



普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

光纤技术及应用 (第二版)

石顺祥 孙艳玲 马琳 刘继芳 编著

 科学出版社

普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

光纤技术及应用

(第二版)

石顺祥 孙艳玲 马琳 刘继芳 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以光的电磁理论为基础,系统地介绍了光纤技术的基本原理、基本器件和光纤通信技术、光纤传感技术基础。第1章主要阐述了光波传输的理论基础;第2章讨论了平板光波导的传输理论;第3章和第4章详细讨论了光纤传输原理和光纤传输特性;第5章介绍了光纤无源和有源器件;第6章简单地介绍了光纤及光缆制造技术;第7章较系统地介绍了光纤通信技术;第8章较系统地介绍了光纤传感技术。

本书可作为高等学校光电子技术、电子科学与技术、光信息科学与技术、光电信息科学与工程等专业本科生的专业课教材,也可供高等学校相关专业师生和有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤技术及应用/石顺祥等编著. —2版. —北京:科学出版社,2016.5

普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

ISBN 978-7-03-048293-8

I. ①光… II. *①石… III. ①光学纤维—高等学校—教材 IV. ①TN252

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第103604号

责任编辑:潘斯斯 张丽花/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2016年6月第一次印刷 印张:21

字数:526 000

定价:59.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

本书是为从事光电子技术、光纤通信、集成光学、光纤传感技术等专业工作的学生和科技人员,根据光电子技术、电子科学与技术、光信息科学与技术和光电信息科学与工程等专业的专业基础课“光纤技术及应用”的教学大纲编写的教材,通过本书学习,能使读者基于光的电磁理论,系统地掌握光波在光纤中的传输原理和传输特性,掌握实用光纤传输器件原理和制作,以及光纤通信、光纤传感技术的基础理论和应用。

本书内容特别注意光电子技术专业人员的电磁场理论知识和教学体系,特别注意工科专业技术人员的培养特点,突出教材的系统性、逻辑性、严谨性和由浅入深的可自学性。全书共8章:第1章主要阐述了光传输的理论基础;第2章讨论了最简单,同时又具有实用价值的平板光波导传输理论;第3章和第4章分别用射线光学和波动光学两种理论方法讨论了光纤传输原理,特别讨论了光纤中的模式特性、光纤的损耗和色散特性,这是从事光纤技术及应用人员必须掌握的基本理论;第5章介绍了光纤技术及应用中常用的光纤无源和有源器件;第6章简单地介绍了光纤及光缆制造技术;第7章和第8章较系统地介绍了当前光纤技术在光纤通信和光纤传感领域中的应用。

本书第一版于2009年9月由华中科技大学出版社出版,受到了国内同行的厚爱。本书的定位、体系和内容得到了充分肯定,也有人对本书提出了很好的建议。本书第一版已被国内许多高校选作为教材或参考书。根据第一版的使用情况,以及出版本书的目标,作者在科学出版社的支持下,编写了《光纤技术及应用(第二版)》。第二版保留了第一版的基本结构,根据第一版的使用情况,并为适应光电子技术的发展,对内容进行了适当的修改和必要的补充,使本书的论述更加系统和严谨,更便于教学和读者自学。

作者期望本书的出版,能够有助于推动国内高校光纤技术及应用的教学工作。

作者感谢关心和帮助本书修订出版的同行和读者,衷心期望并热忱欢迎专家、同行和读者提出宝贵意见。

作者

2016年4月1日

第一版前言

20 世纪 70 年代,伴随着半导体激光器的实用化和低损耗光纤的研制成功,光纤通信技术和光纤传感技术有了飞速的发展,并构成了光电子技术产业的两大支柱。20 世纪 90 年代以来,全世界信息化的浪潮已成为不可阻挡的趋势,光纤通信已成为信息高速公路的主体,而光纤传感技术的发展、光纤传感器系统的逐步实用化,也推动了作为信息技术重要基础的传感技术的蓬勃发展。可以说,光纤通信将是未来通信发展的主流趋势,光纤传感技术也必将成为传感技术的主导,光网络、光计算机则将会把人们带入一个崭新的光信息时代。为了适应这种新形势的发展,特别是对于光电子技术、光纤通信、集成光学、光纤传感技术等专业的学生和科技人员来说,学习和研究光波在光纤中的传输理论、光纤器件和制作技术,学习和研究光纤通信技术、光纤传感技术的基本理论和应用,是十分必要的。

