

The book cover features a light yellow background with several overlapping circles in shades of yellow and orange. The circles vary in size and are scattered across the cover, creating a decorative pattern. The title '应用薄膜光学' is printed in a bold, black, sans-serif font in the upper left quadrant.

应用薄膜光学

唐晋发 郑 权 编著

上海科学技术出版社

应用薄膜光学

唐晋发 郑 权 编著

上海科学技术出版社

内 容 简 介

薄膜光学是近代光学的一个重要分支。光学薄膜在光学与激光技术, 红外与空间技术等各个领域有着广泛的应用。本书第一篇薄膜光学导论, 系统地介绍了薄膜光学原理, 以及基于光的电磁波性质分析和计算光学薄膜特性的各种方法。第二篇光学薄膜系统的设计, 结合实际应用讨论了常用的多层膜系统的解析设计技术, 附录则介绍了近年来发展并趋于完善的导纳轨迹图解技术, 以作为解析设计方法的补充。第三篇阐述了光学薄膜自动设计的最新发展以及最优化数值方法和评价函数的建立, 着重介绍了作者提出的求总极值的统计试验方法, 并提供了一些设计实例。

本书可作为高等学校薄膜光学课程的教学用书, 也可供从事薄膜工作和光学工程工作的科研人员、工程技术人员以及高等学校光学专业的师生参考。

应 用 薄 膜 光 学

晋发 郑 权 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 无锡县人民印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 15 字数 332,000

1984 年 10 月第 1 版 1984 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—4,100

统一书号: 13119·1195 定价: 2.30 元

序

薄膜光学为应用光学学科的一个重要分支,近年来由于光谱干涉技术、激光技术及空间光学等的飞跃发展,促使光学薄膜也得到了迅速的发展。因此总结这门分支学科的理论经验是非常必要的。著者将本书内容分为薄膜光学导论、光学薄膜系统的设计和光学薄膜自动设计三篇,这是合适的,也是恰当地体现了书名的含义。第一篇薄膜光学导论包括电磁场的基本性质,光学涂层的特性理论以及光学薄膜系统的分析与计算方法。叙述方法全面扼要,数学公式推导清晰完整,属于薄膜光学的基础理论。第二篇光学薄膜系统的设计包括了近代薄膜光学的实际设计理论与实例。这部分内容共分六章:增透膜,分光镜,反射膜,干涉截止滤光片,带通滤光片及特殊膜系,基本总结了现代的光学薄膜成果。著者多年从事薄膜光学工作,涉及面较广,对金属膜,电介质膜,金属-电介质组合膜,偏振膜及激光膜等都下苦功夫钻研过,书中体现了这些研究成果。第三篇光学薄膜自动设计系统地介绍了近年来新发展起来的以最优化技术作为工具用电子计算机合成光学薄膜系统的方法。这一篇中先介绍评价函数的建立,再介绍最优化方法,最后用实例来介绍自动设计的技巧。

本书可推荐作为高等院校的专业教材,也可供从事光学薄膜工作的科研工作者和工程技术人员阅读。

著者嘱托执笔作序,但本人虽多年从事光学薄膜科研工作,因具体原因未能做出多大贡献,真是才疏学浅,愧不敢当。仅尽薄力,谨书数言搪塞,希鉴谅。

袁幼心

1980年8月

前 言

薄膜光学发展的早期历史可以追溯到十九世纪, 1873年麦克斯韦 (Maxwell) 的巨著《论电与磁》的问世, 奠定了分析薄膜光学问题所必须的全部理论基础。甚至在更早一些时间, 夫琅和费 (Fraunhofer) 于1817年用酸蚀的方法制成了可以说是第一批减反射膜, 但光学薄膜的真正发展是在1930年真空蒸发设备出现以后才有可能。第二次世界大战后, 在光学技术, 彩色摄影和彩色电视, 激光及空间技术发展的推动下, 光学薄膜技术也得到了飞速的发展。至今可以毫不夸张地说, 没有光学薄膜, 大部分近代的光学系统就不能正常地工作。光学薄膜在增加或减少反射、吸收、透射; 在彩色的合成和还原; 在调整光束的偏振或相位状态, 简而言之在光学装置的几乎所有特性方面都起着重要的作用。

