

我所光学薄膜技术的进展

袁幼心

我所光学薄膜技术是在1953年开始建立，1955年首次制备成氟化镁增透膜、铝加硫化锌保护膜和铬半镀膜、铬电阻等。1956年开始建立多层膜制备技术。现就我所光学薄膜技术进展情况分述于下：

一、光学薄膜设计理论

光学薄膜设计的基本任务在于确定膜系的结构使之具有所要求的光谱特性。设计理论有分析和合成两种方法。分析方法乃是对给定了的多层膜系利用矩阵、递推、矢量等方法计算出光谱特性曲线，而合成方法则是对给定了的光谱特性要求合成出多层膜系的结构。我所在五十年代中期开始建立矩阵计算方法，六十年代中期以后，利用电子计算机，陆续编制了若干多层膜系计算程序。这些程序对我所许多光学工程镀膜的光性起了重要的分析作用。七十年代以后，开始光学薄膜自动设计的工作，初步建立了变尺度计算方法。由于多层光学薄膜的光谱特性为膜层参量的多峰值函数，优化法求得的极值往往是局部极值。国内同行们克服了这一缺点，提出基于随机投点基础上的统计试验法。这种方法原则上可以求出总极值，比较有效地对光学薄膜进行自动设计。最近几年来，国内这项工作又取得进展，把自动设计建立在负滤光片组合基础上。为克服滤光片间多次反射造成的困难，在滤光片间加入匹配层并用统计试验法定出匹配层的参量。负滤光片加匹配层构成合成膜系的初始结构，最后用阻尼最小二乘法完成膜系的全部设计工作。我所借鉴了这些成果，正在深入开展光学薄膜自动设计工作。同时根据光学薄膜自动设计取得的进展又正在进行光学薄膜制备时厚度连续修正工作以及光学薄膜光学常数的精确测量。

二、光学薄膜制备技术

我所制备光学薄膜基本上是采用真空镀膜。五十年代开始进行光学薄膜工作时，首先是建立了玻璃真空镀膜装置。在此经验基础上，六十年代才进入试制高真空多层光学镀膜机。目前国内已发展到能生产各种类型的镀膜机。最近，正在试制先进的箱式镀膜机。

光学薄膜制备技术主要指蒸发技术、监控技术及测量技术等。将大块膜料在真空加热汽化镀制成所期望的光学性质的薄膜，这就是蒸发技术。最早我所是采用电阻加热器。设计的蒸发源有丝源、舟源以及三氧化铝、石墨坩埚等。对于高熔点材料，电阻加热器很难将它蒸发，或者腐蚀加热器，或者膜材料易于分解。为了克服这些缺点，于是在七十年代初期，我所独立设计试制成功了直型电子枪蒸发源。这是蒸发技术的突破，使我所光学薄膜向前大大发展一步，在国内首次建立了硬膜技术。随后，离氧反应蒸发工艺又在我所试制成功，镀制

成了人们久已期望的二氧化钛优质光学薄膜。激光加热镀膜技术是很有发展前途的，我所业已成功进入实验室日常应用。光学薄膜的监控是指薄膜淀积时光学参量的测定，尤其是光学厚度。我所开始镀膜时是用人眼观察干涉颜色。这种方法适用于单层减反膜的监控。随后发展多层膜技术时就采用了光电极值法监控。极值法有直流和交流两种方法。我所曾先后试制成10周、33周、300周和1000周等各种光电控制放大器。我们也建立起了监控精度高的波长扫描法新技术，波长控制精度可达10埃。为了开展软X线真空紫外光学薄膜研究，正在进行精度更高的试验工作。七十年代中期，光学技术已发展到规整光学膜系不能满足要求的程度，促使光学薄膜工作者必须发展非规整膜系监控技术，也就是监控非 $\lambda/4$ 膜层厚度。我们已经初步建立起了膜层淀积时监控 R 、 T 值的双光路方法。这种控制方法，经过几年的实践，制备出了许多任意膜厚膜系。目前这项课题正在进行可在真空中测薄膜光谱分布曲线确定膜层监控误差建立膜层连续修正监控的工作。这项工作试验成功后，就可以大大提高光学薄膜制备的成品率。光学薄膜测量是指成膜后的光学参量的测定。它对于光学薄膜的制备工艺的改善，膜系设计以及薄膜本性的研究都是十分重要的。光学薄膜有两个重要的参量，一是折射率，另一个则是厚度。我们在开始镀膜时就进行了这两个参量的测试工作。目前我所已试制成功了阿贝折射率测定仪和等色序多光束干涉测厚仪。前者精度为0.5%左右，后者精度为15埃左右。目前我们正在进行紫外区光学薄膜光学常数的测定工作。