本教材是作者在西安电子科技大学长期从事光电子技术专业“光纤技术及应用”课程教学的基础上,根据光电子技术、电子科学与技术 and 光信息科学与技术等专业的专业课“光纤技术及应用”的教学大纲编写的,目的是通过该课程的学习使相关专业的学生基于光的电磁理论,系统地掌握光波在光纤中的传输原理和传输特性,掌握实用的光纤传输器件和光纤通信、光纤传感技术的基础理论和应用。本教材的主要内容包括光波在平板波导、光纤中的传输理论,光纤器件,光纤制造技术,光纤通信技术和光纤传感技术的基本原理。在教材的编写中,特别注意光电子技术专业人员的电磁理论、教学体系,特别注意工科技术人员的培养特点,突出教材的系统性、逻辑内容由浅入深,便于学习。

本教材共分为 8 章,第 1 章主要阐述光波传输的理论基础;第 2 章讨论最简单,同时又具有实用价值的平板光波导传输理论;第 3、4 章分别用射线光学和波动光学两种理论详细讨论光纤传输原理,特别讨论光纤中的模式特性、光纤的损耗和色散特性,这是从事光纤技术及应用人员必须掌握的理论基础;第 5 章介绍光纤技术及应用中常用的光纤无源和有源器件;第 6 章简单地介绍光纤及光缆制造技术;第 7、8 章较系统地介绍光纤通信技术和光纤传感技术及应用。

本教材的参考学时为 60 学时,可作为光电子技术、电子科学与技术、光信息科学与技术、通信工程等专业的本科生专业课“光纤技术及应用”使用教材,对于研究生和相关科技人员也可以作为参考书。使用本教材的先修课程是大学普通物理,对于具有一定的电磁场理论知识和物理光学知识的人员,使用本教材更加有利。

本教材由西安电子科技大学石顺祥主编,孙艳玲编写第 1~4 章,马琳编写第 5、6 章,刘继芳编写第 7 章,石顺祥编写第 8 章并统稿。在编写过程中,得到了西安电子科技大学技

术物理学院老师的帮助，对此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，错误在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2009年5月1日

目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 光传输的理论基础	1
1.1 麦克斯韦方程和波动方程	1
1.1.1 麦克斯韦方程和边界条件	1
1.1.2 波动方程	2
1.2 平面光波及其在介质界面上的反射和折射	3
1.2.1 均匀平面光波	3
1.2.2 平面光波在介质界面上的反射和折射	5
1.2.3 平面光波的全反射	8
1.3 程函方程与光线方程	10
1.3.1 局部平面波	10
1.3.2 射线光学方程	10
思考题	12
参考文献	12
第 2 章 平板介质波导	13
2.1 阶跃平板波导的射线光学理论分析	13
2.1.1 均匀平面光波在平板波导中的传输	13
2.1.2 非均匀平面光波在平板波导中的传输	18
2.2 阶跃平板波导的波动光学理论分析	20
2.2.1 平板波导中的模式	20
2.2.2 导模	22
2.2.3 辐射模	25
2.2.4 泄漏模、消失模	26
2.3 渐变折射率平板波导	27
2.3.1 射线光学理论分析	27
2.3.2 波动光学理论分析	29
2.4 模式的正交性和完备性	30
2.4.1 模式的正交性	30
2.4.2 模式的完备性	31
2.5 非理想波导中的模式耦合	32
2.5.1 耦合模理论	32

2.5.2	周期性平板波导	34
2.5.3	波导间的模式耦合	40
	思考题	43
	参考文献	43
第 3 章	光纤	44
3.1	光纤的射线光学理论	44
3.1.1	阶跃光纤	44
3.1.2	梯度光纤	48
3.2	光纤的波动光学理论	52
3.2.1	阶跃光纤中的矢量解	52
3.2.2	弱导光纤中场的标量近似解 (LP 模)	58
3.2.3	梯度光纤中的导模场解	61
3.3	非均匀光纤	65
3.3.1	光纤光栅	65
3.3.2	光子晶体光纤	68
3.4	特殊材料光纤	73
	思考题	75
	参考文献	76
第 4 章	光纤的传输特性	78
4.1	光纤损耗	78
4.1.1	光纤损耗的表示	78
4.1.2	光纤损耗机制	78
4.2	光纤色散	81
4.2.1	光纤色散的定义和种类	81
4.2.2	光信号在色散光纤中的传输	84
4.2.3	色散优化光纤	87
4.3	光纤偏振	90
4.3.1	光纤 (模式) 双折射	90
4.3.2	单模光纤的偏振模色散	91
4.3.3	保偏光纤	92
4.4	光纤中的非线性效应	93
	思考题	97
	参考文献	97
第 5 章	光纤器件	98
5.1	光纤无源器件	98
5.1.1	光纤无源器件的主要性能参数	98
5.1.2	光纤连接器	99
5.1.3	光纤定向耦合器	102