差不多所有光学薄膜的特性都是基于薄膜内的干涉效应。肥皂泡和水面上的油污层的颜色便是单层膜中的干涉效应的最好的例子。从肥皂膜或油膜的外表面和内表面反射的光束, 如果它们之间的光程差是波长的整数倍就产生相长干涉; 如果光程差是半波长的奇数倍就产生相消干涉。由于这两束光线之间的光程差决定于膜的厚度和入射角, 所以肥皂膜或油膜上的颜色随着膜厚度的改变和观察角度的不同而变化无穷, 产生光彩流转。光学薄膜系统有着类似的干涉效应, 但由于涉及到多得多的膜层, 变得更为复杂。正因为如此, 光

学涂层可用来获得各种各样的光学特性。它可以减少表面的反射,因而增加元件的透射率,或者增加表面反射率,或者在一个波段内给出高的反射率、低的透射率,而在其余的波段则有低的反射率、高的透射率,也可以使不同的偏振平面有不同的特性等等。

当光在膜层中的干涉效应可以被探测到,我们就说膜层是薄的,反之就是厚膜。当然,干涉效应能否被探测到,除了取决于膜层本身外,还取决于照明光源和使用的探测器。但是,在光学薄膜中,我们考虑的最大的厚度不会超过几个波长,而基片的厚度至少有1毫米。因此,在这种条件下不会产生什么混乱:本书中涉及的膜层是薄的,而基片则是厚的。所谓厚的基片意味着在基片内的各光束之间的光程差超出了光的相干长度,因而总的强度简单地只是各光束强度之和,而没有任何其他的干涉效应。

在一个多层薄膜系统中,光束将在每一个界面上多次反射,因此涉及到大量光束的干涉。如果薄膜内存在吸收,则情况将更复杂。即使是一个只有几层膜的组合,直接基于多光束干涉的特性计算将变得异乎寻常的繁琐。因而这种类型的多光束计算很少用来确定多层薄膜系统的特性。通常宁可采用涉及到矩阵连乘积的麦克斯韦方程的另一种解,其中每一个 (2×2) 矩阵表示一层薄膜。本书在讨论光学薄膜系统的特性分析和计算方法时,主要就是采用这种特征导纳的矩阵法,它也构成了薄膜解析设计的基础。

对于一给定参数的多层膜,利用计算机计算其特性是轻而易举的。但相反的问题,即设计具有给定特性的多层膜结构却是十分困难的。这大大地促进了设计技术的早期发展。基于一些特殊的膜系结构单元,如对称膜系、周期性结构以及

四分之一波堆等,发展了非常有效的解析设计技术。带通滤光片、截止滤光片、多层增透膜以及分色膜等就是利用这种方法设计的多层膜系统的例子。但是欲得到任意要求的特性,这显然是超出了解析设计的当前发展水平。在这种场合,最好的途径是利用解析设计得到一个初始的结构,并基于薄膜光学理论构造合适的评价函数,然后用计算机自动设计技术修改和校正多层膜结构,以达到所要求的特性。这种解析设计和自动设计技术的结合,是光学薄膜设计的方向,无疑会愈来愈引起人们的重视。基于这样的认识,我们在构思本书的内容结构时,决定编写薄膜光学导论,光学薄膜系统的设计和光学薄膜自动设计三篇,分别由唐晋发编写前二篇,郑权编写第三篇。

还必须指出的是,本书所处理的光学薄膜,都是假定为各向同性的、均匀的平行平面固体薄膜,而实际薄膜都是或多或少地偏离于这种理想的模型。近十年来光学薄膜研究的最大进展,就是我们对实际薄膜的特性和结构有了更好的认识和理解。薄膜横断面的电子显微照片已经无可怀疑地揭示了几乎所有的光学薄膜都具有显著的柱状结构。薄膜就好象是由许多直径约几百埃的小柱体紧密地聚集在一起而形成的。这种柱状结构被认为是由于蒸发原子或分子在基片上具有有限的迁移率所引起的。基于有限迁移率的模型进行的薄膜生长过程的计算机模拟也证实了这种构造。聚集在一起的小柱体之间留下了很多类似毛细孔的空隙,和比薄膜外表面面积大得多的内表面。薄膜暴露在大气中时,潮气会吸附在薄膜内的柱体表面上,更由于毛细凝聚作用,空隙内会注满液体水。所以所谓固体薄膜实际上并不全是固体,还包含了若干气相和液相的水。这种潮气的吸附和渗透是造成光学薄膜不稳定

