



普通高等教育“十二五”规划教材



光电信息科学与工程类专业规划教材

# 光学薄膜技术

(第2版)

卢进军 刘卫国 潘永强 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十二五”规划教材  
光电信息科学与工程类专业规划教材

# 光学薄膜技术

(第2版)

卢进军 刘卫国 潘永强 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地介绍薄膜光学的基本理论和器件设计的基本方法,适当地介绍一些新设计方法、新器件设计、新工艺技术。

全书共7章,主要内容包括:薄膜光学基础,器件设计方法,薄膜制造基本方法,高质量光学薄膜器件的工艺方法,光学薄膜材料,光学薄膜特性的测试,功能薄膜及其应用。

本书可作为高等学校有关专业的教材,初学者的入门教材,光学薄膜技术领域科技人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

光学薄膜技术/卢进军,刘卫国,潘永强编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2011.7

光电信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-13537-8

I. ①光… II. ①卢… ②刘… ③潘… III. ①光学薄膜-高等学校-教材 IV. ①TB43

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第085240号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:15.25 字数:450千字

印 次:2011年7月第1次印刷

印 数:3000册 定价:45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

# 再版说明

本书第1版自2005年出版至今,被不少高等学校光学、光电类有关专业选做教材,教学使用效果良好。承蒙广大读者的关心和厚爱,期间不断收到一些读者的来信,对本书提出了很多建设性的意见和建议。例如,不少读者来信寻求原书之外的技术资料,希望书中的工艺技术能够扩展到光学薄膜之外的广泛领域。同时,这几年的教学、科研实践,也使本书作者深刻体会到光学薄膜技术行业的从业者们所遇到的问题面在扩大、难度在加深。诸如偏振像差校正用相位膜、太阳能膜层、光学超硬膜的需求,已经越来越多地出现在薄膜工作者的面前。

据此,这次的第2版新增了一些薄膜新技术和新应用方面的内容:第2章中增加了显示器用防眩光减反射膜;第3章中增加了等离子体增强化学气相沉积技术;新增了第6章光学薄膜特性测试与分析和第7章功能薄膜及其应用。结合教学需要,每章都配置了一些思考题与习题,仅供教学参考使用。

第6章,首先概述了最新光学零件镀膜国家标准(JB/T 8226—1999)(限于篇幅,详细的标准可登录电子工业出版社的华信教育资源网 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn),免费下载),并在随后用较大篇幅介绍了国标要求检测的薄膜特性的检测方法。在这些方法中,既有常用的方法,也有近几年发展的最新高精度测量方法。

第7章集中介绍了在近几年应用面迅速扩大的透明导电膜、太阳能薄膜和超硬薄膜。这三类薄膜的发展,对光学薄膜行业的影响意义深远,无论是对光学薄膜性能的提升,还是对光学薄膜行业的发展壮大,其影响都是积极和振奋人心的。

纵观这次再版后的全书内容,既能继续为初学者提供入门学习所需的基本理论和常见器件的设计、制造方法,又能为从事薄膜技术工作的技术人员提供常用基础技术资料。作为本科生教材,建议参考学时应不少于32学时,最好是40学时。

这次再版,由卢进军、刘卫国、潘永强共同完成。

在本书第1和第2版出版过程中,西安工业大学教务处、教材科、光电工程学院都给予了极大地帮助,在此表示衷心感谢。

衷心希望本书能够继续得到广大读者的关心,读者的意见和建议是我们不断进步的动力和营养之源。

欢迎致信 [ljlkh@126.com](mailto:ljlkh@126.com)。关于本书的其他补充资料(包括电子课件)可以登录 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn),免费下载。

编著者



# 前 言

伴随着 20 世纪末、21 世纪初光电子技术的雪崩式发展,光学薄膜器件的应用向着性能要求和技术难度更高、应用范围和知识领域更广、器件种类和需求数量更多的方向迅速发展。适应发展需要,扩展知识范围,增加知识深度,拓宽学生视野,提升学生能力,是召唤编写本书的直接原因。

近十余年来,随着我国加入 WTO,光学制造业的加工内容已经跟随着光电产品的发展产生了质和量的同时飞跃,中国作为全球最大的光学加工厂,使得每家企业每位技术工作者,都感觉到新技术新应用对自己的挑战、压力和机遇,感觉到学习新技术、加深理论学习的必要性和紧迫性。伴随着光学拾讯头、数码相机、摄像机、背投电视,以及光纤通信的迅速发展,一些十余年前并不多用的光学薄膜器件种类出现了惊人的应用需求,偏振分束膜、消偏振分束膜、超窄带滤光片、超宽带截止滤光片、偏振像差校正用相位膜等一系列复杂膜系的性能要求越来越高。与此同时,薄膜制造技术也出现了相应的发展,离子辅助、高精度膜厚监控、低温深冷、溅射、脉冲离子镀已经或正在成为高质量光学薄膜器件制造中必不可少的技术。

器件种类在增加,设计方法在发展,制造技术在进步,及时推广这些发展和进步的成果给在校大学生、研究生,是光学薄膜技术教材的历史重任。

有关光学薄膜器件设计和制造,国内已经有浙江大学的唐晋发教授、顾培夫教授,北京理工大学的林永昌教授、卢维强教授,西安工业学院的严一心教授和南京理工大学的林鸿海教授,先后出版过非常优秀的教材。本书是在继承以上几位教授著作的精华的基础上,增添了一些新应用和新技术的内容编写而成的。