5.1.4	光波分复用器	107
5.1.5	光纤隔离器和环行器	111
5.1.6	光纤滤波器	113
5.1.7	光纤光栅	115
5.1.8	光开关和光衰减器	124
5.2	光纤有源器件	127
5.2.1	光纤放大器	128
5.2.2	光纤激光器	132
5.3	光纤器件的研究	136
	思考题	139
	参考文献	139
第 6 章	光纤光缆的制备	141
6.1	光纤材料与提纯	141
6.2	光纤预制棒的制备	142
6.2.1	CVD 制作光纤预制棒的发展历史	142
6.2.2	MCVD 法	143
6.2.3	VAD 法	148
6.2.4	其他的预制棒制造技术	150
6.2.5	光纤预制棒的生产现状	153
6.3	拉丝、涂覆和套塑	153
6.4	光纤成缆技术	158
	思考题	168
	参考文献	168
第 7 章	光纤通信技术	169
7.1	光纤通信系统的基本组成	169
7.1.1	信源	169
7.1.2	发送机	169
7.1.3	信道	171
7.1.4	接收机	171
7.1.5	信宿	172
7.2	光纤通信原理基础	172
7.2.1	模拟通信与数字通信	172
7.2.2	信息及其度量	174
7.2.3	信道及信道容量	177
7.2.4	通信系统的主要性能指标	180
7.3	光通信系统的光源和调制特性	182
7.3.1	通信中调制的一般概念	182
7.3.2	光通信中的光源及其调制特性	194

7.4	光纤通信系统中的光放大和光放大器	203
7.5	光检测和光检测器	206
7.5.1	光检测原理	206
7.5.2	光检测器	207
7.6	光纤通信系统中的复用技术	210
7.6.1	复用技术的基本概念	210
7.6.2	光时分复用技术	211
7.6.3	光波分复用	216
7.6.4	副载波复用技术	220
7.6.5	光频分复用技术	220
7.7	相干光纤通信系统	220
7.7.1	相干检测的基本原理	221
7.7.2	相干光通信的调制技术	223
7.7.3	相干通信的接收机	224
7.8	光孤子通信简介	225
7.9	光纤通信分布式网络	228
	思考题	233
	参考文献	234
第 8 章	光纤传感技术	235
8.1	光纤传感技术概述	235
8.1.1	传感技术概述	235
8.1.2	光纤传感技术概述	247
8.2	光纤的光波调制技术	249
8.2.1	光纤传感器利用的物理效应	249
8.2.2	光纤的光波调制技术	250
8.3	光纤传感器	263
8.3.1	光纤温度传感器	263
8.3.2	光纤压力传感器	276
8.3.3	光纤流量流速传感器	282
8.3.4	光纤位移传感器	286
8.3.5	光纤电磁参量传感器	291
8.3.6	光纤陀螺	299
8.3.7	光纤白光干涉传感器	306
8.3.8	复用式和分布式光纤传感器	310
	思考题	321
	参考文献	322
附录	贝塞尔函数	323

第1章 光传输的理论基础

光是一种光频范围内的电磁波，描述光在介质中传播规律的基本理论是光的电磁理论。本书所研究的光波在各种介质波导、光纤中的传输特性、基本技术和应用，都是以光的电磁理论为基础。

