

光学膜层材料及其应用

本文叙述的是制备干涉膜的电介质膜层，高反射金属膜层和中性密度滤光片和太阳眼镜的半透明膜层的材料的研究。它证明：改进真空沉淀技术和处理，比如用电子轰击蒸发，在最高真空条件下和最高速率的膜层沉淀，氧反应蒸发和膜层沉淀后的紫外辐射，使膜层材料在光学应用上具有很大数量和质量的提高和改进。讨论了产生高透过率电介质膜层和高反射率金属膜层的某些重要因素，并叙述了适应于控制卫星和空间飞行器温度的膜层。

I 绪 言

目前，薄膜层广泛地应用在从紫外到红外的光学装置中并在各种卫星研制中起到重要的作用。例如他们的应用有：从紫外到远红外使用的高反射反射镜镀膜；提高前表面反射镜耐久性和效率的防护膜；光学和红外光学材料的单层和多层抗反射膜；析光器和中性密度膜层；对紫外，可见和红外的窄和宽带干涉滤光器，包括热反射滤波器，冷反射镜和激光器的多层电介质膜；控制卫星温度的膜层；提高太阳能转换器效率的膜层组合。配制这样膜层的普遍方法是采用高真空蒸发技术，而本文就将仅讨论蒸发膜层。

发展更好的光学镀膜是与新膜层材料的研制和改进沉淀技术紧密相关的，问题并不在于缺少理论上的膜层设计而在于缺乏相应的膜层材料，这除了所要求的光学特性外还要满足其它必需的要求，比如机械和化学的耐久性和对各种基底的良好附着力。只是到了最近，新的沉淀技术和处理，比如电子轰击蒸发，在超高真空条件下和极高速率情况下的膜层沉淀，在有氧情况下的蒸发，以及膜层沉淀后的紫外辐射，才极大地提高和改进了膜层材料在光学上的应用。

本文的目的是说明改进沉淀技术和沉淀参数的准确控制以便配制理想光学特性的膜层。

分别讨论下述几种应用：

1. 干涉镀膜的电介质膜层

2. 有表面镀膜和无表面镀膜的金属反射膜层

3. 吸收材料的半透明膜层

II 干涉镀膜的电介质膜层

电介质膜层最重要的光学特性是：高透明区，折射率和色散。对电介质膜层材料来说，高透明区域从紫外扩展到红外吸收带，而对半导体来说，它是从大于电子能带间隔的波长开始。许多电介质和半导体，在固体板中的一些波长范围内表明几乎没有吸收，可在蒸发膜层中显示出在同一范围内有值得注意的透射损失。这些损失是由于蒸发过程中杂质和分解作用造成的散射和吸收而引起的，并对某些膜层的应用来说是不允许的。例如，高能激光器的反射全电介质膜层的组合要求膜层在激光发射的任何波长都应无损失。另一方面，通过研究膜层聚焦激光光束的干涉，激光对于探测电介质和半导体膜层的辐射能量的少量损失是有用的工具。许多材料在厚度为1000埃时，要制备吸收率少于0.01%的电介质膜层是很困难的。这样一种吸收损失相当于大约吸收系数（厘米⁻¹）10，即高于玻璃，石英和其它光学和红外光学材料的。

在下面的章节中，将叙述严格控制产生低吸收膜层的参数。

A 最初材料的配制

配制被蒸发的材料对高质量光学镀膜的沉淀是重要的。在蒸发过程中，主要推荐采用真空烧结的或除气的材料或均匀密集的单晶体以避免气体的爆发。

B 高透明膜层的配制

发现：即使是相当稳定的材料，比如氟化物，也将同蒸发的坩锅起反应，并且这个反应也可能引起膜层在紫外中显示出吸收。如果要求在紫外中透过率高的膜层，最好采用白金坩锅蒸发冰晶石和氟化铅。引起沉淀膜层吸收的坩锅反应的可能性对氧化物甚至更大。对这些材料来说，也大有可能由于过热，特别是如果在高温下进行蒸发来获得高沉淀速率，而产生引起分解的吸收。