本教材的内容主要有三部分:第一部分,光学薄膜器件的设计方法和应用实例,其中列举了最新的实用器件,加重了对截止滤光片、消偏振器件和超窄带滤光片的介绍,还介绍了太阳能膜层、超硬膜层;第二部分,光学薄膜器件的制造方法,结合新技术的发展,加重了对提高膜层聚集密度的工艺途径和新技术介绍,简明总结了光学薄膜器件从设计到制造的基本工作程序和工作内容;第三部分,薄膜材料和薄膜特性检测,除了介绍材料的光学特性之外,还增添了一些膜层光学、机械特性与微观结构,微观结构与成膜工艺条件之间关系的分析,力图使读者在选择使用薄膜材料时,对于其膜层特性有更深层次的认识,对把握器件性能有更加可靠的分析和判断。

总之,作者的初衷是在介绍光学薄膜器件的基本设计方法的基础上,想尽可能将最新的应用、最新的技术、最新的材料介绍给读者,期盼本书成为致力于光学薄膜器件工作的读者的益友。

由于作者自身的水平有限,时间也甚为仓促,错误和不足敬请读者直言批评。

编著者

# 目 录

第 1 章 薄膜光学特性计算基础 .....	(1)
1.1 引言 .....	(1)
1.2 单一界面的反射率和透射率 .....	(1)
1.3 单层介质膜的反射率 .....	(4)
1.3.1 单层介质膜与基底组合的等效光学导纳 .....	(4)
1.3.2 单层介质膜的光学特性 .....	(6)
1.4 多层介质膜的反射率和透射率 .....	(8)
1.5 金属薄膜的光学特性 .....	(9)
1.6 光学零件的反射率和透射率 .....	(10)
思考题与习题 .....	(12)
第 2 章 介质膜系及其应用 .....	(13)
2.1 减反射膜 .....	(13)
2.1.1 单层减反射膜 .....	(13)
2.1.2 双层减反射膜 .....	(13)
2.1.3 多层减反射膜 .....	(14)
2.1.4 高折射率基底的减反射膜 .....	(19)
2.1.5 含吸收层的防眩光减反射膜 .....	(19)
2.2 高反射膜 .....	(21)
2.2.1 周期性多层膜堆的反射率 .....	(22)
2.2.2 $(LH)^S$ 周期性多层膜堆的高反射带 .....	(22)
2.2.3 高反射带的展宽 .....	(24)
2.2.4 倾斜入射时的高反射带 .....	(24)
2.2.5 金属反射膜 .....	(25)
2.3 中性分束膜 .....	(26)
2.3.1 介质中性分光镜 .....	(26)
2.3.2 偏振中性分束棱镜 .....	(28)
2.3.3 金属中性分光镜 .....	(28)
2.4 截止滤光片 .....	(29)
2.4.1 多层膜堆的通带透射率 .....	(30)
2.4.2 通带波纹的压缩 .....	(34)
2.4.3 通带的展宽和压缩 .....	(35)
2.4.4 截止波长和截止带中心的透射率 .....	(38)
2.4.5 截止滤光片倾斜使用时的偏振效应 .....	(41)
2.4.6 截止滤光片的应用 .....	(43)
2.5 带通滤光片 .....	(48)
2.5.1 法布里-珀罗滤光片的特性 .....	(49)

2.5.2	全介质法布里-珀罗滤光片	(52)
2.5.3	诱导透射滤光片	(59)
2.5.4	法布里-珀罗滤光片的最新应用	(65)
2.5.5	宽带通滤光片	(68)
2.6	偏振分束膜	(69)
2.6.1	胶合棱镜介质偏振分光膜	(69)
2.6.2	平板介质偏振分光镜	(70)
2.6.3	金属栅偏振分光镜	(71)
2.7	消偏振膜系	(73)
2.7.1	单波长消偏振	(73)
2.7.2	受抑全反射宽波段消偏振分光镜	(75)
2.7.3	金属-介质组合膜堆宽波段消偏振	(76)
2.7.4	消偏振截止滤光片	(78)
	思考题与习题	(81)
<b>第3章</b>	<b>光学薄膜制造技术</b>	<b>(82)</b>
3.1	光学真空镀膜机	(82)
3.2	真空与物理气相沉积	(84)
3.3	真空获得与检测	(85)
3.3.1	真空泵	(85)
3.3.2	低温冷凝泵	(88)
3.3.3	PVD使用的高真空系统	(89)
3.3.4	真空度的检测	(89)
3.4	热蒸发	(92)
3.5	溅射	(94)
3.5.1	辉光放电溅射	(94)
3.5.2	磁控溅射	(96)
3.5.3	离子束溅射	(98)
3.5.4	离子、靶材与溅射率	(98)
3.6	离子镀	(99)
3.7	离子辅助镀	(101)
3.8	等离子体增强化学气相沉积	(103)
3.8.1	PECVD过程的动力学	(104)
3.8.2	PECVD装置	(106)
	思考题与习题	(109)
<b>第4章</b>	<b>光学薄膜制造工艺</b>	<b>(110)</b>
4.1	光学薄膜器件的质量要素	(110)
4.2	影响膜层质量的工艺要素	(112)
4.2.1	影响薄膜器件质量的工艺要素及作用机理	(112)
4.2.2	提高膜层机械强度的工艺途径	(115)
4.2.3	控制膜层折射率的主要工艺途径	(115)
4.2.4	获得致密膜层的方法	(116)
4.3	获得精确厚度的方法	(119)