作为全书内容的理论基础，本章主要介绍光的电磁理论，重点讨论波动光学和射线光学中的基本方程以及光在两种不同介质界面上的传播特性。

1.1 麦克斯韦方程和波动方程

1.1.1 麦克斯韦方程和边界条件

由光的电磁理论，光波的电场强度 \mathbf{E} 和磁场强度 \mathbf{H} 满足如下的麦克斯韦方程：

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

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

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

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

式中， \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 分别是电场强度、磁场强度、电位移矢量和磁感应强度， \mathbf{J} 是电流密度， ρ 是电荷密度。由于我们研究的是光在光波导中的传输问题，远离光源、不存在自由电荷和传导电流，所以取 $\mathbf{J} = 0$ 和 $\rho = 0$ 。

另外，描述介质特性对光波电磁场影响的关系是物质方程：

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \quad (1.1-5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (1.1-6)$$

式中， ε 、 μ 分别为介质的介电张量和磁导率张量。对于各向同性介质，介电张量和磁导率张量均为标量，上面两式变为

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (1.1-7)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (1.1-8)$$

其中， ε_0 、 μ_0 分别为真空中的介电常数和磁导率， ε_r 、 μ_r 分别为介质的相对介电常数和相对磁导率。由亥姆霍兹关系

$$\varepsilon_r = n^2 \quad (1.1-9)$$

对于大多数光波导材料都是非磁性电介质, 通常有

$$\mu_r = 1 \quad (1.1-10)$$

今后, 凡是涉及磁导率的地方均以 μ_0 表示; 凡是涉及线性光学范畴的问题, 折射率 n 和相对介电常数 ϵ_r 要么是常数 (均匀介质), 要么仅是坐标的函数 (非均匀介质)。

在光纤和其他光波导中, 折射率 n 的空间分布有两种情况: 一种是分区均匀分布, 即同一区域的折射率为常数, 不同区域的折射率不相等, 一般称为阶跃折射率分布; 另一种是折射率在一个区域内连续变化, 即 $n = n(x, y, z)$, 各个区域的变化规律不同, 一般称为渐变或梯度折射率分布。不论哪种情况, 在两个不同区域的界面上, 电场强度和磁场强度均满足如下边界条件:

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (1.1-11)$$

$$H_{1t} = H_{2t} \quad (1.1-12)$$

$$D_{1n} = D_{2n} \quad (1.1-13)$$

$$B_{1n} = B_{2n} \quad (1.1-14)$$

式中, 角标“1”和“2”分别代表介质 1 和介质 2, 角标“t”和“n”分别代表介质界面上电场 (或磁场) 矢量的切向分量和法向分量。由于 \mathbf{E} 与 \mathbf{D} 、 \mathbf{H} 与 \mathbf{B} 相关, 后两式与前两式并不独立, 所以可以只考虑前面两式关系。该两式表明, 在介质的界面上, 电场强度和磁场强度的切向分量连续。

电磁场理论已经证明, 在一定的边界条件和初始条件下, 麦克斯韦方程组有唯一的解。由于通常不考虑场源和场源对波导的激励过程, 所以在同一边界条件下光波导的电磁场解并不唯一, 可能存在无穷多个独立的场分布或模式。只是在限制了光波导的结构后, 才有可能只有一个模式传输。一般情况下, 究竟在光波导中存在哪些模式, 各模式的相对强度如何, 还需要进一步由波导的激励过程来确定。

1.1.2 波动方程

麦克斯韦方程组给出了光波电场和磁场之间的时空关系。由于光波是电磁波, 其光波场矢量必然满足波动方程。下面从麦克斯韦方程出发, 推导出各向同性的均匀介质中, 远离辐射源、不存在自由电荷和传导电流区域内的光波场矢量满足的波动方程。

将关于磁感应强度的物质方程式 (1.1-8) 代入式 (1.1-1), 并进行旋度运算, 可得

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla \times \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) \quad (1.1-15)$$

利用 \mathbf{H} 与 \mathbf{D} 之间的关系式 (1.1-2), 可得

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.1-16)$$

再利用矢量恒等式 $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ 和式 (1.1-7), 可以得到电场强度满足的波动方程:

$$\nabla \left(\mathbf{E} \cdot \frac{\nabla \epsilon}{\epsilon} \right) + \nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.1-17)$$

同理,可以得到磁场强度满足的波动方程:

$$\left(\frac{\nabla\epsilon}{\epsilon}\right) \times (\nabla \times \mathbf{H}) + \nabla^2 \mathbf{H} = \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.1-18)$$

在均匀的各向同性介质中, $\nabla\epsilon = 0$, 上面两式可简化为如下的波动方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.1-19)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.1-20)$$

