

光学知识丛书

光学中的固体薄膜

唐晋发 编著



科学出版社

U484.4
J41/201/12

光学知识丛书

光学中的固体薄膜

唐晋发 编著

科学出版社

1987

内 容 简 介

这是一本有关光学薄膜的中级科普读物。它回顾了光学薄膜发展的历史，由浅入深地介绍了光学薄膜技术的各个方面——设计、制造、特性测试、应用以及当前正在开展研究的前沿课题。

本书可供具有中等文化程度的光学产业部门工人，企业管理干部以及一般科技人员阅读；也可供光学薄膜工作者参考。

光学知识丛书

光学中的固体薄膜

唐晋发 编著

责任编辑 姚平录

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年10月第一版 开本：787×1092 1/32

1987年10月第一次印刷 印张：5

印数：0001—9,450 字数：108,000

ISBN 7-03-000038-2/TB·2

统一书号：15031·877

定价：0.96元

《光学知识丛书》编委会

主 编	张志三			
副主编	沈寿春			
编 委	刘颂豪	母国光	林钧挺	郭履容
	缪家鼎	薛鸣球	刘振堂	杜春耕
	黄高年			

前 言

薄膜光学是近代光学的一个重要分支。今天，几乎所有的光学或光电系统都包含有各种光学薄膜。没有光学干涉薄膜的相应发展，许多复杂系统的优越性能，有时甚至是基本的功能都是不可能实现的。

尽管早在 1817 年夫琅和费用酸蚀的方法制成了可以说是第一批减反射膜，1873 年麦克斯韦的巨著《论电与磁》的问世，也奠定了分析薄膜光学问题所必需的全部理论基础，但光学薄膜的真正发展是在 1930 年出现油扩散真空泵以后才有了可能。三十年代中期用真空蒸发方法制备了单层减反射膜，到三十年代末期就出现了法布里-珀罗型窄带滤光片。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，无论是光学薄膜系统的计算机辅助设计，光学多层膜的制备工艺和薄膜特性的测量技术与装置，以及薄膜材料的研究都取得了飞速的发展。多通道光纤通信中应用的消偏振截止滤光片、定位在 10.6 微米波长的反射式 90° 相位延迟膜、激光陀螺中应用的反射率高达 99.95% 的高性能激光反射镜等，在十年前都还不可能制造，目前国外均已有商品供应。光谱范围从紫外 1200 埃到红外 5.5 微米，甚至更远，各类窄带滤光片已有系列的、常规的商品生产。它们覆盖了汞灯的所有谱线和几乎所有常用的激光波长。中心波长的精度可达 2 埃，半宽度 10 埃，截止区从软 X 射线一直延伸到远红外区，截止深度达 10^{-4} 。光学薄膜的制造基本上摆脱了依赖手艺、技巧和碰运气的状态，进入了工业规模生产。仅美国一

家专业公司(光学镀层实验室公司)在七十年代末就达到了四千余万美元的年产值。

我国光学薄膜技术的发展起步较晚。五十年代初首先在长春、杭州利用真空蒸发制作薄膜。那时的真空蒸发设备是简陋的,钟罩是玻璃制的,排气系统采用玻璃制的油扩散泵系统,既没有基片架的旋转装置,也没有薄膜厚度的光学监控系统。当时只能蒸发一些简单的、诸如氟化镁和铝这样的单层膜。我国的多层膜技术,是从六十年代初发展起来的。开始制作金属-介质的法布里-珀罗型窄带滤光片和分束镜。其后在激光技术的推动下,研制多层介质膜激光反射镜和各种激光用薄膜器件。七十年代,在发展彩色电影和彩色电视的浪潮中,纷纷研制彩色分色滤光片和多层宽带减反射膜,促使了光学薄膜技术的普及和发展。光学薄膜的计算机辅助设计也是七十年代开始发展并趋于成熟的。至此我们已能设计和制造从紫外区到红外区的各种要求的光学薄膜滤光片,以满足国内光学、激光和红外技术发展的需要。八十年代初,在我国对外开放政策的推动下,光学薄膜工作者受派遣去国外著名的光学薄膜研究中心(实验室)进修,吸取国外的先进经验和活跃的学术思想。此后国际上一些最著名的光学薄膜专家、学者相继来我国讲学和交流。1984年我国光学薄膜的专家和学者第一次应邀参加了第三届国际光学干涉薄膜专题讨论会,并在会上介绍了我国光学薄膜技术的发展和取得的进展。从此打开了我国和国际薄膜界交往的通道,开始了合作和交流的进程。