4.3.1	目视法	(119)
4.3.2	极值法	(120)
4.3.3	光电定值法	(121)
4.3.4	任意膜厚的单波长监控	(122)
4.3.5	石英晶振法	(123)
4.3.6	宽光谱膜厚监控	(124)
4.4	获得均匀膜层的方法	(127)
4.4.1	影响膜层厚度均匀性的因素	(127)
4.4.2	获得均匀厚度膜层的途径	(128)
	思考题与习题	(129)
<b>第5章</b>	<b>薄膜材料及其性质</b>	<b>(130)</b>
5.1	薄膜的微观结构与性质	(130)
5.1.1	薄膜结构的材料学基础	(130)
5.1.2	薄膜的光学性质	(139)
5.1.3	薄膜的力学性质	(142)
5.2	常用光学薄膜材料	(146)
5.2.1	金属薄膜	(146)
5.2.2	介质薄膜	(147)
5.2.3	特殊材料	(149)
	思考题与习题	(151)
<b>第6章</b>	<b>光学薄膜特性测试与分析</b>	<b>(152)</b>
6.1	光学薄膜特性的检测标准	(152)
6.1.1	国标(JB/T 6179—92)中规定的光学零件镀膜的分类、符号及标注	(152)
6.1.2	国标(JB/T 8226—1999)中规定的光学零件镀膜检测项目	(152)
6.1.3	国标(JB/T 8226—1999)中规定的光学零件镀膜试验方法	(155)
6.1.4	国标(JB/T 8226—1999)中规定的光学零件镀膜检验规则	(156)
6.2	薄膜透射率、反射率的测量	(156)
6.2.1	光谱仪的基本原理	(156)
6.2.2	薄膜透射率的测量	(158)
6.2.3	薄膜反射率的测量	(160)
6.3	薄膜光学常数和厚度的测量	(163)
6.3.1	光度法确定薄膜的光学常数	(163)
6.3.2	椭圆偏振法确定薄膜的光学常数	(170)
6.3.3	薄膜厚度的测量	(173)
6.4	薄膜吸收和散射的测量	(176)
6.4.1	薄膜吸收损耗的测量	(176)
6.4.2	薄膜散射损耗的测量	(178)
6.5	薄膜激光损伤阈值的测量	(181)
6.5.1	薄膜激光损伤的机理分析	(182)
6.5.2	薄膜激光损伤阈值的测量标准及方法	(183)
6.5.3	薄膜抗激光损伤阈值测量中应注意的几个问题	(184)
6.6	薄膜非光学特性的检测	(186)



6.6.1	薄膜附着力的测量	(186)
6.6.2	薄膜应力的测量	(188)
6.6.3	薄膜的环境试验	(190)
6.6.4	薄膜结构和化学成分检测	(190)
	思考题与习题	(193)
<b>第7章</b>	<b>功能薄膜及其应用</b>	<b>(195)</b>
7.1	透明导电薄膜	(195)
7.1.1	透明导电薄膜的分类	(195)
7.1.2	透明导电薄膜的基本特性	(196)
7.1.3	透明导电氧化物薄膜的制备	(198)
7.1.4	透明导电氧化物薄膜的特性测试	(201)
7.1.5	透明导电氧化物薄膜的应用	(206)
7.2	太阳能薄膜	(207)
7.2.1	太阳能光热转换薄膜	(207)
7.2.2	太阳能光电转换薄膜	(209)
7.3	超硬薄膜材料	(213)
7.3.1	金刚石薄膜	(213)
7.3.2	类金刚石(DLC)薄膜	(216)
7.3.3	立方氮化硼薄膜	(221)
7.3.4	CN <sub>x</sub> 薄膜	(224)
7.3.5	其他硬质薄膜	(227)
	思考题与习题	(229)
<b>附录A</b>	<b>常见薄膜材料参数</b>	<b>(230)</b>
	参考文献	(235)

# 第 1 章 薄膜光学特性计算基础

## 1.1 引 言

光学薄膜是附着在光学零件表面的厚度薄而均匀的介质膜层。光学薄膜的光学性能集中表现为薄膜界面的分振幅多光束干涉能力。

### 1. 极薄平板介质的分振幅多光束干涉

根据波动光学理论,平行平板介质的分振幅多光束干涉将导致反射、透射,其光强分布分别为

$$I_r = \frac{F \sin^2 \theta}{1 + F \sin^2 \theta} I_i \quad (1.1-1)$$

$$I_t = \frac{1}{1 + F \sin^2 \theta} I_i \quad (1.1-2)$$

式中

$$F = \frac{4 \sqrt{R_1 R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2}, \quad \theta = \frac{2\pi}{\lambda} n h - (\varphi_1 + \varphi_2) / 2 \quad (1.1-3)$$

据此得到的单色光反射、透射光强分布是亮暗相间的条纹图案。但是:

(1) 如果平行平板介质的厚度  $h$  与所用单色光波长  $\lambda$  同量级,则中心亮条纹的角半径大于  $70^\circ$ ,即中心亮条纹将占据几乎全部视场,看不到亮暗相间的空间干涉条纹。

(2) 如果平板介质的厚度  $h$  与所用光波长  $\lambda$  同量级,且入射光为非单色光,则由位相  $\theta$  的表达式可以看到,不同的波长将有不同的透射、反射光强,即光强分布有了波长选择性。

因此,薄膜状平板介质的分振幅多光束干涉将不产生亮暗相间的空间干涉条纹,但将产生光强在波长、频率域中的强弱相间分布的干涉结果。

### 2. 多层介质膜组合系统的光学性能

直接利用平行平板的分振幅多光束干涉公式,只能计算只有两个界面的平板介质的反射、透射光强分布。

目前广泛使用的光学薄膜器件大多数是由多层介质组成的多界面系统,其光学性能的计算,只能借助于界面两侧电磁场的边值关系,通过电磁场传播始、终场强之间的联系,按照菲涅耳(Fresnel)建立振幅反射、透射系数公式的思想,建立多界面系统振幅反射、透射系数计算公式。