适用于克服这些问题的方法就是利用电子束加热蒸发。用这种技术，大量氧化物，比如 SiO_2 ， Al_2O_3 ， BeO ， ThO_2 和 ZrO_2 能沉淀为高透明，非分解的膜层。目前，10到20千伏和直到10千瓦的各种高功率商品电子枪非常适用于高熔点材料的蒸发。电子轰击蒸发的氧化物放在重的，最好是水冷的铜器部件的凹处。为了保证相当高和恒量蒸发速率，以及避免氧化物过热和分解，应采用直径至少为1.5—2厘米的离焦电子束。采用这种技术，在45厘米间隔以400埃/分钟的沉淀速率而产生的 SiO_2 和 Al_2O_3 膜层没有表现出可见和紫外的吸收。这对于用高聚焦电子束制造的膜层来说是不适用的。由于静电荷，用电子束蒸发时，电介质也会偶然出现一些问题。实际上，这也不是严重问题，因为大多数电介质在电子轰击的开始由于有二次电子发射，大概会失去它们的电荷，而在热起来以后由于传导，也会失去它们的电荷。

用激光束蒸发将在未来制造高纯度和低吸收膜层材料上是一有前途的技术。

制造高透明氧化物膜层，甚至把低氧化物或金属用作开始材料时，另一种技术是在

2×10^{-4} 和 5×10^{-6} 托之间的氧气压中反应蒸发。为了获得吸收很小的膜层，必须严格控制同时到达基底表面的蒸发分子和氧分子的比率。用这种技术，蒸发低氧化硅和氧化钛来制备高透明的氧化硅(SiO)和氧化钛(TiO)膜层。对于用氧化硅的蒸发来配制氧化硅(SiO)膜层来说，典型的沉淀参数是3—5埃/秒速率和 $7-9 \times 10^{-6}$ 托的氧压强。在这种技术中，另一重要因素是基底温度。在适度加热($50^\circ\text{C}-100^\circ\text{C}$)的基底上用上述沉淀参数配制的氧化硅膜层在可见和近紫外中是很透明的，但是以 300°C 的基底在同样条件下沉淀的膜层可见和紫外短波区域显示出很强的吸收。这是由于随着基底温度的升高而使沉淀的氧化硅吸氧效率降低的缘故。

在适度加热的基底上在强氧化蒸发条件下制造的氧化硅膜层在低于 $\lambda = 300$ 微米的远紫外中还呈现相当高的吸收，这长期以来限制了它们在铝前表面反射镜光学膜层和防护膜层的利用。目前，已经发现这种膜层最讨厌的紫外吸收可用紫外辐射来完全消除。图1是镀1800埃厚度的强氧化的氧化硅膜层的熔石英在空气中的透过率由于紫外辐射效应的例图。在 8×10^{-6} 托氧压时，以4.5埃/秒速率蒸发一氧化硅时沉淀它来制造这种膜层。在20厘米间隔用435瓦Hanovia石英水银灯以2小时的紫外处理消除许多最初很高的远紫外膜层吸收。而5小时的紫外辐射引起实际上与没镀硅酸的片一样的透过率。采用在铝上沉淀强氧化硅膜层的方法来获得同样结果。这使它可能产生高紫外反射的受良好防护的铝反射镜。用紫外处理所造成这种膜层在光学特性改变上还发现二种完全不同的结果：

(1) 结构变化：紫外辐射重新分布膜层沉淀期间吸收的氧，并且形成低紫外吸收的明确的氧化硅分子。

(2) 化学变化：空气或氧中的紫外辐射提高沉淀膜层的氧含量。

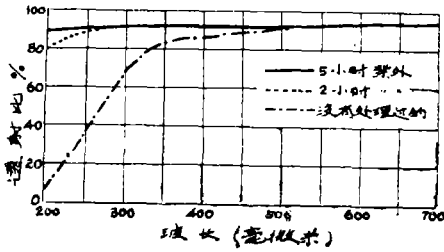


图1 紫外辐射对镀1800埃厚的氧化硅的熔氧化硅对可见和紫外透过的影响。

C 电介质膜层的折射率

电介质膜层的折射率主要取决于膜层结构，成份和密度。而它们是膜层沉淀期间的基底温度和剩余气压的函数

氧化物，如 Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 和 TiO_2 ，不论从大块和蒸发膜层形式来看都有倾向于非晶的形态。其它膜层材料能有不同结构的结晶而有不同的折射率。同时，晶体颗粒大小和颗粒与晶体本身的边界膜层不稠密的存

在将影响蒸发膜层的折射率。图2表示对0.2—1.6微米波长区域在40°C和300°C的基底上用电子轰击蒸发 Al_2O_3 膜层的折射率。在300°C产生的膜层的折射率高于40°C配制的膜层的折射率，由于在两种基底温度上膜层是非晶的，所以区别是不大。