波动方程对 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 的每个分量都适用, 即每个分量都满足如下形式的标量波动方程:

$$\nabla^2 \psi = \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (1.1-21)$$

式中

$$\frac{1}{v^2} = \frac{n^2}{c^2} = \mu_0 \epsilon \quad (1.1-22)$$

式中, v 是介质中的光速, c 是真空中光速, n 是折射率。

另外, 作为一个光波, 其电磁场能量将在空间传播, 表征电磁场能量传播的能流密度由坡印亭矢量 \mathbf{S} 表示, 即

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.1-23)$$

需要指出的是, 上述波动方程是从均匀介质中的麦克斯韦方程推导出来的, 而光纤和其他光波导中的介质分布除分区均匀分布外, 还有非均匀分布情形, 在介质非均匀分布的情况下, ϵ 和 n 都是坐标的函数。但是在一般情况下, 只要 ϵ 和 n 的变化非常缓慢, 即在一个光波长范围内, 有

$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} \ll 1 \quad (1.1-24)$$

则上述波动方程可近似成立。对于光纤传输中的一般问题, 均可由上述波动方程解决, 只是在进行更精密的研究时, 才采用精确形式即式 (1.1-17) 和式 (1.1-18) 进行分析。

1.2 平面光波及其在介质界面上的反射和折射

1.2.1 均匀平面光波

1. 亥姆霍兹方程

对于通常讨论的简谐光波传输, 采用复数形式表示电磁场更为方便, 即令

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \text{Re}[\mathbf{E}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}] \quad (1.2-1)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \text{Re}[\mathbf{H}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}] \quad (1.2-2)$$

式中, $\text{Re}[\]$ 表示对复数场取实部。此时, 麦克斯韦方程变为复数形式

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = i\omega\mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (1.2-3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = -i\omega\varepsilon\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (1.2-4)$$

对于我们最关心的平面光波情况，其复数电磁场的一般表示式为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{r}_\perp)e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (1.2-5)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{r}_\perp)e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (1.2-6)$$

式中， \mathbf{k} 为平面光波的波矢，其大小为波数 k ，且有

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon} = nk_0 \quad (1.2-7)$$

式中， λ 为介质中的波长， ω 为光波圆频率， n 为介质折射率， k_0 为平面波在真空中的波数， \mathbf{r}_\perp 为垂直于 \mathbf{k} 波矢方向的平面坐标。相应的波动方程式 (1.1-19) 和式 (1.1-20) 变为

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + k^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \quad (1.2-8)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) + k^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) = 0 \quad (1.2-9)$$

这两个方程称为矢量亥姆霍兹方程。在直角坐标系中，电场、磁场的 x 、 y 、 z 分量均满足标量亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 \psi(x, y, z) + k^2 \psi(x, y, z) = 0 \quad (1.2-10)$$

在圆柱坐标系里，只有纵向电磁场分量 E_z 和 H_z 满足上述形式的标量亥姆霍兹方程，其横向电磁场分量不满足此式形式。

2. 均匀平面光波

均匀平面光波是最简单的一种光波，并且是研究一般光波的基础。单色平面光波的电磁场表示式为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (1.2-11)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (1.2-12)$$

式中，复振幅 \mathbf{E}_0 、 \mathbf{H}_0 是常矢量。均匀平面光波的波阵面为无穷大平面，在同一波阵面上电场强度 \mathbf{E} 和磁场强度 \mathbf{H} 的大小为常数，且两者同相。

假设平面光波沿 $+z$ 方向传播，传播常数为 β ，传播因子表示为 $e^{i\beta z}$ ，电场矢量平行于 xoy 平面，则由波动方程式 (1.2-8) 可得

$$-\beta^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1.2-13)$$

从而得到

$$\beta = k \quad (1.2-14)$$

因此，平面光波的相速度（等相位面传播的速度）沿着 $+z$ 方向，其大小为

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n} \quad (1.2-15)$$

进一步, 将平面光波的光场表达式式 (1.2-11) 和式 (1.2-12) 代入麦克斯韦方程式 (1.2-3) 和式 (1.2-4), 并利用矢量恒等式 $\nabla \times (\varphi \mathbf{A}) = \nabla \varphi \times \mathbf{A} + \varphi \nabla \times \mathbf{A}$, 可得