## 1.2 单一界面的反射率和透射率

### 1. 光波与光学导纳

按照波动光学理论,光波是电磁横波,光波在空间任意位置的电磁场强度与所在介质性能之间的联系是通过 Maxwell 方程和物质方程建立的。

在介质中,光波的电场和磁场强度可以表示为

$$E = E_0 \exp \left\{ i \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r} \right) \right\}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \exp \left\{ i \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r} \right) \right\}$$

将它们代入 Maxwell 方程组中的  $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$ , 并利用物质方程中的  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ , 可得到  $\mathbf{H}$  与  $\mathbf{E}$  之间的关系式

$$\mathbf{H} = \frac{N}{\mu c} (\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}) = \frac{N \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0}}{\mu_r} (\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E})$$

引入中间变量  $Y = N \sqrt{\mu_0 / \epsilon} = N y_0$ ,  $Y$  称做介质的光学导纳,  $y_0$  是自由空间光学导纳。在国际单位制中  $y_0 = 1/377 \text{ S}$ 。在光波段,  $\mu_r \approx 1$ 。所以

$$\mathbf{H} = Y (\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}) \quad (1.2-1)$$

注意式(1.2-1)的物理意义及其约束条件:

- (1)  $\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{k}_0$  相互垂直, 并符合右旋法则——光波是电磁横波;
- (2)  $Y = H/E$ , 介质中沿  $\mathbf{k}_0$  方向传播的电磁波的磁场强度与电场强度之比等于所在介质的光学导纳。

## 2. 菲涅耳公式

按照波动光学理论, 电磁波在两种介质形成的界面反射和透射时的振幅反射因数和透射因数<sup>①</sup>分别为

$$r = E_r / E_i, \quad t = E_t / E_i$$

根据电动力学理论中电磁场的边界条件关系可知<sup>②</sup>:

- (1) 当电磁波垂直入射到一个界面时[图 1.2-1(a)示意电磁场符号意义], 有

$$E_i + E_r = E_t, \quad H_i + H_r = H_t$$

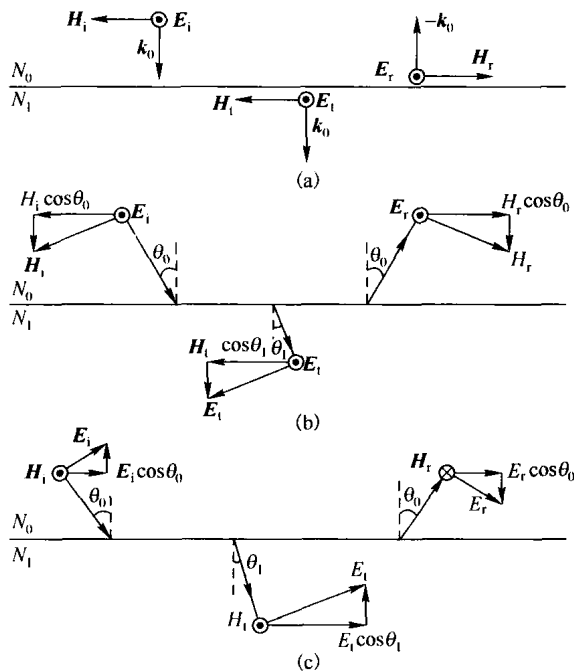


图 1.2-1 单一界面两侧的电磁场方向

① 依据国标 GB 3101—93, 量纲为 1 时, 应称为因数。

② 在下面用到的电磁场的边界条件关系式中的电、磁场强度都是与界面平行的分量。

结合  
可得

$$\mathbf{H}_i = Y_0(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_i), \quad \mathbf{H}_r = Y_0(-\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_r), \quad \mathbf{H}_t = Y_1(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_t)$$

$$E_i + E_r = E_t, \quad Y_0 E_i - Y_0 E_r = Y_1 E_t$$

所以

$$r = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Y_0 - Y_1}{Y_0 + Y_1} = \frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1} \quad (1.2-2)$$

$$t = \frac{E_t}{E_{i0}} = \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_1} = \frac{2N_0}{N_0 + N_1} \quad (1.2-3)$$

(2) 当电磁波倾斜入射到一个界面时[图 1.2-1(b)和(c)示意电磁场符号意义]:

对于 TE 波,即 S 偏振波入射,这时  $\mathbf{E}$  与界面平行,所以

$$E_i + E_r = E_t, \quad H_i \cos \theta_0 + H_r \cos \theta_0 = H_t \cos \theta_1$$

$$Y_0 E_i \cos \theta_0 - Y_0 E_r \cos \theta_0 = Y_1 E_t \cos \theta_1$$

可得

$$r_s = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Y_0 \cos \theta_0 - Y_1 \cos \theta_1}{Y_0 \cos \theta_0 + Y_1 \cos \theta_1} \quad (1.2-4)$$

$$t_s = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Y_0 \cos \theta_0}{Y_0 \cos \theta_0 + Y_1 \cos \theta_1} \quad (1.2-5)$$

对于 TM 波,即 P 偏振波入射,这时  $\mathbf{H}$  与界面平行,所以

$$H_i + H_r = H_t, \quad E_i \cos \theta_0 + E_r \cos \theta_0 = E_t \cos \theta_1$$

$$Y_0 E_i - Y_0 E_r = Y_1 E_t$$

可得

$$r_p = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Y_0 \cos \theta_1 - Y_1 \cos \theta_0}{Y_0 \cos \theta_1 + Y_1 \cos \theta_0} \quad (1.2-6)$$

$$t_p = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Y_0 \cos \theta_0}{Y_0 \cos \theta_1 + Y_1 \cos \theta_0} \quad (1.2-7)$$