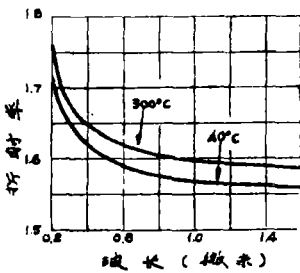


图2 用电子轰击制造蒸发的 Al_2O_3 的折射率。沉淀期间基底温度：40°C和300°C。

曲线清楚地表明： CeO_2 膜层折射率与基底温度有很大关系。把基底温度从50°C提高到350°C，冷凝膜层材料的折射率在 $\lambda = 550$ 毫微米时从2.12增加到2.42，而在 λ

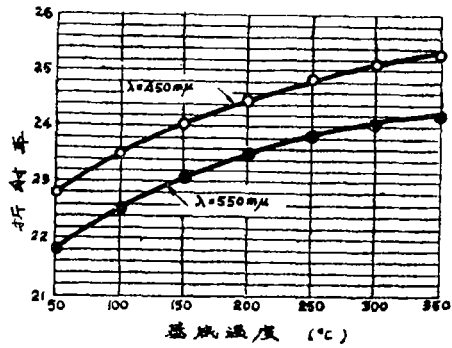


图3 表示基底温度对 $\lambda = 450$ 毫微米和 $\lambda = 550$ 毫微米的 CeO_2 膜层折射率的影响。

$\lambda = 450$ 毫微米时从2.28增加到2.53。发现冷凝的膜层在正个基底温度下是晶形的，并且显示出同一立方晶系结构，但它们的晶体尺寸随温度的升高而大大增加。所以低温基底膜层的较小密度和低数值折射率的主要原因是由于小晶体颗粒间的边界层密度小。当升高基底温度而使大晶体颗粒形成时，这些边界层消失。

对于冰结石和其它氧化物膜层来说，发现折射率同基底温度的依赖关系是不显著的。这里气压似乎是最主要的。图4表示的是40°C和100°C两种基底温度的蒸发期间，随剩余气压变化的冰晶石膜层的折射率。剩余气体分子的碰撞数增加时，冷凝膜层的折射率明显减少。由于冷凝期间碰撞和气体吸

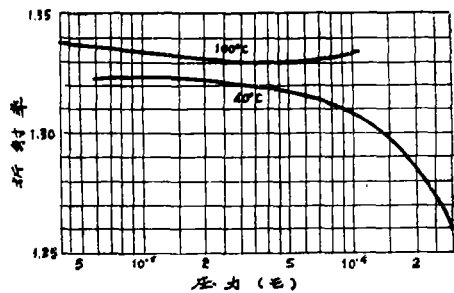


图4 蒸发期间随剩余压力变化的冰晶石膜层的折射率。

收的能量损失明显地引起膜层材料不稠密。

不同折射率的膜层的需要鼓励了介质混合物的研究，也就是将同时蒸发并产生各种各样折射率的膜层。它们的折射率符合混合物之比。其结果，报导出的 CeO_2-SiO_2

CeF₃-ZnS和CeO₂-CeF₃等混合物是令人鼓舞的。

在电介质膜层中经常遇见的另一个问题是结构和折射率的不均匀性。例如在室温基底上沉淀的冰晶石膜层中发现了这个问题。基底温度的增加改进了膜层材料的均匀性。另一方面，折射率的某种不均匀膜层对某些光学应用是相当有用的，并且已进行了对它们的控制制备的成功研究。

图5表示高透明度的光谱区和最常使用的电介质膜层材料的折射率的图解。本图表示：仅有很少高折射率膜层材料适用于紫外区。对在红外中使用的膜层来说，因为红外应用的膜层是很厚的，所以比如产生云状花