和光学的、机械的特性变坏的主要原因,这是当前薄膜光学领域的主要研究课题之一。

表示柱体聚集在一起的紧密程度的量是所谓聚集密度。它被定义为实心柱体的体积和包括柱体和空隙的薄膜总体积的比值。薄膜的折射率是聚集密度的函数,最简单的线性近似是

$$n = pn_s + (1-p)n_v,$$

这里 p 是聚集密度, n_s 是实心柱体的折射率, n_v 是空隙内介质的折射率。由于在薄膜生长方向上的柱体大小和形状都会发生变化,因而造成薄膜折射率在厚度方向上的不均匀性是一点也不奇怪的。同时由于各个小柱体生长方向的一致性,可以设想光波沿着柱体方向和垂直于柱体方向上的传播特性多少会有些不同,因而薄膜呈现一定程度的各向异性也是预料之中的。尽管实际上薄膜多少偏离于理想薄膜的模型,但为了易于处理一般的光学薄膜问题,本书仍然以理想薄膜为基础,分析和讨论光学薄膜的特性。

近几年来光学薄膜又有了新的发展,其中麦克劳德(Macleod)教授发展和完善了导纳轨迹图解技术,是一个主要的进展。导纳轨迹图解技术为直观地分析光学薄膜系统的特性和选择合适的初始构造提供了有力的工具。它的应用十分广泛,既可以处理无吸收的介质膜,又可以处理吸收的金属膜;既可以讨论垂直入射的情况,也可以包括倾斜入射的情形。因而在附录二专门介绍了导纳轨迹图解技术作为本书第二篇的补充。麦克劳德教授同意在本书中引用他业已发表的研究成果及图表、曲线,借此机会表示衷心的感谢。本书在编写过程中曾得到了我室顾培夫同志及其他同志的帮助,在薄膜光学课程的教学过程中,学生们也曾对本书的内容

提出一些意见和建议,在此一并致以谢意。本书的初稿曾蒙袁幼心先生和范正修同志审阅,袁幼心先生并为本书作序,作者表示深深的感谢。

光学薄膜几乎涉及到各个学科,在这有限的篇幅中要想反映薄膜光学的各个方面是不可能的,更由于作者理论基础和实践经验的限制,本书肯定有不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

浙 江 大 学 唐晋发

上海科技大学 郑 权

1983年7月

目 录

序 前言

第一篇 薄膜光学导论	1
第一章 电磁场的基本性质	1
§ 1.1.1 光的波动性	1
§ 1.1.2 麦克斯韦方程和平面电磁波	16
§ 1.1.3 平面电磁波在单一界面上的反射和折射	27
第二章 光学薄膜系统的特性计算	39
§ 1.2.1 单层介质薄膜的反射率	41
§ 1.2.2 多层介质薄膜的反射率	48
§ 1.2.3 矢量法	52
§ 1.2.4 应用菲涅尔系数的计算方法	57
§ 1.2.5 吸收薄膜系统的特性计算	67
第三章 规整膜系的特性分析和合成	81
§ 1.3.1 周期性多层膜	82
§ 1.3.2 对称膜系的等效折射率	90
§ 1.3.3 利用傅里叶级数的多层膜的计算和合成	100
第二篇 光学薄膜系统的设计	115
第一章 增透膜	115
§ 2.1.1 单层增透膜	116
§ 2.1.2 双层增透膜	120
§ 2.1.3 三层增透膜的理论模型	125
§ 2.1.4 设计多层增透膜的一种矢量作图法	132