毫无疑问,我国光学薄膜技术从无到有取得了巨大的进展。但是与一些先进国家相比,尽管在某些单项技术方面我们有自己创造性的工作,但就总体来说,我们的光学薄膜技术还是落后的。除了研究装备和实验条件的限制以外,一个重

要的原因是，从事薄膜研究的工作者在科技界中所占的比例太小，现有的科技人员(包括笔者在内)的知识结构又不能适应光学薄膜的进一步发展。我们当然需要更新知识和继续学习。但如果不能吸引一大批优秀青年来从事光学薄膜的研究，我们就不能指望赶上并超过国际先进水平，就不能指望为发展光学薄膜技术作出我们应有的贡献。

笔者编写本书的意图是使读者能了解光学薄膜的应用和重要地位，熟悉光学薄膜的设计、制作和特性测试的基本常识，以及光学薄膜领域中的一些前沿研究课题。希望有尽可能多的研究人员来研究在科学技术上有重要意义的光学薄膜。同时，也希望本书能成为一本有用的参考书，对正在从事光学薄膜工作的工人、技术人员有所帮助。至于这些意图究竟完成得怎么样，心中很没有底，期待着读者的批评和意见。

最后，笔者在编写本书的过程中，得到我校缪家鼎教授的关心和支持。缪家鼎教授还仔细地审阅了本书的初稿，并提出了许多宝贵的意见。我的同事顾培夫副教授为本书的编写提供了很多资料。陈宇明和金尚忠同志帮助绘制了本书中大部分图表和曲线。笔者在此一并致以衷心的感谢。

唐晋发

1986年元月于杭州，浙江大学

目 录

前言

第一章 薄膜在光学技术中的奇妙应用.....	1
一、从照相机镜头上的鲜艳色彩谈减反射膜的应用	1
二、激光器中的关键器件——激光反射镜	10
三、白光是怎么分成三种原色的？ ——彩色分色滤光片的应用	13
四、利用窄带滤光片可以得到各种单色谱线	22
五、热性能控制薄膜以及光学薄膜的其它的种种应用	30
第二章 光学薄膜技术.....	47
一、光学薄膜的设计技巧	47
二、真空蒸发技术是制作光学薄膜的主流	69
三、真空的获得和测量	75
四、薄膜的蒸发技术	86
五、光滑和清洁的基片表面是得到高性能薄膜的基本条件...	104
六、关键是精确控制每一层薄膜的厚度.....	111
七、如何保证薄膜厚度的均匀性？	119
第三章 实际薄膜的特性.....	127
一、薄膜光学特性的测试.....	127
二、限制薄膜特性的一些因素.....	137
三、固体薄膜并不全是固体.....	141
四、薄膜柱状结构的起因.....	144
五、离子辅助蒸发技术正在兴起.....	148

第一章 薄膜在光学技术中的 奇妙应用

一、从照相机镜头上的鲜艳色彩 谈减反射膜的应用

你一定已注意到，照相机镜头在日光中都呈现出品红或紫蓝的鲜艳的色彩。这是由于在镜头的表面敷上了少则一层多则几层的减反射膜的缘故。它们的厚度虽然只有几分之一微米，却大大地提高了照相机的性能。