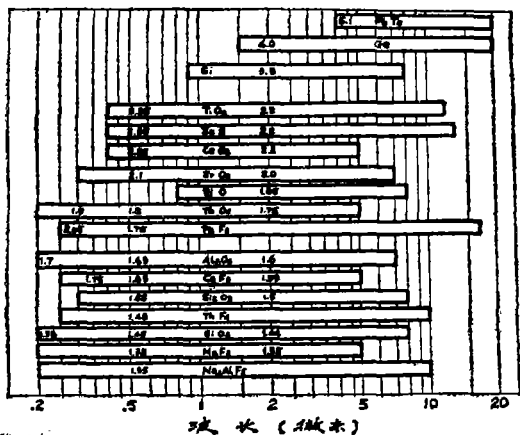


图5 电介质膜层的高透明度的光谱区和折射率。

纹和破裂的问题会出现。

D 多层膜的组合

由于采用所述的材料和技术，已实现对可见，红外和紫外区域的各种多层膜系统，虽然它们是复杂的。最近应用的几个例子将说明这种技术进展的情况。

图6说明对可见区域，在玻璃上镀三层抗反射膜的反射率，而图7表示的是在2—7微米的红外区域镀上三层抗反射膜的锗片的透射率。

膜层 $\lambda/4 - \lambda/2 - \lambda/4$ 厚度， $\lambda = 550$ 毫微米。

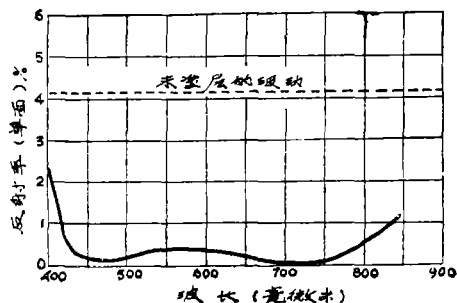


图6 在玻璃上用CeF₃+ZrO₂+MgF₂组成的三层抗反射膜层所测量的反射率。

其它例子是30或更多层的耐久“冷反射镜”膜层，图8，和镀在为太阳能电池盖片用的玻璃上的多层干涉膜（图9）。图9的所谓“蓝-红太阳反射膜”是由三种不同材料组

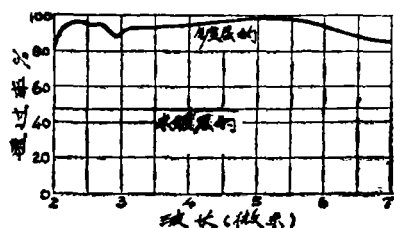


图7 镀Si+CeO₂+MgF₂三层抗反射膜层的锗片的透射率。全部膜层 $\lambda/4$ 厚度， $\lambda = 3.5$ 微米。

成45层膜，并且是为了降低太阳光电池的平衡温度并防止在外层空间的紫外破坏而排除太阳光谱的不需要部分。

前表面反射镜目前广泛应用到从极紫外

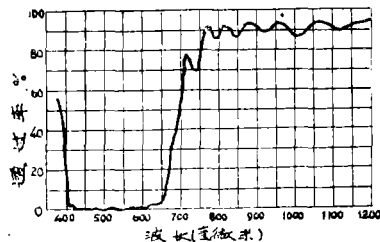


图8 由有氧条件下用蒸发TiO₂和SiO₂配制的交替的高和低折射率膜层所组成的冷反射镜的透射率。

到远红外的光学装置上。它们的反射率应该高，使在一个连续光谱区域内装置的能量损失很低。图10表示最常用的反射金属铝、银、金、铜、铯和铂的从紫外，可见到红外

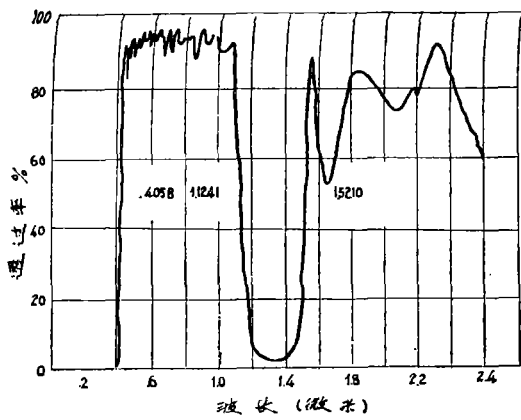


图9 兰红太阳能电池反射膜的透射率。
 ■ 有否表面镀膜的金属反射膜层

反射率。只有铝才是在全部有效区域有高反射率的膜层材料。其它反射金属的反射率在可见或紫外中迅速降低。因此只有铝适合做为在紫外要求高反射率的反射或光栅膜层材料。在红外区域，铝，银，金和铜反射几乎相等，在 $\lambda = 10$ 微米处反射率分别达到 98.9% 和 99.5%。在这个波长铯和铂反射率分别达到 97.6% 和 96.2%。由于银和铜容易丧失光泽，这二种材料是很少使用的，如果要求最佳化学稳定性的发射膜，则铯和铂膜层是最好的。

