波导与介质谐振器

6.1 充填不同媒质的金属波导 (336)	6.1.1 除沿媒质界面均匀的 TE 模式外,其他 TE、TM 模式的场均不能满足充填不同媒
--------------------------------	---

质的波导的边界条件	(336)	光纤	(362)
6.1.2 充填不同媒质的金属波导中的 $TE^{(x)}$ 模及 $TM^{(x)}$ 模	(339)	6.6.1 圆介质波导的场解和特征方程	(363)
6.2 对称平面介质波导	(343)	6.6.2 圆介质波导中的角向均匀模式	(367)
6.2.1 对称平面介质波导的 TM 模	(344)	6.6.3 圆介质波导中的角向非均匀模式	(370)
6.2.2 对称平面介质波导的 TE 模	(346)	6.6.4 弱导光纤	(376)
6.2.3 对称平面介质波导的传播特性	(347)	6.6.5 弱导光纤中的线偏振模	(379)
6.2.4 对称平面介质波导中的场分布	(349)	6.6.6 光纤的衰减,电磁信号的远距离传输	(382)
6.2.5 对称平面介质波导的最低模式	(350)	6.7 敷介质圆导体棒	(382)
6.3 敷介质导体板和介质镜像波导	(353)	6.8 介质谐振器	(385)
6.4 非对称平面介质波导	(353)	6.8.1 圆柱介质谐振器的开路壁(磁壁)近似求解	(385)
6.4.1 非对称平面介质波导的 TM 模	(354)	6.8.2 截止波导法近似求解	(388)
6.4.2 非对称平面介质波导的 TE 模	(355)	6.8.3 截止波导-截止径向线法	(390)
6.4.3 非对称平面介质波导特征方程的研究,弱导条件	(356)	6.8.4 实际介质谐振器	(392)
6.5 条形介质波导	(359)	习题 6	(394)
6.6 圆截面介质波导和阶跃折射指数			

第七章 慢波与周期系统,模式耦合

7.1 慢波系统的主要特性	(397)	7.7.3 螺旋带模型——螺旋性周期系统	(427)
7.2 平板折迭表面结构作为均匀系统	(398)	7.8 指状线	(433)
7.2.1 开敞结构	(398)	7.8.1 单级周期系统,梳状线	(434)
7.2.2 封闭结构,带盖板的折迭结构	(400)	7.8.2 多级周期系统	(436)
7.3 髻荷波导作为均匀系统	(401)	7.8.3 叉指线及曲折线	(437)
7.3.1 带中心孔的髻荷波导	(401)	7.9 模式耦合	(441)
7.3.2 边缘孔髻荷波导	(403)	7.9.1 谐振系统的模式耦合——时间模式耦合	(441)
7.4 周期系统	(405)	7.9.2 传输系统的模式耦合——空间模式耦合	(444)
7.4.1 周期系统中的空间谐波,弗洛奎定理	(405)	7.9.3 介质光波导定向耦合器及开关	(447)
7.4.2 周期系统的色散特性,布里渊图	(408)	7.10 周期性分布反馈结构	(449)
7.4.3 耦合谐振腔链	(409)	7.10.1 周期性分布反馈结构的基本原理	(450)
7.4.4 周期系统的耦合阻抗及场分布	(411)	7.10.2 分布反馈结构作为反射滤波器	(452)
7.5 平板折迭表面结构作为周期系统	(412)	7.10.3 四分之一波长位移分布反馈谐振腔	(454)
7.6 髻荷波导作为周期系统	(416)	习题 7	(456)
7.7 螺旋线	(418)		
7.7.1 螺旋导片模型——均匀系统	(420)		
7.7.2 螺旋导片中的主模	(424)		