三、光学薄膜元件

薄膜光学的基础概念有势透射、两有效界面、等价折射率、匹配条件及缺位层等。光学薄膜技术正是逐步地应用这些概念设计制备了许多类型的光学薄膜元件。下面重点介绍一些光学薄膜元件：

1. 增透膜

推动光学技术的发展，增透膜是起最重要的作用。直到今天，就其生产的总量来说，仍是超过其他光学薄膜元件。初期，我们是镀制氟化镁单层增透膜。随后，我所的彩色电视、激光技术及光学跟踪等领域对减反光膜提出了更高的要求：宽带增透、色平衡、极低反射和抗激光损伤等，这就促使应用薄膜光学新概念去设计新膜系和发展新工艺去制备新膜层。当基底折射率低，单层增透效果差，于是可在其上先镀一层高折射率膜层，与基底组合为假想基底。假想基底的等价折射率高，容易满足单层增透条件。激光用的极低反射膜多是这样去实现的，水平达到小于0.1%。宽带增透和超宽带增透是一项难度大的工作。我们首先引用 $F-P$ 干涉器概念进行设计，把三层增透膜系视为 $F-P$ 干涉器，只要满足极大干涉条件，则 $T=1$ 。常用基底折射率变化很大，三层增透膜系内层膜折射率不易实现，于是应用等效对膜层概念，用两层膜代替内层膜去实现宽带增透。制备成的膜系水平， $R \leq 0.3\%$ ，带宽约2800埃。目前这项工作是进入创汇推广阶段。超宽带增透是应用非均匀膜层代替间隔层达到的，带宽可达4000埃。这反映我所镀膜工作对变折射率理论和应用已具有良好的开端。

2. 高反射膜

在光学薄膜中，高反射膜与上述的增透膜几乎同等重要。激光反射镜更是激光器件的关键元件。开始进行制备高反射膜是金属膜层或金属膜加介质膜。由于金属膜含有较大的吸收损失不可能获得高的反射率。于是在五十年代中期，我们就进行制备 $\lambda/4$ 高、低折射率交替组成的多层介质反射膜。这种高反射膜原则上可望达到100%的反射率。反射带的宽度决定于

高、低折射率的比值，受膜料折射率的限制，得到的带宽不够宽。因此，发展了一种展宽高反射带宽度的方法，就是采用叠加 $1:1 \lambda/4$ 堆两反射膜，或者叠加 $1:1$ 反射膜和 $1:2$ 堆反射膜，中间添加匹配层，达到展宽的高反射镜。现在我们又掌握了监控任意膜厚的方法，制备出任意厚度展宽的高反射镜的带宽是很宽的。 $R \approx 99\%$ 带宽为 4000 \AA 的高反射膜制备是不太困难的。

激光高反射膜的要求，一是反射率愈高愈好 ($99.9-99.99$)，二是抗激光损伤。满意地解决这两个问题是十分困难的。因激光用高反射膜实际上存在有光学损耗 (吸收和散射)，这就限制了极限反射率。为得到理想的激光高反射膜，我们就必须考虑激光在膜内驻波场强度的分布、膜层中吸收的分布以及膜层散射的分布等因素。这方面的工作还正在进行中，尤其是开展了多元膜料成膜机理制备紧密膜层的研究，以及多层膜示性技术的研究。