各种金属的反射膜反射率对沉淀参数的

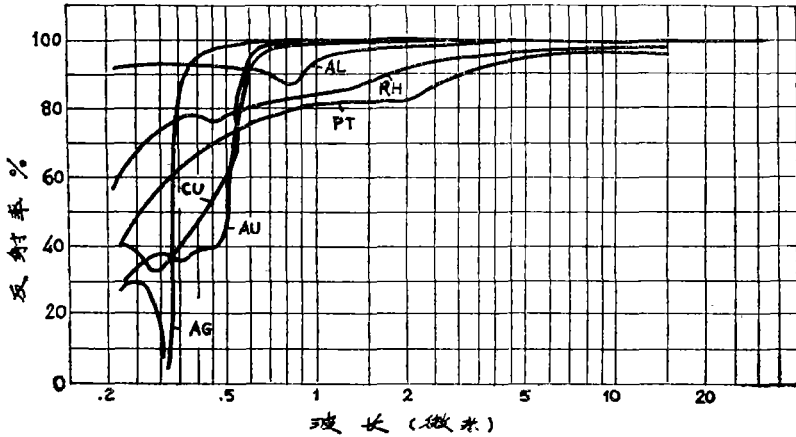


图10 从紫外到红外，新沉淀的铝，银，铜，铯和铂反射膜层的反射率。

影响可以相互之间大有区别。膜层冷凝期间的沉淀速率，压力和基低温度，以及材料的纯度一般需准确控制才能获得高反射率的膜层。

自从第二次世界大战结束后，增加大量研究课题，比如高温作用，空间天文研究，上层大气的研究和各种固态物理现象的研究，都利用真空紫外分光术。这就在少于 2000 埃波长范围采用对反射镜和光栅反射膜层引起了很大兴趣，并且在近几年内已取得改进反射膜在这个区域的效率研究有了重要进展。

对于在真空紫外中研究的全部膜层材料来说，已引起对铝的极大重视，因为在这个光谱区它比其它材料的反射率高。但是，在真空紫外，蒸发的铝的反射率主要受蒸发条件，材料纯度，基低温度以及接触空气期间

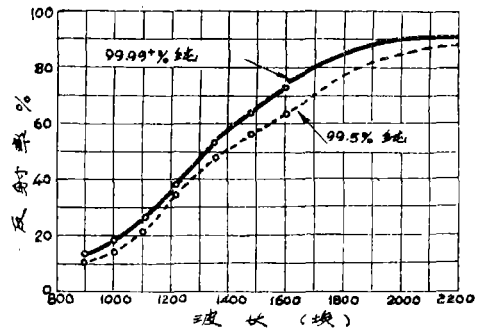


图11 铝纯度对真空紫外蒸发铝的反射率的影响。测量时膜层已形成24小时。

其表面形成氧化物的影响。图11—13表示铝的纯度，蒸发速度，压力和基低温度对接触空气的铝膜层真空紫外反射率的影响。

从出现的曲线来看，认为配制真空紫外高反射率的铝膜层的最佳条件是：高纯度的铝（99.99%），在低压下快速蒸发（500—

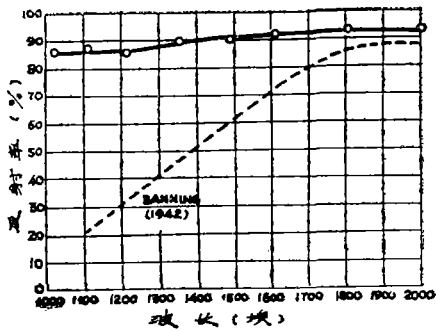


图12 蒸发速度和压力对真空紫外铝膜层的反射率的影响。测量时膜层已形成24小时。

1000 Å/秒的沉淀速率)和基底温度不高于50℃。在 10^{-5} 到 10^{-6} 托下快速蒸发来配制的膜层是同超高真空系统($P < 1 \times 10^{-8}$ 托)中配制的膜层一样不受氧和其它气体污染,并且它们的反射率不仅在真空紫外而且在可见和红外区比慢沉淀的高。这个对银和金膜层来说也是适用的。

与在长波情况下相反,蒸发的铝的真空紫外反射率主要受其表面氧化物膜层的形成的影响而降低。如果在最佳条件下配制的铝的反射率当沉淀后在真空中迅速测量时,它

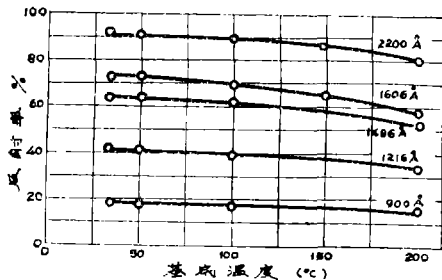


图13 沉淀期间基底温度对真空紫外铝膜层的反射率的影响。测量时膜层已形成2小时。

的反射率数值是比图11—13所示的数值大得多。图14表示的是波长从1000埃到2000埃的蒸发铝最初反射率。它对长于1026埃的全部波长来说高于86%。以前企图获得接触空气前的铝反射率的 Banning 反射曲线,如图14所示,以作为比较。区别是相当显著的,现在获得铝高反射率数值一定是取决于改进的