§ 2.1.5	利用代换对设计多层增透膜	137
§ 2.1.6	高折射率基片的增透膜	143
§ 2.1.7	膜层折射率的非均匀性对增透膜特性的影响	148
第二章	分光镜	154
§ 2.2.1	金属分光镜	155
§ 2.2.2	介质分光镜	157
第三章	反射膜	164
§ 2.3.1	金属反射膜	164
§ 2.3.2	多层介质高反射膜	171
§ 2.3.3	展宽高反射带的多层介质膜	181
§ 2.3.4	低损耗激光反射镜的设计	189
第四章	干涉截止滤光片	209
§ 2.4.1	概述	209
§ 2.4.2	$\lambda/4$ 多层膜的通带的透射率	211
§ 2.4.3	通带波纹的压缩	215
§ 2.4.4	通带的展宽和压缩	222
§ 2.4.5	截止波长和截止带中心的透射率	228
§ 2.4.6	截止滤光片倾斜使用时的偏振效应	234
§ 2.4.7	利用金属薄膜的宽带截止滤光片	240
第五章	带通滤光片	244
§ 2.5.1	法布里-珀洛滤光片	245
§ 2.5.2	全介质法布里-珀洛滤光片	252
§ 2.5.3	多半波滤光片	255
§ 2.5.4	诱导透射滤光片	270
§ 2.5.5	窄带滤光片的直接控制法和厚度允差分析	285
第六章	特殊膜系	305
§ 2.6.1	全介质光学负滤光片	305
§ 2.6.2	偏振分光镜	313
§ 2.6.3	消偏振分光镜	321
§ 2.6.4	太阳能薄膜	332
§ 2.6.5	真空紫外及软 X 射线反射镜	337

附录一	常用光学薄膜材料的性质	346
附录二	麦克劳德的导纳轨迹图解技术	351
第三篇	光学薄膜自动设计	364
第一章	自动设计与评价函数	364
§ 3.1.1	引言	364
§ 3.1.2	几个自动合成方法简介	366
§ 3.1.3	评价函数的建立	379
§ 3.1.4	光学薄膜自动设计方法的简述	387
第二章	最优化数值方法	388
§ 3.2.1	求极值问题	389
§ 3.2.2	梯度型最优化算法	399
§ 3.2.3	阻尼最小二乘法和正交化法	408
§ 3.2.4	几个简单的直接搜索法	413
§ 3.2.5	单纯形调优法	418
§ 3.2.6	共轭方向法	423
第三章	求初始解和求总极值的方法	426
§ 3.3.1	格点法和随机投点法	426
§ 3.3.2	不完全扫描法和试探法	429
§ 3.3.3	求总极值方法	435
§ 3.3.4	求总极值方法的实现	439
第四章	薄膜自动设计的实践	446
§ 3.4.1	减反射膜设计	446
§ 3.4.2	分光镜自动设计	456
§ 3.4.3	干涉截止滤光片自动设计	462

第一篇 薄膜光学导论

第一章 电磁场的基本性质

§ 1.1.1 光的波动性

实验证明, 光同无线电波、X 射线、 γ 射线一样都是电磁波, 仅是它们的频率不同而已。电磁波的波长 λ 、频率 ν 和传播速度 v 三者之间的关系为

$$v = \lambda \cdot \nu.$$

由于各种频率的电磁波在真空中的传播速度相等, 所以频率不同的电磁波, 它们的波长也就不同。频率高的波长短, 频率低的波长长。为了便于比较, 可以按照无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线和 γ 射线等的波长(或频率)的大小, 把它们依次排成一个谱, 这个谱叫做电磁波谱(图 1-1)。

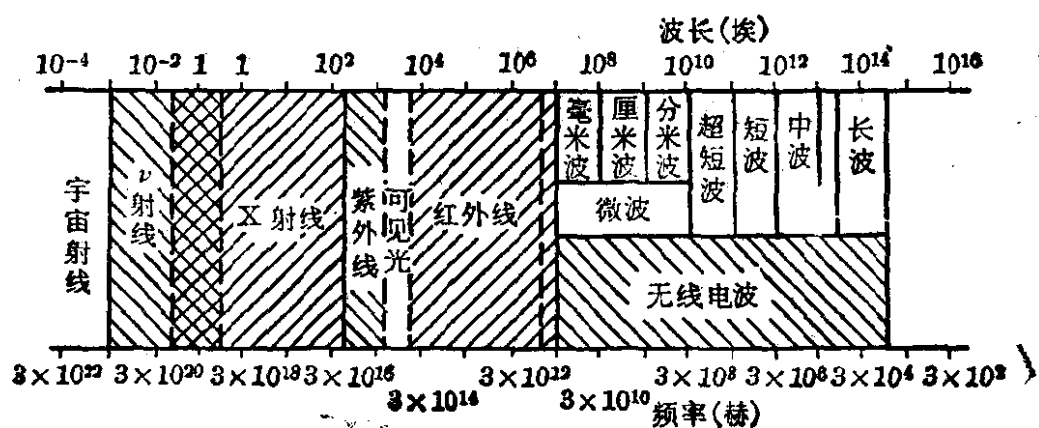


图 1-1 电磁波谱及光谱

在电磁波谱中,波长最长的是无线电波,无线电波又因波长的不同而分为长波、中波、短波、超短波和微波等。其次是红外线、可见光和紫外线,这三部分合称光辐射。在所有的电磁波中,只有可见光可以被人眼所看到。可见光的波长约在0.76微米到0.40微米之间,仅占电磁波谱中很小的一部分。再次是X射线。波长最短的电磁波是 γ 射线。