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 = \omega \mu_0 \mathbf{H}_0 \quad (1.2-16)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H}_0 = -\omega \varepsilon \mathbf{E}_0 \quad (1.2-17)$$

即在各向同性的均匀介质中, 平面光波为横电磁波, 光场的方向结构如图 1.2-1(a) 所示: \mathbf{E}_0 、 \mathbf{H}_0 、 \mathbf{k} 三者相互正交, $\mathbf{E}_0 \times \mathbf{H}_0$ 与 \mathbf{k} 平行; 又根据玻印亭矢量的定义, \mathbf{S} 在 $\mathbf{E}_0 \times \mathbf{H}_0$ 方向上, 所以在各向同性的均匀介质中, 波矢 \mathbf{k} 与玻印亭矢量 (能流密度) \mathbf{S} 同方向。再根据电磁场理论, 平面光波的电场强度与磁场强度之比称为波阻抗 η , 故由上面的关系可得

$$\eta = \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|} = \frac{|\mathbf{E}_0|}{|\mathbf{H}_0|} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (1.2-18)$$

在真空中, $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \approx 377\Omega$ 。

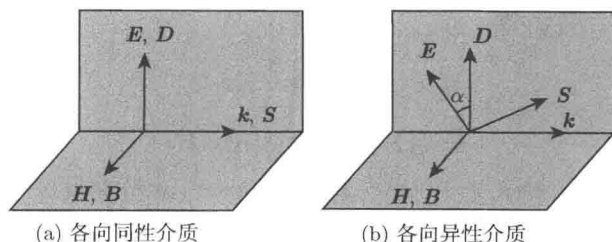


图 1.2-1 \mathbf{E} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{B} 的关系

由式 (1.1-23), 可以得到时间平均玻印亭矢量为

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \quad (1.2-19)$$

对于均匀、各向异性介质, \mathbf{k} 与 \mathbf{E}_0 、 \mathbf{H}_0 的关系分别为

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 = \omega \mu_0 \mathbf{H}_0 = \omega \mathbf{B}_0 \quad (1.2-20)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H}_0 = \omega \varepsilon \cdot \mathbf{E}_0 = -\omega \mathbf{D}_0 \quad (1.2-21)$$

即 \mathbf{D}_0 、 \mathbf{H}_0 、 \mathbf{k} 三者相互正交; 又因在一般情况下, 根据式 (1.1-5), \mathbf{D} 和 \mathbf{E} 方向不同, 所以 \mathbf{k} 与 \mathbf{S} 方向不同。 \mathbf{E} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{S} 与 \mathbf{k} 的方向关系如图 1.2-1(b) 所示。

1.2.2 平面光波在介质界面上的反射和折射

1. 反射定律与折射定律

如图 1.2-2 所示, 入射光波、反射光波及折射光波分别以下标 i 、 r 、 t 表示, 入射光的波矢 \mathbf{k}_i 与介质界面交于坐标原点, \mathbf{n} 为介质 2 指向介质 1 的界面法线单位矢量。若入射光波、反射光波和折射光波都是平面光波, 其电场可分别表示为

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_{i0} e^{-i(\omega t - \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r})} \quad (1.2-22)$$

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_{r0} e^{-i(\omega t - \mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r})} \quad (1.2-23)$$

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_{t0} e^{-i(\omega t - \mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r})} \quad (1.2-24)$$

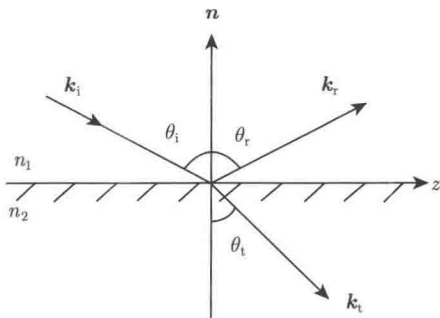


图 1.2-2 均匀平面波在界面的反、折射

\mathbf{H}_i 、 \mathbf{H}_r 和 \mathbf{H}_t 有类似的表示式。在两种不同介质的界面上，电场、磁场应满足边界条件： $E_{1t} = E_{2t}$ 和 $H_{1t} = H_{2t}$ ，即

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_i + \mathbf{E}_r) = \mathbf{n} \times \mathbf{E}_t \quad (1.2-25)$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_i + \mathbf{H}_r) = \mathbf{n} \times \mathbf{H}_t \quad (1.2-26)$$