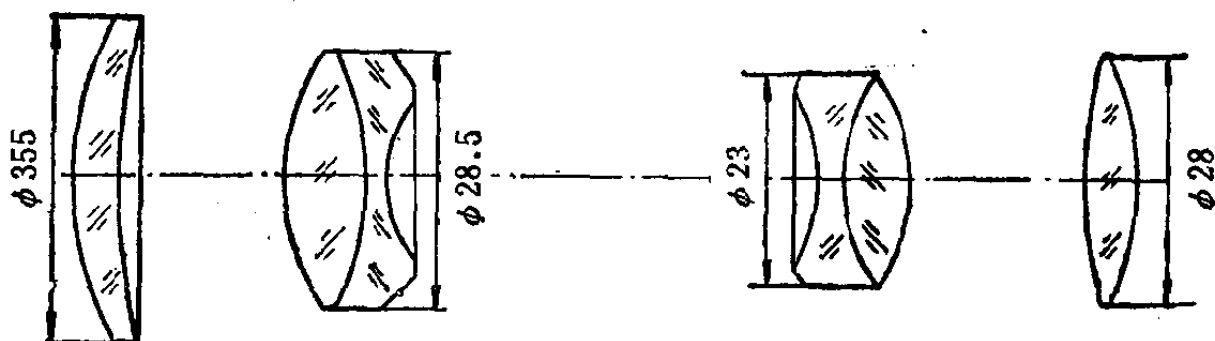


图 1-1

照相机镜头通常都由几片透镜组成，以国产的 *DF* 照相机的镜头为例(图 1-1)，由 6 片透镜构成所谓的双高斯系统，除了二片透镜胶合的表面以外，有 8 个表面与空气相邻。光线入射在折射率不同的两个介质的分界面上时，除了透过表面的部分以外，都会有一部分光线在表面上反射。正是由于这种表面的反射光(镜式反射和漫反射)，我们才能看到各种物体。如果表面是光滑的，它就可以称之为光学表面。玻璃

透镜的表面就是这种情况。假定光线垂直入射在表面上，这时表面的反射光强度与入射光强度的比值(称为反射率)仅决定于相邻介质的折射率的比值：

$$R = \left(\frac{1 - n_1/n_0}{1 + n_1/n_0} \right)^2.$$

如果光线是从空气中入射的,空气的折射率 n_0 为 1,那么表面反射率仅决定于玻璃的折射率 n_1 . 例如折射率为 1.52 的冕牌玻璃,每个表面约反射 4% 的入射光; 折射率为 1.65 的火石玻璃表面则反射率为 6% 左右. 为了简单起见,我们暂时

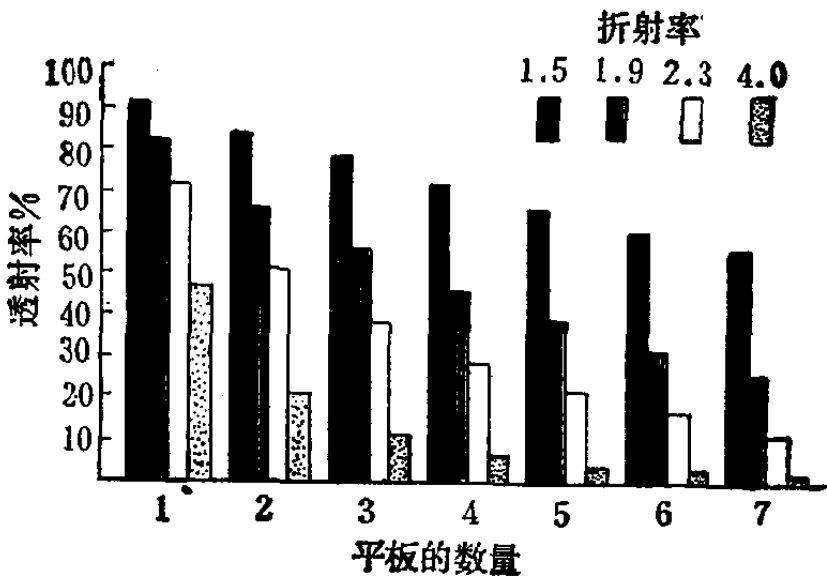


图 1-2

用平行平面玻璃取代玻璃透镜,并且忽略不计光线在玻璃内的吸收,那么透过一块平行平面玻璃的光强度与入射光强度的比值(称为透射率)可以方便地用下式计算:

$$T = \frac{2n_1}{n_1^2 + 1}.$$

对于折射率为 1.52 的玻璃,透射率为 92% 左右. 即 8% 的入射光由于表面反射损失掉了. 图 1-2 给出了不同数量和不同折射率的平行平面的总的透射率. 所以对于包含许多块透

镜的照相机镜头,尤其是变焦距镜头,有相当部分的人射光能量被损失掉了,使底片上的象的亮度显著降低。不仅如此,实际的透镜系统的各个表面不是平行的。表面反射光经过透镜表面和镜筒壁的多次反射,最后有一部分反射光成为杂乱光也到达了照相底片,形成所谓的鬼象,降低了象的衬度和清晰度。近代的照相机镜头都必须经过敷膜处理,以减少这种有害的表面反射光。图 1-3 通过两张照片的对比说明了减反射膜的效果。右面是未经敷膜处理的透镜所拍摄的照片,左面是有减反射膜的镜头拍摄的同样目标的照片,晕光是显著地减少了。