各种电磁波的频率(或波长)范围不同,它们产生的方法不同,性质(如被物质吸收、对物质的作用等方面)也有很大的差别,因此探测的方法也有所不同。这种由于频率在量上的不同而引起各种电磁波的质的区别,是自然现象中量变引起质变这一辩证规律的生动实例。

光既是一种电磁波,所以在传播过程中,应该表现出波动所具有的特征——干涉、衍射、偏振等现象。下面就与薄膜的光学特性密切相关的薄膜干涉、驻波干涉和偏振效应等作一简略的介绍。

一、薄膜干涉

干涉现象是波动过程的基本特征之一。但是,只有频率相同、振动方向相同、相位相同或相位差保持恒定的两个相干光源所发出的波才是相干波。我们知道,光是由光源中原子或分子的运动状态发生变化时辐射出来的。每个原子或分子每一次发出的光波,只有短短的一列,持续时间约为 10^{-8} 秒。人眼感觉到的光波是大量原子或分子发光的总的结果。但是,一方面由于构成光源的大量原子或分子,是各自相互独立地发出一个个波列的,即使它们的频率相同,它们的相位和振动方向也各不相同。另一方面,原子或分子的发光是间隙的,当它们发出一个波列之后,要停留若干时间再发出第二个波列,前一个波列和后一个波列的频率、振动方向和相位也不一

定相同。这样，对于两个独立光源来说，产生干涉的三个条件，特别是相位相同或相位差恒定这个条件，很不容易满足。所以，两个独立的一般光源是不能构成相干光源的。不但如此，即使是同一个光源上不同部分发出的光，由于它们是不同的原子或分子所发出的，一般也不会产生干涉。

那么，怎样才能获得两束相干光呢？如果使一光源上同一点发出的光，沿着两条不同的路径传播，然后再使它们相遇，这时，每一个波列都分成两个频率相同、振动方向相同、相位差恒定的波列，这两个波列在相遇区域中就能产生干涉现象。图 1-2 表示一个波列在薄膜的两个界面上分成两个波列的情况。入射光中某一个波列 W 在界面 1 上反射所形成的波列为 W_1 ，在界面 2 上反射所形成的波列为 W_2 ， W_1 与 W_2 的频率相同，振动方向相同，而相位差决定于两个波列经过的路径。对于入射光 I 中的其它波列，类似于上述讨论，都有相等的恒定的相位差。所以在界面 1 和 2 上形成的两束反射光 I_1 和 I_2 是相干光，在它们相遇的区域中，会产生干涉现象。

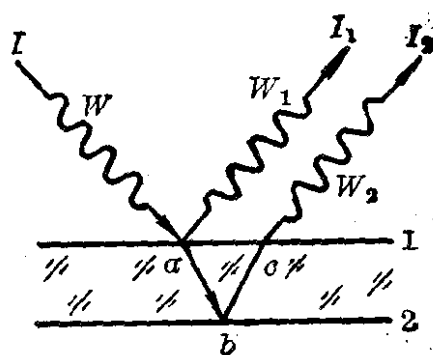


图 1-2 一个波列分成两个相干波列

我们在日常生活中经常可以看到，雨后马路上积水表面的油膜呈现五彩缤纷的颜色。肥皂膜上的这种彩色更是光彩流转，奇丽多变。在照相机、电影摄影机等镜头上敷膜后，如开花一般显现出紫红等干涉色。这些都是太阳光（或灯光）在薄膜上产生的干涉现象，统称为薄膜干涉。利用光程差的概念，可以比较方便地讨论薄膜干涉。