实际上,如果将电磁波倾斜入射到一个界面时的磁场强度切向分量与电场强度切向分量的比值看做电磁波倾斜入射时的有效光学导纳,那么,对于 S 偏振波入射和 P 偏振波入射,就有两个不同的有效光学导纳:

$$Y_s = H/E = Y \cos \theta = y_0 N \cos \theta \quad (1.2-8)$$

$$Y_p = H/E = Y/\cos \theta = y_0 N/\cos \theta \quad (1.2-9)$$

将式(1.2-8),式(1.2-9),代入式(1.2-4)、式(1.2-5)、式(1.2-6)、式(1.2-7)中,得

$$r_s = \frac{Y_0 \cos \theta_0 - Y_1 \cos \theta_1}{Y_0 \cos \theta_0 + Y_1 \cos \theta_1} = \frac{Y_{0s} - Y_{1s}}{Y_{0s} + Y_{1s}} = \frac{N_0 \cos \theta_0 - N_1 \cos \theta_1}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1}$$

$$t_s = \frac{2Y_0 \cos \theta_0}{Y_0 \cos \theta_0 + Y_1 \cos \theta_1} = \frac{2Y_{0s}}{Y_{0s} + Y_{1s}} = \frac{2N_0 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1}$$

$$r_p = \frac{Y_0 \cos \theta_1 - Y_1 \cos \theta_0}{Y_0 \cos \theta_1 + Y_1 \cos \theta_0} = \frac{Y_{0p} - Y_{1p}}{Y_{0p} + Y_{1p}} = \frac{N_0 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0}$$

$$t_p = \frac{2Y_0 \cos \theta_0}{Y_0 \cos \theta_1 + Y_1 \cos \theta_0} = \frac{2Y_{0s}}{Y_{0p} + Y_{1p}} = \frac{2N_0 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0}$$

为计算方便,引入修正导纳

$$\eta_s = N \cos \theta \quad (1.2-10)$$

$$\eta_p = N/\cos \theta \quad (1.2-11)$$

则菲涅耳公式可以简化为

$$r = \frac{\eta_0 - \eta_1}{\eta_0 + \eta_1} \quad (1.2-12)$$

$$t = \frac{2\eta_0}{\eta_0 + \eta_1} \cdot K \quad (1.2-13)$$

使用式(1.2-12)和式(1.2-13)计算  $r_s$  和  $t_s$  时,公式中的  $\eta$  应代入  $\eta_s$ ,  $K=1$ ; 计算  $r_p$  和  $t_p$

时,公式中的  $\eta$  应代入  $\eta_p, K = \cos\theta_0/\cos\theta_1$ 。

### 3. 单一界面的反射率计算与等效界面思想

#### (1) 单一界面的反射率和透射率

按照波动光学理论,两种介质形成的界面对光波的能量反射率和透射率分别为

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} = |r|^2 = \left| \frac{\eta_0 - \eta_1}{\eta_0 + \eta_1} \right|^2 \quad (1.2-14)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{N_1 \cos\theta_1}{N_0 \cos\theta_0} \frac{|E_t|^2}{|E_i|^2} = \frac{\eta_{1s}}{\eta_{0s}} |t|^2 = \frac{4\eta_0\eta_1}{|\eta_0 + \eta_1|^2} \quad (1.2-15)$$

$$T + R + A = 1$$

式中,  $A$  是能量吸收率。对于无吸收的全介质薄膜系统,  $T + R = 1$ 。

因此,只要知道了两种介质的折射率和光线入射角,就可以得到相应的光学导纳,利用式(1.2-14)、式(1.2-15)就可以计算单一界面的反射率和透射率。

#### (2) 等效界面

在众多的薄膜光学性能计算方法中,等效界面思想是一共同点。即将一个多界面的薄膜系统,等效地看做一个单一界面。其中,将等效界面看做入射介质与薄膜、基底组合形成的等效介质之间的界面。即等效界面两侧的介质分别是入射介质和等效介质。入射介质的折射率仍旧是  $N_0$ ,等效介质具有等效光学导纳  $Y$ 。因此,薄膜系统的反射率就是等效界面的反射率,等效界面的反射率计算公式为

$$R = \left| \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right|^2 \quad (1.2-16)$$

任何一个复杂的薄膜系统,其反射率都可以通过其等效界面对应的等效光学导纳进行计算。当然,必须首先建立等效光学导纳与薄膜系统之间的关系。

## 1.3 单层介质膜的反射率

按照等效界面思想,单层介质膜的反射率就等于其等效界面的反射率。利用式(1.2-16),计算等效界面反射率的关键是要知道等效光学导纳与单层介质薄膜之间的关系。

### 1.3.1 单层介质膜与基底组合的等效光学导纳

先找到单层介质膜与基底组合的等效光学导纳  $Y$  与介质膜层及基底结构参数之间的定量关系式。依图 1.3-1 等效界面示意图(注意:图中箭头方向是电磁波的传播方向)分析如下。

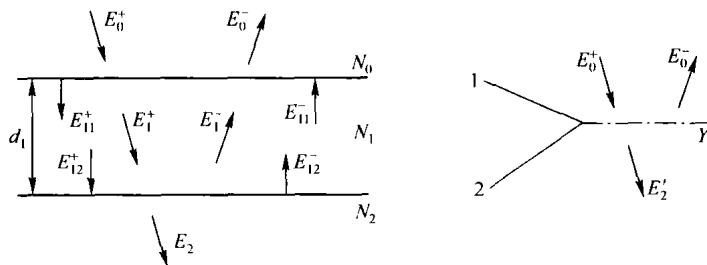


图 1.3-1 等效界面示意图

(1) 在等效界面两侧:

① 等效光学导纳  $Y$  应当满足  $H'_2 = Y(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}'_2)$ , 式中,  $\mathbf{k}_0$  是垂直于界面且与入射光同方向的单位波矢;

② 根据电磁场的边界条件  $H'_2 = H_0, E'_2 = E_0$ , 所以

$$\mathbf{H}_0 = Y(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0) \quad (1.3-1)$$

即通过电磁场的边界条件,将等效光学导纳  $Y$  与入射介质中电磁场的强度  $\mathbf{E}_0$  及  $\mathbf{H}_0$  建立起了联系。

特别说明:公式  $\mathbf{H} = Y(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E})$  中的 4 个量的物理含义是:在具有光学导纳  $Y$  的介质中的同一点、同一时刻、同一光波矢量  $\mathbf{k}_0$  所对应的电场强度矢量  $\mathbf{E}$  和磁场强度矢量  $\mathbf{H}$ 。因此,对于任何介质中,在任何时刻,其中传播的光波的电磁场强度矢量间都存在这样的关系。例如,在入射介质中传播的光波的电磁场强度矢量之间就存在关系

$$\mathbf{H}_0^+ = \eta_0(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0^+), \mathbf{H}_0^- = \eta_0(-\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0^-)$$

而电磁场的边界条件公式  $\mathbf{H}'_2 = \mathbf{H}_0, \mathbf{E}'_2 = \mathbf{E}_0$  中的电场强度矢量  $\mathbf{E}$  和磁场强度矢量  $\mathbf{H}$ ,它们不但分别是界面两侧同一点、同一时刻、所有电场强度的矢量和,以及所有磁场强度的矢量和,而且还只是其和矢量的切向分量。

(2) 在实际单层介质膜系统中,同样可以利用电磁场边界条件,将  $N_1, d_1, N_2$  与入射介质中电磁场的强度  $\mathbf{E}_0$  和  $\mathbf{H}_0$  建立起联系。

因此,就有可能通过入射介质中的电磁场强度  $\mathbf{E}_0$  和  $\mathbf{H}_0$ ,建立等效光学导纳  $Y$  与介质膜层及基底结构参数  $N_1, d_1, N_2$  之间的定量关系式。

具体做法如下:

- ① 使用电磁场边界条件公式,将同一界面两侧的电磁场联系起来;
- ② 利用与电磁场传播相伴随的位相差,将同一介质中不同位置的电磁场联系起来。

在界面 1,有

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_0 &= \mathbf{E}_0^+ + \mathbf{E}_0^- = \mathbf{E}_{11}^+ + \mathbf{E}_{11}^- \\ \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0 &= \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{11}^+ + \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{11}^- \\ \mathbf{H}_0 &= \mathbf{H}_0^+ + \mathbf{H}_0^- = \mathbf{H}_{11}^+ + \mathbf{H}_{11}^- \\ \mathbf{H}_0 &= \eta_1(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{11}^+ - \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{11}^-) \end{aligned}$$

在界面 1 和 2 的内侧,不同纵坐标、相同横坐标的两点电磁场的复振幅强度之间的关系完全由其空间距离引入的位相差相联系,即

$$E_{12}^+ = E_{11}^+ e^{-i\delta_1}, \quad E_{12}^- = E_{11}^- e^{i\delta_1}, \quad \delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} N_1 d_1 \cos\theta_1$$

所以

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0 &= (\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^+) e^{i\delta_1} + (\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^-) e^{-i\delta_1} \\ \mathbf{H}_0 &= (\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^+) \eta_1 e^{i\delta_1} - (\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^-) \eta_1 e^{-i\delta_1} \end{aligned}$$

写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0 \\ \mathbf{H}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{i\delta_1} & e^{-i\delta_1} \\ \eta_1 e^{i\delta_1} & -\eta_1 e^{-i\delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^+ \\ \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^- \end{bmatrix} \quad (1.3-2)$$

在界面 2,则有

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{12}^+ + \mathbf{E}_{12}^- &= \mathbf{E}_2, \quad \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^+ + \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^- = \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{H}_{12}^+ + \mathbf{H}_{12}^- &= \mathbf{H}_2, \quad \eta_1(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^+ - \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^-) = \mathbf{H}_2 \end{aligned}$$

$$\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^+ = \frac{1}{2}(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_2) + \frac{1}{2\eta_1} \mathbf{H}_2$$

$$\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^- = \frac{1}{2}(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_2) - \frac{1}{2\eta_1} \mathbf{H}_2$$

写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^+ \\ \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{12}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2\eta_1} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2\eta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{H}_2 \end{bmatrix} \quad (1.3-3)$$

将式(1.3-3)代入式(1.3-2),可得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0 \\ \mathbf{H}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{i\delta_1} & e^{-i\delta_1} \\ \eta_1 e^{i\delta_1} & -\eta_1 e^{-i\delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2\eta_1} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2\eta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{H}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & \frac{i}{\eta_1} \sin\delta_1 \\ i\eta_1 \sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{H}_2 \end{bmatrix} \quad (1.3-4)$$

结合式(1.3-1)和  $H_2 = \eta_2(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_2)$ , 式(1.3-4)可简化为

$$(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0) \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & \frac{1}{\eta_1} \sin\delta_1 \\ i\eta_1 \sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} (\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_2)$$