图 1-3

图 1-2 上所列的任何一种材料的表面反射,都可以利用一层适当折射率的薄膜使之在一定的波长范围内减少到小于 1.5%。这是在薄膜的两个界面上的反射光干涉抵消的结果。

我们知道,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都是一样的,常用符号 c 来表示,

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ 米/秒} \approx 3 \times 10^8 \text{ 米/秒}.$$

即每秒传播 30 万公里。在任何介质中,电磁波传播的速度要比 c 慢。不过在空气中传播的速度 v 和 c 相差极微,因此通常也近似地把它当作 c 。同一种频率的电磁波在不同介质中的传播速度是不一样的。若某种频率的电磁波在介质中的传播速度为 v ,则 c 与 v 的比值称为这种介质对这种频率的电磁波的折射率。

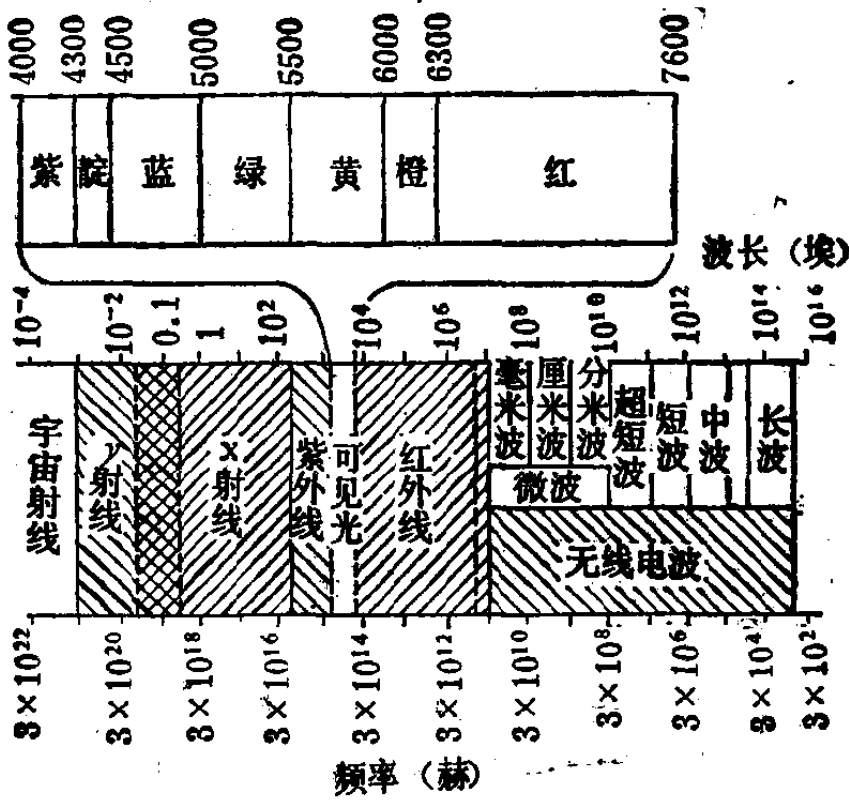


图 1-4

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 1-4)。

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,这三部分合称为光辐射。而在我们的视觉中,能反映出有红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等颜色差别的所谓可见光,又只占光辐射中很小一部分。可见光的波长约在 0.40 微米到 0.76 微米之间。由于光在不同介质中传播的速度是不同的,而频率却不变,因之某一频率的光在不同介质中的波长是不同的。在没有特别注明的情况下,我们所说的波长一般指的是在真空中(或近似地在空气中)的波长。在红外波段中常采用微米(μm)作为波长单位,在可见光到紫外波段常采用埃($\text{\AA}$)或纳米(nm)作为波长单位。

$$1 \text{ 米} = 10^6 \text{ 微米} = 10^9 \text{ 纳米} = 10^{10} \text{ 埃}$$

光既然是一种电磁波,那么在传播过程中,应该表现出波动所具有的特征——干涉、衍射、偏振等现象。干涉现象是波动过程中的基本特征之一。投射到同一点上的两束光线可以彼此叠加,在该点产生暗影(干涉抵消)或产生比两束光简单地相加更强的光斑(干涉加强)。但是,只有频率相同、相位相同或相位差保持恒定的两个相干光源所发生的波才是相干波。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，沿着两个不同的路径传播，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。光束在薄膜中的干涉就是这种情况。如图 1-5 所表示