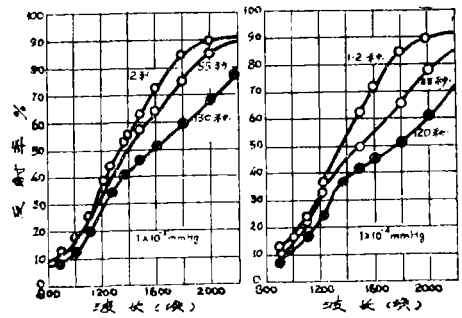


图14 无氧蒸发铝的反射率随波长 $\lambda = 1000$ 埃到 $\lambda = 2000$ Å的变化。

蒸发和测量技术。

图15表示在真空和在空气中老化对蒸发铝在三种不同波长的真空紫外反射率的影响。在最短波长, $\lambda = 1025$ 埃出现反射率的最快速衰减。在这个波长,在真空中压力少于 10^{-8} 托存贮8分钟使反射率从86%降到64%,而接触空气使反射率在2小时后降到大约21%。因为少于30-埃氧化物膜层的形成是造成反射率大大降低的原因。如图15,所以在真空紫外区的反射率测定显示出对研究铝的氧化之最灵敏的方法。这种方法同样适用于具有同样高灵敏度的其它材料,如

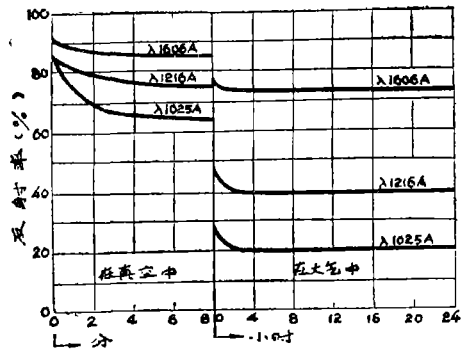


图15 在真空和在空气中老化对蒸发铝在三种不同波长的真空紫外反射率的影响。

钛、锆和钨。

为了计算在各种情况下铝上形成的氧化物膜层厚度,图16表示氧化物厚度对 $\lambda = 1216$ 埃和1026埃铝反射率的计算影响。这是用数字计算机采用 Berning 和 Berning 研究的一般膜层计算程序进行计算的,用

Hunter 发表的铝的光学常数和蒸发膜层材料上测定的 Al_2O_3 的光学常数来计算。当 $\lambda = 1026$ 埃时，少于15埃的氧化膜层的形成就能使铝反射镜反射率降到无氧数值的一半。

由于铝的氧化引起其反射率在真空紫外中迅速蜕化，必须利用非吸收防护膜层来防止氧化物形成。借助于镀 MgF_2 在新鲜的铝膜层上，能获得80%左右的反射率，并且保持

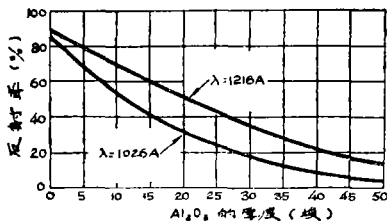


图16 各种厚度的氧化物膜层对铝在 $\lambda=1216$ 和1026埃时反射率的计算影响。

到 $\lambda = 1200$ 埃。为了获得高反射率，在完成铝的蒸发以后迅速镀以膜 MgF_2 膜层并使其至少以15埃/秒的速率沉淀。图17中，在1000埃到2000埃波长区域，把镀两种不同厚度的 MgF_2 膜层的蒸发铝的反射率同2个1天的和6个月的无保护铝膜层相比较。当250埃 MgF_2 镀在铝上时，在 $\lambda = 1216$ 埃获得83%的反射率。为了提高在1400埃波长以上的区域的反射率，应采用400埃到480埃厚的 MgF_2 膜层。 MgF_2 防护层防止铝上氧化物膜层的生长因而防止反射率降低。在一般空气中贮存6个月，镀 MgF_2 的铝反射镜其反射率没有明显降低。而在同一时间，无防护膜的铝的反射率，也就是在接触空气的第一天就已从最初数值87%降到38%，呈现出使反射率在 $\lambda = 1216$ 埃从38%又降到25%。根据图16的曲线，可以用一天中铝增长28埃氧化物膜层，而在1个月增长38埃氧化物膜层来解释这些反射率的降低。