将式 (1.2-22)~ 式 (1.2-24) 代入式 (1.2-25) 和式 (1.2-26)，相位和振幅因子分别满足

$$\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r} = \mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r} = \mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r} \quad (1.2-27)$$

和

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_{i0} + \mathbf{E}_{r0}) = \mathbf{n} \times \mathbf{E}_{t0} \quad (1.2-28)$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_{i0} + \mathbf{H}_{r0}) = \mathbf{n} \times \mathbf{H}_{t0} \quad (1.2-29)$$

由于 \mathbf{r} 在界面上，有 $\mathbf{r} \cdot \mathbf{n} = 0$ ，所以关系式 (1.2-27) 意味着 \mathbf{k} 在界面上的切向分量相等，即

$$\mathbf{k}_i \times \mathbf{n} = \mathbf{k}_r \times \mathbf{n} = \mathbf{k}_t \times \mathbf{n} \quad (1.2-30)$$

这说明， \mathbf{k}_i 、 \mathbf{k}_r 、 \mathbf{k}_t 与 \mathbf{n} 共面。又根据图 1.2-2 的关系，式 (1.2-27) 可表示为

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r \quad (1.2-31)$$

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (1.2-32)$$

这两个关系式就是介质界面上的反射定律和折射定律（又称为 Snell 定律），它们给出了入射光波、反射光波和折射光波三者传播方向之间的关系。

进一步，若二介质均为各向同性介质，则

$$\theta_i = \theta_r \quad (1.2-33)$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (1.2-34)$$

此即各向同性介质中的反射定律和折射定律。

2. 菲涅耳公式

反射定律和折射定律确定了入射光波、反射光波和折射光波三者的传播方向关系，而下面给出的由式 (1.2-28) 和式 (1.2-29) 导出的菲涅耳公式则给出了三波光场之间的振幅和相位关系。这种关系通常由反射系数和透射系数表征，反射系数是反射波复振幅与入射波复振幅之比，透射系数是透射波复振幅与入射波复振幅之比，它们不仅取决于入射角，而且与光的偏振状态有关。下面讨论两种基本偏振状态波——TE 波和 TM 波的反射系数和透射系数，介质中传播的任意偏振状态的光波均可视为这两种波型的线性叠加。

1) TE 波

TE 波是指其电场振动方向垂直于波法线和界面法线构成的入射面的光波，如图 1.2-3(a) 所示，其反射系数和透射系数分别为

$$r_{\text{TE}} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} = \frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \quad (1.2-35)$$

$$t_{\text{TE}} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} = \frac{2 \cos \theta_i \sin \theta_t}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \quad (1.2-36)$$

2) TM 波

TM 波是指电场振动方向平行于波法线和界面法线构成的入射面的光波，如图 1.2-3(b) 所示，其反射系数和透射系数分别为

$$r_{\text{TM}} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (1.2-37)$$

$$t_{\text{TM}} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} = \frac{2 \cos \theta_i \sin \theta_t}{\sin(\theta_t + \theta_i) \cos(\theta_t - \theta_i)} \quad (1.2-38)$$

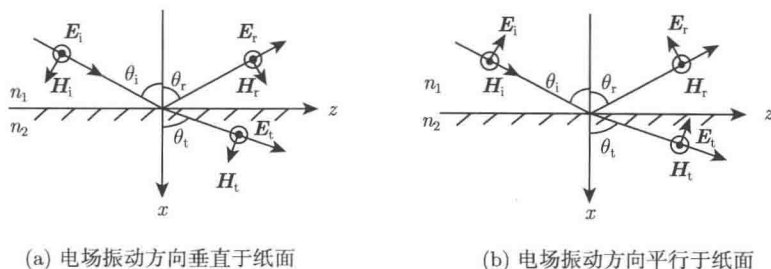


图 1.2-3 平面波在介质界面上反射、折射的两种情况

式 (1.2-35)~式 (1.2-38) 就是著名的菲涅耳公式。

反射系数和透射系数描述了界面上二光场之间的关系，在实际应用中还经常采用反射率和透射率描述入射光与反射光、折射光的能量关系。反射率定义为

$$R = rr^* = r^2 \quad (1.2-39)$$

透射率定义为

$$T = tt^* = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} t^2 \quad (1.2-40)$$