第八章 色散媒质和各向异性媒质中的电磁波

- 8.1 媒质的色散与吸收 (460)
 - 8.1.1 媒质色散与吸收的经典理论 (460)
 - 8.1.2 正常色散与非正常色散, 谐振吸收 (462)
 - 8.1.3 低频极限, 电导率 (464)
 - 8.1.4 高频极限, 等离子频率 (465)
- 8.2 电磁波在色散媒质中的相速、群速与能速 (466)
 - 8.2.1 相速 (466)
 - 8.2.2 群速 (468)
 - 8.2.3 能速 (471)
 - 8.2.4 传输系统的材料色散, 波导色散的模间色散 (473)
- 8.3 各向异性媒质及其构成矩阵 (474)
 - 8.3.1 无源无损双各向异性媒质构成矩阵的对称性 (475)
 - 8.3.2 无源无损单各向异性媒质构成矩阵的对称性, 互易媒质和回旋媒质 (476)
- 8.4 电磁波在各向异性媒质中传播的特点 (477)
 - 8.4.1 各向异性媒质中的麦克斯韦方程和波动方程 (477)
 - 8.4.2 各向异性媒质中电磁波的波矢, 功率流与场的方向关系 (478)
 - 8.4.3 KDB 坐标系 (480)
- 8.5 互易媒质中的电磁波 (483)
 - 8.5.1 无磁非旋光晶体的介电率张量 (483)
 - 8.5.2 电磁波在单轴晶体中的传播 (484)
 - 8.5.3 电磁波在互易晶体介质中传播的一般描述 (491)
- 8.6 电子注中的波 (505)
 - 8.6.1 电子注的等效介电率张量及平面波在其中的传播 (506)
 - 8.6.2 空间电荷波 (509)
- 8.7 非互易媒质, 回旋媒质 (511)
 - 8.7.1 有限磁场中的等离子体 (513)
 - 8.7.2 磁场中的铁氧体, 旋磁媒质 (516)
- 8.8 磁化等离子体中的平面电磁波 (525)
 - 8.8.1 磁化等离子体中沿磁化方向传播的平面波 (525)
 - 8.8.2 磁化等离子体中沿垂直于磁化方向传播的平面波 (527)
- 8.9 旋磁媒质中的平面电磁波 (528)
 - 8.9.1 旋磁媒质中沿任意方向传播的平面波 (529)
 - 8.9.2 法拉第旋转 (535)
- 8.10 静磁波 (537)
 - 8.10.1 静磁波方程 (538)
 - 8.10.2 静磁波模式 (540)
- 习题 8 (550)

第九章 高斯波束

- 9.1 波动方程的傍轴近似 (551)
- 9.2 基模高斯波束 (552)
- 9.3 高斯波束的特性 (553)
 - 9.3.1 高斯波束的傍轴近似条件 (553)
 - 9.3.2 束半径、曲率半径和发散角 (554)
 - 9.3.3 相速与群速 (555)
 - 9.3.4 高斯波束中电场和磁场分布 (556)
 - 9.3.5 高斯波束中的能量和能流 (557)
- 9.4 高斯波束变换 (558)
 - 9.4.1 常用高斯波束变换 (558)
 - 9.4.2 ABCD 定律及其应用 (561)
 - 9.4.3 高斯波束的非薄透镜变换 (562)
- 9.5 椭圆高斯波束 (563)
- 9.6 高阶高斯波束 (566)
 - 9.6.1 厄米-高斯波束 (566)
 - 9.6.2 拉盖尔-高斯波束 (568)
- 9.7 高斯波束在二次方折射率媒质中的传播 (571)
 - 9.7.1 一般规律 (572)
 - 9.7.2 实二次方折射率媒质中的高斯波束 (574)
 - 9.7.3 虚二次方折射率媒质中的高斯波束 (475)
 - 9.7.4 二次方折射率媒质中厄米-高斯光束的稳

态解	(577)	传播	(578)
9.8 高斯波束在各向异性媒质中的		习题 9	(582)