产生高反射率铝膜层所需的所有特殊防护措施不必适用于其它材料。对铂来说，发现基底温度在沉淀期间对反射率有很大影响，而沉淀速率和压力在蒸发期间是不重要

的。在以10到15埃/秒沉淀速率和在 1×10^{-5} 托压力的300℃基底上的铂膜层在 $\lambda = 5500$ 埃可见光中表现出73.4%的反射率，而在同样条件下未加热基底上制备的膜层在同一波长大约只反射65%到67%。蒸发的铯和铷同样表现出它们的反射率同基底温度的依赖关系。当在300—350℃基底上蒸发时，这三种膜层材料表面没有粗糙的迹象，并且它们的从真空紫外到远红外的反射率比室温膜层的反射率高。铝和银膜层就不同，它们在这样高的温度沉淀时变得相当粗糙和漫射。没有什么缺陷的发展良好的晶体可能是高温基底上沉淀铂，铯和铷的高反射的原因。Jacobus 等人发表了感应加热蒸发铂的技术和制备真空紫外高反射率的铂膜层所需条件的讨论。目前制备能完全再现光学特性的铂，铯，铷膜层的最可靠方法是用电子束加热蒸发。用以前讨论的最佳条件下制备的这些材料膜层是非常耐久的，甚至在空气中延长存贮期间而反射率在真空紫外也没有表现出显著的变化。因此这些材料的膜层最适于作为反射标准。

基底温度的增加而使反射率增加的另一膜层材料是铬。这里，升高基底温度不仅改进晶体质量而且能降低所沉淀膜层和剩余气

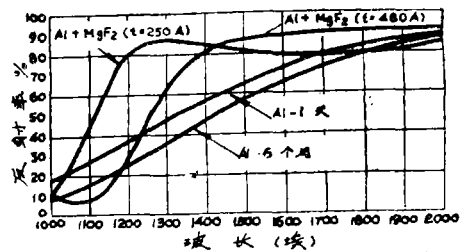


图17 两种不同厚度和有和没有 MgF_2 防护层的蒸发铝在从1000埃到2000埃的反射率。

体的作用。铬是最好的吸气剂，而加热基底可降低所蒸铬对剩余气体分子粘附的可能性。这样，在沉淀期间热基底上形成的氧化铬就减少，因而不致降低蒸发铬膜层的反射率。所以制备高反射率铬膜层的最重要因素

是：高沉淀速率，蒸发期间的低压力和加热的基底（300—400℃）。图18是 Idczak 研究的结果，表示在各种实验条件下配制的铬膜层随膜层厚度而变化的反射率。

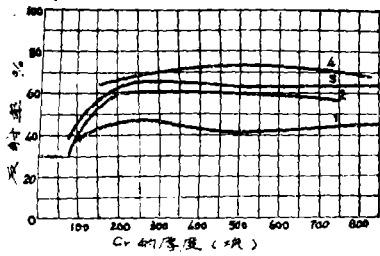


图18 在不同实验条件下获得的铬膜层的厚度同反射率的关系。

1. 没有使用断路器在室温在玻璃上沉淀的铬膜层。
2. 同1一样，但采用断路器。
3. 加热到360℃在玻璃上沉淀。
4. 在加热玻璃(360℃)上沉淀，玻璃预先脱气。

在以前的图中所示的某些曲线已证明蒸发的金属反射镜的可能光学应用。用蒸发金属和电介质膜层组成的膜层组合其最新应用是配制对卫星温度控制膜层。为这一目的，镀氧化硅膜层的铝蒸发膜层已起到很重大作用。具有小内功率消耗的轨道卫星的温度控制通过表面放射热辐射能的方法来平衡所吸收的太阳能，这样使仪表舱处于理想的温度。对一给定轨道来说，主要参数是表面的有效太阳吸收率 a 和它的半球发射率 e 之比。对球形卫星来说，这个 a/e 比应大约是 102，使卫星接近于室温。高度抛光的金属表面的 a/e 比为 4—10，就会使卫星很热以至损坏仪器。采用铝和表面膜层，表面膜层在太阳区域没有吸收性，而在远红外则有很强吸收性，很容易配制 a/e 数值很宽范围的表面。如果蒸发的铝镀上在太阳区域没有吸收而厚度大于 0.3 微米的表面膜层，其太阳吸收性实际上就与表面膜层厚度无关，并且取 $n = 1.5—1.6$ 的表面膜层，吸收则为 11.5%—12.0% 的数值。如果表面膜层在红外有很强的吸收带，镀膜的铝的热发射率就随表面膜层厚度的增加而增加。