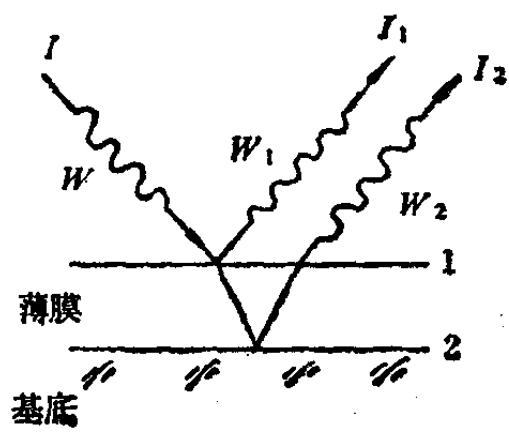


图 1-5

的，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，而相位差仅决定于两个波列经过的路径，即薄膜的厚度。对于入射光 I 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，在它们的相遇区域中会产生干涉现象。

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，绚丽多变。在照相机、电影摄影机等镜头上敷膜后，如开花一般呈现出紫红等干涉色。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。

现在让我们回到减少表面反射光的问题上来。最简单的单层减反射膜是一层折射率比玻璃基底低的固体薄膜。如果我们忽略光线在薄膜内的多次反射，那么只需考虑界面 1 和 2 上的两束光线的干涉(图 1-5)。入射光的一部分在界面 1

上反射,一部分光线经过界面 1 进入薄膜,在界面 2 上反射后又回到界面 1。它们所经过的路径之差是两倍的薄膜厚度。当薄膜的厚度和折射率的乘积(称为光学厚度)是某一参考光波波长的四分之一时,两束光的光程差是二分之一波长,即相位差是 180° , 因而干涉抵消。这时如果薄膜的折射率是玻璃基底的折射率的平方根,即 $n_1 = \sqrt{n_g}$, 两束反射光的振幅相等以至完全抵消,合成的反射光强度为零,也即完全消除了表面反射光。通常我们把参考波长选在可见光的中间,约 520 纳米。对于紫端和红端的波长,薄膜的光学厚度不是四分之一波长,也即偏离了干涉抵消的条件。紫端和红端的光有略高的反射,因此在反射光中呈现紫红的干涉色。

夫琅和费早在 1817 年制成了可以说是第一批减反射膜。他将经过精细地抛光的平面玻璃一半放在浓硫酸或浓硝酸中腐蚀。将玻璃上的酸液清洗干净之后发现,经酸腐蚀的表面所反射的光强远低于另一半表面的反射光强,即酸浸过的那部分玻璃表面失掉了某种成分,形成薄薄一层折射率比玻璃基底折射率低的失泽层,不过玻璃还未遭刻蚀,因为其透射光仍和另一半表面一样(实际上更高),以致在透射光中仔细检查也不能找出它们的分界线来。经过硫酸或硝酸的这种处理之后,有些牌号的玻璃表面呈现美丽鲜艳的色彩;若使光沿各种不同的角度入射,则色彩宛如肥皂泡一样变幻无穷。

夫琅和费显然没有按这一独特方法去发展玻璃的减反射膜,可能是因为在那个时代,光学装置尚不十分复杂,因而对减反射膜的需求也就不迫切。也可能是因为夫琅和费疏忽了关键之处:失泽玻璃不仅其反射率降低,而且同时其透射率也得到了增加。目前制备光学应用的薄膜的主要方法是真空蒸发法和溅射法。后者在十九世纪中叶就发现了,而前者可追溯到二十世纪初。但在 1930 年以前,它们不能作为实用的

镀膜方法,因为没有获得高真空的真正适用的抽气机。直到1930年出现了油扩散泵-机械泵抽气系统以后,制造实用的真空镀膜机才成为可能。三十年代中期德国的鲍尔和美国的斯特朗先后用真空蒸发方法制备了单层减反射膜,这种简单的减反射膜至今在一般的光学装置上还被大量地应用。