令 
$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & \frac{1}{\eta_1} \sin\delta_1 \\ i\eta_1 \sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (1.3-5)$$

则 
$$(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0) \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} (\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_2)$$

解得 
$$Y = C/B \quad (1.3-6)$$

需要说明的是:

①  $\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix}$  是完全由膜系和基底参数决定的二阶矩阵。当膜层参数已知后,其矩阵元就确定了,由其便可以求出等效光学导纳  $Y$ ,进而可由式(1.2-16)求得单层介质膜的光学特性。因此,这个二阶矩阵被称为该膜层与基底组合的特征矩阵。

② 矩阵  $\begin{bmatrix} \cos\delta_1 & \frac{1}{\eta_1} \sin\delta_1 \\ i\eta_1 \sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix}$  由膜层参数唯一确定,这个矩阵称为该膜层的特征矩阵。

③  $\delta_1$  称做膜层的有效位相厚度,  $N_1 d_1 \cos\theta_1$  是膜层的有效光学厚度。

注意:

a. 无论是  $S$  偏振还是  $P$  偏振,其位相厚度、光学厚度是相同的;

b.  $\delta_1$  是波长的函数,不同的波长有不同的  $\delta_1$ 。

④ 等效光学导纳  $Y$  是  $\delta_1$  的函数,即随波长变化的函数。因此,等效光学导纳  $Y$  的色散要比实际膜层折射率的色散严重得多。

### 1.3.2 单层介质膜的光学特性

将式(1.3-6)代入式(1.2-16),即可得到单层介质膜的反射率计算公式

$$R = \left| \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right|^2 = \left| \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right|^2 = \frac{(\eta_0 - \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + \left( \frac{\eta_0 \eta_2}{\eta_1} - \eta_1 \right)^2 \sin^2 \delta_1}{(\eta_0 + \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + \left( \frac{\eta_0 \eta_2}{\eta_1} + \eta_1 \right)^2 \sin^2 \delta_1} \quad (1.3-7)$$

对式(1.3-7)进行分析可知:

(1) 因为  $R = f(\cos^2 \delta_1, \sin^2 \delta_1)$ , 而  $\cos^2 \delta_1 = \cos^2(\delta_1 \pm m\pi)$ ,  $\sin^2 \delta_1 = \sin^2(\delta_1 \pm m\pi)$ , 所以  $R(\delta_1) = R(\delta_1 \pm m\pi)$ ,  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。此即表明:位相厚度相差为  $\pi$  的整数倍的同一材料的单层介质膜,对同一波长的反射率是相同的。换言之,光学厚度相差为  $\lambda/2$  的整数倍的同一材料的单层介质膜,对同一波长有相同的反射率。即

$$R(N_1 d_1 \cos\theta_1) = R\left(N_1 d_1 \cos\theta_1 \pm m \frac{\lambda}{2}\right), \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

(2) 由方程  $\frac{dR}{d(N_1 d_1 \cos\theta_1)} = 0$ , 可解得当  $N_1 d_1 \cos\theta_1 = m\lambda/4$ ,  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  时,  $R$  有极值。

① 当  $m$  是奇数时, 则有  $R = \frac{(\eta_0 \eta_2 - \eta_1^2)^2}{(\eta_0 \eta_2 + \eta_1^2)^2}$ 。所以,若  $\theta_0 = 0$ ,  $N_0 = 1$ , 则由  $\frac{d^2 R}{d^2(N_1 d_1 \cos\theta_1)}$  的

性质可判知:当  $N_1 < N_2$  时,  $R = R_{\min}$ ; 当  $N_1 > N_2$  时,  $R = R_{\max}$ 。

② 当  $m$  是偶数时,  $R = \frac{(\eta_0 - \eta_2)^2}{(\eta_0 + \eta_2)^2}$ , 与  $N_1$  无关。此时的膜层如同虚设, 称为虚设层。但是仍

旧可以由  $\frac{d^2 R}{d^2(N_1 d_1 \cos \theta_1)}$  的性质判知: 当  $N_1 < N_2$  时,  $R = R_{\max}$ ; 当  $N_1 > N_2$  时,  $R = R_{\min}$ 。

注意:

a. 因为  $R$  是  $\lambda$  的函数, 所以, 这里所说的“极值”、“虚设层”都是对特定波长(满足  $N_1 d_1 \cos \theta_1 = m\lambda/4$  的波长)而言的。

b. “极值”是同一膜层对某一波长的反射率相对其邻近波长的反射率而言的, 由此不难理解“虚设层”的极值。

(3) 由式(1.3-7)的计算结果可得单层介质膜的反射率随光学厚度的变化关系, 如图 1.3-2 所示。

① 当  $N_1 > N_2$  时,  $R_F > R_2$ ,  $T_F < T_2$ , 膜层的作用是提高了反射率;

② 当  $N_1 < N_2$  时,  $R_F < R_2$ ,  $T_F > T_2$ , 膜层的作用是增加了透射率。

至此, 通过对式(1.3-7)进行的上述(1)、(2)、(3)点的数学分析, 我们明确了单层介质膜对确定波长的反射率随膜层光学厚度的变化是呈周期性变化的。图 1.3-2 示意了这一周期性变化与膜层光学厚度的关系曲线。