目前在有氧情况下用氧化硅 SiO_2 蒸发而

产生的氧化硅膜层没有太阳吸收，但在 9—10 微米和 20—25 微米区域有很强的红外吸收带。图19表示的是镀 0.7, 1.4 和 3.6 微米厚的用强氧化硅膜层覆盖的蒸发铝的红外反射率。

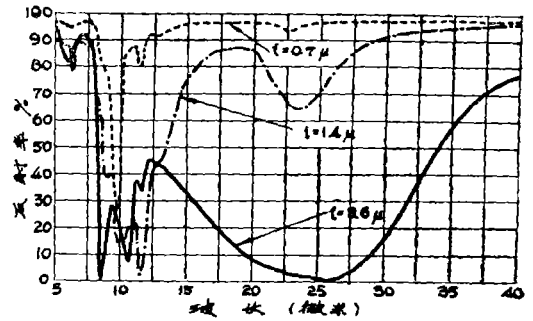


图19 镀0.7、1.4和3.6微米的强氧化硅膜层的蒸发铝的红外反射率。

可以看出，氧化硅厚度的增加大大的降低了镀氧化硅的铝的红外反射率，因此在没有改变其太阳吸收性的情况下增加它的热发射率。通过在蒸发铝的上面采用各种厚度的氧化硅膜层，能配制任何 a/e 比所要求的大约从 5—0.25 的表面。到目前，40 多种不同形状和尺寸的科学卫星都镀铝和氧化硅，并且膜层使它们的温度稳定在 10°—40℃ 的范围中是完全成功的。由于用电子轰击蒸发的 Al_2O_3 在太阳区也没有吸收性，但在红外就表现出很强的吸收带，所以用 $\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3$ 可获得同样结果。

VI 吸收材料的半透明膜层

吸收材料半透明膜层的二个主要光学应用是中性密度滤光片，太阳眼镜和保护眼睛用的其它装置的膜层，中性密度滤光片和太阳眼镜镀膜所需的透射特性的例子如图20所示，用金属和合金的高真空蒸发来配制各种密度的中性密度滤光片。配制方法同金属反射膜层沉淀所用的方法相同。最适于宽阔光谱区域的均匀透射率的膜层沉淀材料是铯，钛，inconel 和其它铬—镍合金。

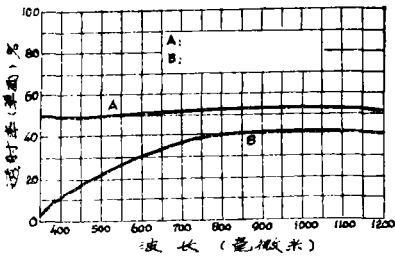


图2) 不同吸收特性的吸收材料半透明膜层。曲线A: 中性密度滤光片。
曲线B: 太阳眼镜膜层。

太阳眼镜膜层所需的透射率特性用氧化物和叫做金属陶瓷 (cermets) 的金属电介质混合物来实现。制造能再现光学特性的氧化物膜层里很困难的, 因为在蒸发期间分解

所引起的结构小变化就会极大影响沉淀膜层透射率特性。Cr—SiO金属陶瓷现在用于微电子领域里做为电阻的膜层材料, 10年来已做为太阳眼镜膜层。它们是最硬而耐久的, 并且具有理想的光学特性, 用闪击蒸发作为制备技术是很容易实现其再现性的。这种蒸发技术也适用于其它光学应用的金属陶瓷膜层的制备。

译自“The Journal of vacuum science and technology.”
Vol.4, No2,
March/April 1967.

(苏祿译、卢寿桐校)

(上接第63页)

节理所当然十分重要。反过来说, 调节部份要是过于复杂的话, 测定就不能简单化了。但是用专用测定装置可以简化操作规程, 所以可以在加工过程中一边测定透镜, 一边进行校正加工。

结尾:

利用计算机进行非球面测定的技术, 给非球面加工技术带来了巨大的贡献。能够在非球面透镜加工工艺过程中简单而又高精度

地测定透镜形状的技术, 意味着提高加工技术将能够制作高精度的镜头。而且当非球面透镜被应用到所有光学系统之后, 它的光学方面的性能将飞跃地发展, 光学技术将更上一层楼。

译自“Nikon Technical Journal”.
No9, 1975, P34.

(马元龙译, 王历、韩昌元校)