第十章 标量衍射理论及其应用

10.1 基尔霍夫-惠更斯衍射积分	(585)	10.6.3 圆孔的非涅尔衍射	(605)
10.2 菲涅尔-基尔霍夫衍射定理	(586)	10.7 高斯波束在各向异性媒质中的	
10.3 瑞利-索末菲衍射定理	(587)	衍射	(607)
10.4 平面波与球面波的衍射	(588)	10.8 空间电磁场分布的本征波函数	
10.4.1 平面波与球面波入射时的衍射公式		展开	(612)
.....	(589)	10.8.1 矩坐标系中电磁场平面波展开 ...	(612)
10.4.2 圆孔的夫琅和费衍射	(591)	10.8.2 圆柱坐标系中电磁场分布的本征波函数	
10.4.3 圆孔的非涅尔衍射	(593)	展开	(613)
10.5 高斯波束的衍射	(595)	10.8.3 非均匀媒质中电磁场本征波函数	
10.5.1 高斯波束的夫琅和费衍射	(595)	展开	(615)
10.5.2 高斯波束的非涅尔圆孔衍射	(597)	10.8.4 各向异性媒质中场分布本征波函数	
10.6 电磁波在各向异性媒质中的衍射		展开	(618)
.....	(599)	10.8.5 各向异性非均匀媒质中电磁场分布本征	
10.6.1 方孔的夫琅和费衍射	(599)	波函数展开	(619)
10.6.2 圆孔的夫琅和费衍射	(603)	习题 10	(621)

附 录

A1 物理常数	(623)	A5 矢量恒等式	(629)
A2 中国法定计量单位制——国际单位制		A6 圆柱函数常用公式	(631)
(SI)	(623)	A7 球函数常用公式	(635)
A3 高斯单位制与国际单位制的换算		A8 矩阵与张量常用公式	(637)
.....	(625)	A9 史密斯圆图	(640)
A4 矢量微分运算在正交坐标系中的		参考书目	(641)
展开	(627)		

第一章 宏观电磁理论基本定律

本书主要是建立在宏观电磁理论的基础上。在本书的开始,有必要对宏观电磁理论的基本定律作一扼要的叙述。这些基本定律已包括在大学本科水平的“电动力学”或“电磁场理论”课程中。因此本章具有复习的性质。

本章的内容为

真空和连续媒质中的麦克斯韦方程;

边界条件方程——媒质界面上的麦克斯韦方程;

波动方程和扩散方程;

电磁场的能量和能流;

电磁场的位函数,达朗伯方程;

赫兹矢量;

电磁场的几个基本原理和定理。

1.1 麦克斯韦方程

麦克斯韦(J. C. Maxwell)回顾和总结了前人关于电磁现象的实验研究成果,发展了法拉第(M. Faraday)首倡的“场”的概念,加上他本人提出的“位移电流”概念,于1864年给出一套完整的宏观电磁场基本方程,这就是麦克斯韦方程^①。[38]

1.1.1 基本的麦克斯韦方程

基本的麦克斯韦方程是瞬时值形式的或称时域的,真空中的一组矢量偏微分方程。方程中涉及的矢量函数都是空间坐标 \boldsymbol{x} 及时间 t 的函数,在矩坐标中:

$$\boldsymbol{\mathcal{A}}(\boldsymbol{x}, t) = \hat{x}\mathcal{A}_x(\boldsymbol{x}, t) + \hat{y}\mathcal{A}_y(\boldsymbol{x}, t) + \hat{z}\mathcal{A}_z(\boldsymbol{x}, t)$$

$\mathcal{A}_x, \mathcal{A}_y, \mathcal{A}_z$, 是矢量函数的三个分量,它们都是空间及时间的标量函数。 \boldsymbol{x} 为空间坐标矢量,

$$\boldsymbol{x} = \hat{x}x + \hat{y}y + \hat{z}z$$

$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 为三个坐标方向的单位矢量。

基本的麦克斯韦方程的积分形式是:

$$\oint_l \boldsymbol{\mathcal{E}} \cdot d\boldsymbol{l} = - \frac{d}{dt} \int_s \boldsymbol{\mathcal{B}} \cdot d\boldsymbol{S} \quad (1-1)$$

$$\oint_l \frac{\boldsymbol{\mathcal{B}}}{\mu_0} \cdot d\boldsymbol{l} = \frac{d}{dt} \int_s \epsilon_0 \boldsymbol{\mathcal{E}} \cdot d\boldsymbol{S} + \mathcal{J} \quad (1-2)$$

$$\oint_s \epsilon_0 \boldsymbol{\mathcal{E}} \cdot d\boldsymbol{S} = q \quad (1-3)$$

^① 虽然现在常用的方程形式是赫维赛(O. Heaviside)在后来提出的,但其物理本质与麦克斯韦的方程相同,故习惯上仍以麦克斯韦命名。