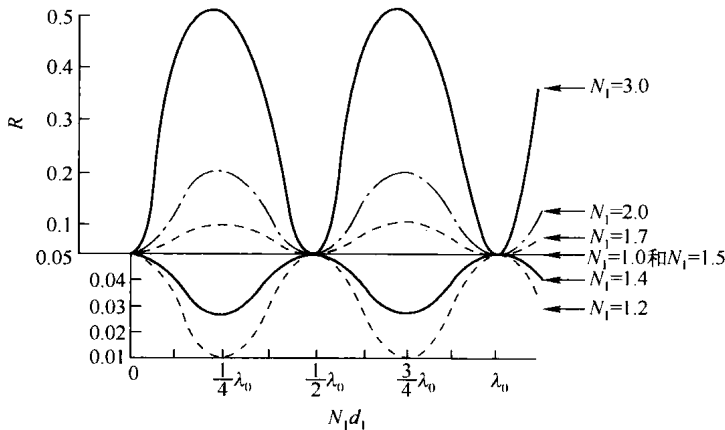


图 1.3-2 单层介质膜的反射率与膜层厚度的关系曲线

(4) 因为  $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} N_1 d_1 \cos \theta_1$ , 所以, 单层介质膜反射率随膜层位相厚度的周期性变化, 也可能是波长  $\lambda$  变化所致的。即波长  $\lambda$  变化时, 反射率  $R$  也可能出现周期性重复。

为方便叙述, 将  $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} N_1 d_1 \cos \theta_1$  中的波长  $\lambda$  通过关系式  $\lambda = C/\nu$  转化为频率  $\nu$  的函数, 则

$$\delta_1 = \frac{2\pi\nu}{C} N_1 d_1 \cos \theta_1$$

很明显, 由于光频率  $\nu$  与光学厚度  $N_1 d_1$  在上式中具有完全相同的数学地位, 因此, 如果忽略折射率色散, 那么, 一个确定厚度的单层介质膜的反射率将是光频率  $\nu$  的周期性函数。即单层介质膜将在频率间隔相等的多个不同频率点具有相同的反射率。显然, 频率周期为  $\Delta\nu =$

$$\frac{C}{2N_1 d_1 \cos \theta_1}。$$

所以, 单层介质膜层反射率的周期性具有双重性: 既可以在膜层厚度增加时出现周期性的重复再现; 也可以在膜层厚度一定时, 对不同频率反射率出现周期性的重复再现。



## 1.4 多层介质膜的反射率和透射率

在没有个人计算机之前,人们为了计算反射率和透射率,采用过菲涅耳系数递推法、菲涅耳系数矩阵法,也采用过导纳递推法和导纳矩阵法。在个人计算机普及的今天,几乎所有的膜系设计软件,都采用导纳矩阵法。

采用导纳矩阵法推导多层介质膜与基底组合的等效光学导纳  $Y$  与介质膜层及基底结构参数之间的定量关系式,其方法与单层介质膜时等效光学导纳的求法完全相同,即基本思想仍是等效界面思想。

多层介质膜中的电磁场如图 1.4-1 所示。

基本方法仍是:① 在每一界面运用电磁场边界条件公式,将同一界面两则的电磁场联系起来;② 利用与电磁场传播相伴随的位相差,将同一膜层中上下两界面内侧的电磁场联系起来。

由此可得第  $j$  层膜上界面外侧场  $E_{j-1,j}, H_{j-1,j}$  与其下界面外侧场  $E_{j+1,j+1}, H_{j+1,j+1}$  之间的关系为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{j-1,j} \\ \mathbf{k}_0 \times \mathbf{H}_{j-1,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{j+1,j+1} \\ \mathbf{H}_{j+1,j+1} \end{bmatrix}$$

而在第  $j$  个界面 
$$\begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{j-1,j} \\ \mathbf{k}_0 \times \mathbf{H}_{j-1,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{j,j} \\ \mathbf{k}_0 \times \mathbf{H}_{j,j} \end{bmatrix}$$

所以,对由  $k$  层膜层组成的膜系,对每一界面和每一膜层应用上述关系,经过连续的线性变换,最后可得入射介质与出射介质中的电磁场的关系方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0 \\ \mathbf{H}_0 \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{k+1} \\ \mathbf{H}_{k+1} \end{bmatrix}$$

与单层介质膜时的处理方法相同,结合式(1.3-1)可知

$$\mathbf{H}_0 = Y(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0), \quad \mathbf{H}_{k+1} = \eta_{k+1}(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{k+1})$$

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix}$$

可得 
$$(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0) \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} (\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{k+1})$$

所以 
$$Y = C/B$$

该  $k$  层膜系的能量反射率  $R$  和透射率  $T$  为

$$R = \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (1.4-1)$$

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_{k+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*} \quad (1.4-2)$$

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{i\eta_0 (CB^* - BC^*)}{\eta_0^2 BB^* - CC^*} \right] \quad (1.4-3)$$

式中,  $\varphi$  是由  $r = |r| e^{i\varphi} = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y}$  求得的反射相移,  $\varphi < 0$  表示位相滞后,  $\varphi > 0$  表示位相超前。应当注意的是,式中有  $\eta_p$  和  $\eta_s$  之分,但  $\delta$  却没有  $\delta_s$  和  $\delta_p$  之分。

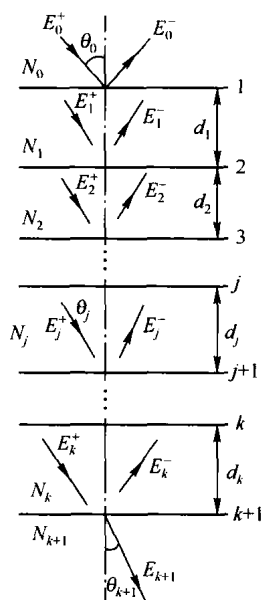


图 1.4-1 多层介质膜层中的电磁场