如图 1-3 所示，1 和 2 表示薄膜的上、下两界面。从远处

光源上一点射出的单色光(单位辐射)入射到薄膜上,一部分

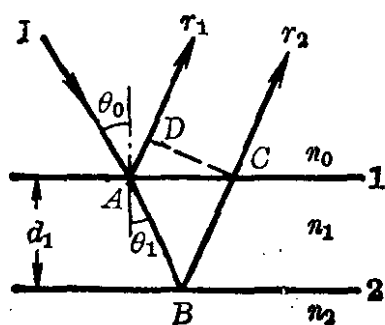


图1-3 薄膜干涉

在界面1上反射(振幅为 r_1 的反射光),另一部分透过界面1,在界面2上反射,然后再透过1面而射出(振幅为 r_2 的反射光)。很容易看出,当界面1和2互相平行时, r_1 和 r_2 这两条反射光线亦互相平行。因此,它们会合而产生干涉的地方在

无穷远处。实际上, r_1 和 r_2 是由透镜会聚在其焦面上来考察的。当然,也可由眼睛直接接收,聚焦在其视网膜上。

光线 r_1 和 r_2 的干涉强度决定于它们的光程差。作 CD 垂直于光线 r_1 , 于是, r_1 和 r_2 的光程差

$$\Delta = n_1(AB + BC) - n_0 AD.$$

从图上很容易找出下列几何关系:

$$AB = BC = d_1 / \cos \theta_1,$$

$$AD = AC \cdot \sin \theta_0 = 2d_1 \operatorname{tg} \theta_1 \cdot \sin \theta_0.$$

此外,根据折射定律有

$$n_0 \cdot \sin \theta_0 = n_1 \cdot \sin \theta_1.$$

把上面三式代入,得到光程差

$$\Delta = 2n_1 d_1 \cos \theta_1. \quad (1-1)$$

相应的相位差

$$2\delta = 4\pi n_1 d_1 \cos \theta_1 / \lambda_0. \quad (1-2)$$

如果先不考虑光在界面1、2上反射时的相位跃变,则当光程差为

$$2n_1 d_1 \cos \theta_1 = m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

时,将产生相长干涉;而当

① $n_1 d_1 \cos \theta_1$ 称为薄膜的有效光学厚度,而 $\delta = 2\pi n_1 d_1 \cos \theta_1 / \lambda_0$ 则称为有效的相位厚度。

$$2n_1d_1 \cos \theta_1 = (2k+1)\lambda_0/2 \quad (k=0, 1, 2, \dots)$$

时, 将产生相消干涉.

干涉强度的计算, 可先迭加反射光 r_1 和 r_2 的振动:

$$E_1 = r_1 \cos \omega t,$$

$$E_2 = r_2 \cos(\omega t - 2\delta),$$

得到合振动为

$$E = r \cos(\omega t - \varphi),$$

式中 r 是合振幅, φ 是合振动相位. 二者和 r_1 、 r_2 、 2δ 有如下关系:

$$r^2 = r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\delta, \quad (1-3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = r_2 \sin 2\delta / (r_1 + r_2 \cos 2\delta), \quad (1-4)$$

其中

$$2\delta = 4\pi n_1 d_1 \cos \theta_1 / \lambda_0.$$

按照光强定义, 反射光合振动的强度 $R = r^2$, 而 $R_1 = r_1^2$, $R_2 = r_2^2$. 则双光束干涉强度的计算公式是

$$R = R_1 + R_2 \pm 2\sqrt{R_1 R_2} \cos 2\delta, \quad (1-5)$$

式中 \pm 号由 r_1 和 r_2 的符号确定. 当 r_1 和 r_2 同号时取加号; 而当 r_1 和 r_2 异号时取减号. 光束由光疏媒质到光密媒质反射时, 反射振幅为负值, 表示有 π 的相位跃变; 相反, 当光束由光密媒质到光疏媒质反射时, 反射振幅为正值, 表示没有相位跃变. 因此, 上式中 \pm 号正是考虑了界面上反射时的相位跃变情况, 而 2δ 则仅指两反射光束经历不同的路径而引入的相位差.

当光束照射到平行平面薄膜上时, 光束在薄膜两表面上要多次反射, 因而产生一组反射光束和一组透射光束(图 1-4). 当薄膜表面的反射系数不高时, 我们只考虑头两束光的作用, 忽略反射两次以上的光束, 把多光束干涉作为双光束干涉来处理. 但是当薄膜表面反射率较高时, 这样处理是不严格的, 必须考虑一组反射光 s_1, s_2, s_3, \dots 之间或透射光