3. 干涉截止滤光片

截止滤光片有着广泛的应用，如大型光学跟踪仪器的分光镜、遥感仪器的滤光片以及激光分束器等。分长波通滤光片和短波通滤光片。确定滤光片的特性有三个参量：陡度、透过区的平均透过率及反射区的平均透过率。我所开始制备截止滤光片时，基本上仍是采用高低折射率交替的 $\lambda/4$ 膜系。以后，这种滤光片不能满足一些特殊的要求，一是截止带宽不够宽二是透射区透射率曲线波纹幅度很大。前者可用上述展宽反射带的办法解决，而后者则较难解决。为解决此问题，必须应用等价折射率概念，使通带内的等价折射率与基底折射率相近。有效的办法是在多层膜系的每一侧加镀匹配膜。我们利用电子计算机自动设计出陡度好宽透射宽反射的截止滤光片，同时应用我们建立起来的非规整膜系制备技术，能制备出陡度为 100 \AA 左右的 $4000-7000 \text{ \AA}$ 区 $T \geq 92 \sim 93\%$ ， $7000-10000 \text{ \AA}$ 区 $R \geq 99\%$ 截止滤光片。

4. 反红外宽透射带滤光片

这种滤光片是为特殊用途而设计制备的，一是为改善人造卫星上硅太阳池能源转换系数，二是为改善太阳模拟器上氙灯源的光谱分布。这种滤光片的设计思想不能局限于普通的两种材料的 $\lambda/4$ 堆膜系，理论上就满足不了反红外宽透射的带宽要求。获得宽透射的问题，理论上就是要找出周期性多层膜，使通带在膜系中出现的光谱的某些邻近反射带被抑制从而透射带增宽。我们所选择五个基元为单一周期，膜系为 $GA(ABCBA)^nM$ ，抑制第二、三级次反射带。得到的实验结果，可以做到 $0.4-1.0 \text{ \mu m}$ 区宽透射。

5. 窄带干涉滤光片

这种滤光片乃是法布里——珀洛干涉仪的结构形式。我所开始是镀金属——介质间隔层——金属滤光片。多层介质膜技术掌握后，便用多层介质镜代替金属层，发展为介质法布里珀洛滤光片。为提高对比度，矩形化的双半波滤光片也相继试制成功。根据理论分析，欲得到理想的窄带干涉滤光片，必须在制备工艺上使能获得吸收散射损失小的膜层。特征波长漂移也是令人头痛的。针对这些问题，我们做了一些电子显微镜横断面观察和封边的探讨的工作，因此，取得了从紫外到红外滤光片的稳定生产。近年来我们新试制成功圆形渐变滤光片，波长范围是 $0.4-1.1 \text{ \mu m}$ 和 $1.1-2.5 \text{ \mu m}$ 。这种滤光片的制备技术是较复杂的，但用途甚大是有发展前途的。

6. 特殊膜层

(1) 光栅铝膜

光栅刻划所需铝膜的要求是在每毫米刻划 1200 条线时不允许铝膜槽形出现任何缺陷，这对铝层质量就是要质密和无针孔。我们摸索的经验是铝膜的质密靠快速蒸发成膜和铝膜针孔

的减少靠火棉胶封玻璃基底。根据凝结机理，快速铝蒸汽在冷基底上容易形成多核凝结中心致使产生细小的均匀晶体结构。针孔产生的原因，根据大量实验的结果，主要来源于基底上的异物（空气中的微尘、棉花毛等），使用火棉胶就是产生清洁的玻璃表面。采取这两条措施，铝膜层基本满足刻划要求，但还须深入研究铝膜光性、结构与工艺的关系。

（2）中性变密膜

可见光中性变密膜是为大型光学跟踪仪器连续改变光强度用的。建立变密膜制备技术时缺乏资料，听说国外是将玻璃基底在固定狭缝上转动。我们分析，要在基底上得到变密膜有两条途径，可以是基底转动也可以是挡板转动。国外采用固定狭缝可能是得不到面蒸发源。我们由于解决了镍铬铁中性膜料的面蒸发源技术，便采用了简单易行的挡板转动，目前又添加了自控装置，变密膜的制备技术日臻完善。

（3） x 线真空紫外膜

本课题是七十年代后期空间光学技术激光技术迅速发展的结果而提出来的，国外还尚处于摸索研究阶段。我所是近年来才开展这方面的工作。初阶段试制 x 线滤光片，是无基底的铝膜，制备技术难度很大。下阶段将筹建多层制备技术。因为在 x 线真空紫外区大块材料的折射率都近于1，缺乏组成高、低折射率交替膜系的高反射率材料。如果设想的驻波模型适用的话，则将采用高、低折射率交替的多层金属层。 x 线真空紫外光学涂层是个新领域，将有许多新课题等待光学薄膜工作者去解决。