折射率为1.52的玻璃敷有折射率为1.38的氟化镁薄膜后,单面的反射损失可从4.3%减少到1.5%左右。7块平板系统镀膜后,在参考波长上总的透射率可近似地估计为

$$T = (0.97)^7 = 80.7\%.$$

这比没有经过敷膜处理的系统提高了约20%的透射能量,这是一个可观的改善,已能满足一般的光学系统对于减反射的要求。对于高性能的复杂的光学系统来说,剩余的反射损失尚嫌过高,同时有效的减反射的波长区域也不够宽广,因而发展了多层的减反射膜。它的基本类型是厚度分别为四分之一波长-二分之一波长-四分之一波长,即 $\lambda/4$ - $\lambda/2$ - $\lambda/4$ 的三层膜。在整个可见区波长范围内单面的反射损失可进一步减小到0.5%左右。7片平板玻璃系统的总的透射率可达

$$T = (0.99)^7 = 93\%.$$

这对于提高整个光学装置的性能和作用距离是有重要意义的。但由于可适用的薄膜材料种类的限制和薄膜蒸发过程中厚度及工艺参数监控的严格要求,增加了多层减反射膜制造的复杂程度,从而提高了多层减反射膜的生产成本。因而并不是任何光学装置都需要采用复杂的多层减反射膜,而是应该根据光学装置的总体要求,最经济地选择合适的减反射膜。有人对日本中高级照相机的标准镜头(相对孔径1.4,焦距50毫米)和广角镜头(相对孔径2,焦距35毫米)进行了剖析,发现在标准镜头的12个镀膜面上,只有5个表面敷有多层减反射膜,其余的都是单层膜,以降低成本。而对于价格比较昂贵

的广角镜头,在 14 个镀膜面上,除了一个曲率比较大的表面采用单层膜以外,其余的都是多层减反射膜,以获得优良的减反射的效果 (图 1-6).

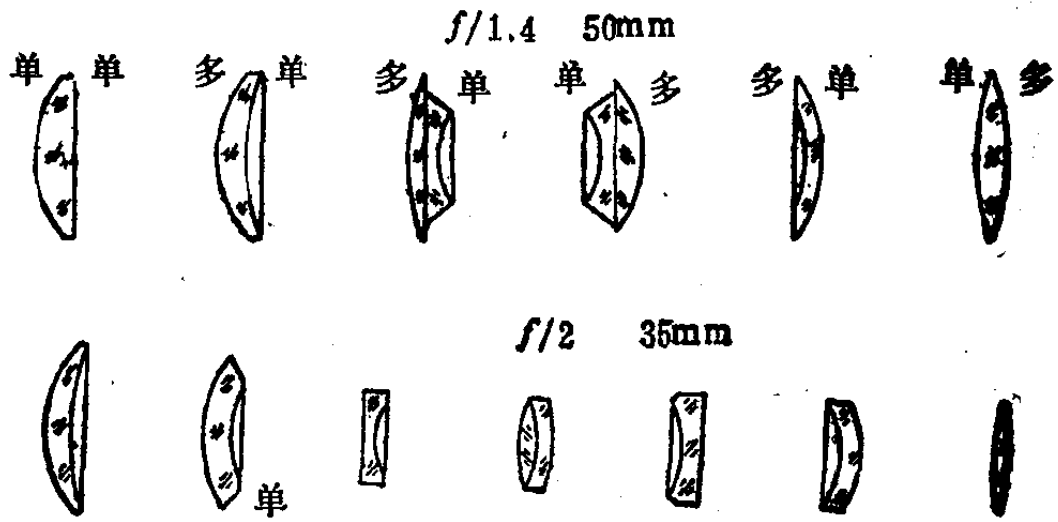


图 1-6

此外,有一些激光装置对减反射膜的性能提出了特殊的要求。例如激光陀螺仪要求在激光工作波长上把激光器端面上的反射、散射和吸收损耗减到最小,以保证熔石英平板玻璃两面镀膜后的透射率达 99.85%。又如坦克上的激光测距仪,其激光波长一般是 1.06 微米,在近红外区。用于目视瞄准的是可见光。考虑到结构紧凑、性能可靠等因素,通常采用同一个望远镜系统进行目视瞄准和激光测距。因此望远镜物镜要求对可见光和 1.06 微米双波段减反射。而在激光核聚变实验中,激光器辐射波长为 1.06 微米的光脉冲,转换成二倍频和三倍频波长 0.53 和 0.35 微米。因此系统中的 *KDP* 晶体池和聚焦透镜表面要求对 1.06、0.53 和 0.35 微米三个波段减反射。

减反射膜已经得到了广泛的应用,目前几乎没有一个光学装置是不经过减反射处理的。在所有的光学薄膜中,对技术光学的发展贡献最大的可能是减反射膜了。