

# 薄膜及其对超紫外的应用

本文讨论无基底膜在超紫外区的透射比的特性，并为铝、钢、铋、锆、和某些有机材料的薄膜提供数据。一般来说，这些金属开始透过由电子本征损失确定的他们的临界波长的短小区，然后在最近的 X 射线边缘时达到最大的透明度；并且在其它 X 射线边缘之间达到透明度的较短波长区。这篇文章用实验室光谱和从火箭得来的太阳光谱说明他们的有序分类和消除长波长杂光的应用。

## 导 言

薄膜在超紫外 (xuv) 研究中具有许多用途。他们选择性的透过性能使得他们可作为消除摄谱仪中杂光的滤光片或有序分类的光学滤波器一样有价值。在他们的辅助下，单色散摄谱仪可用在其他方面要求多色散的地方。使用充气检波器，光学滤波器就起抑制气体和透过辐射的窗口的作用。

第一次研究薄有机膜透射性能问题的是莱尔德，他指出赛璐珞在至少为 450 埃时透光，而且即使在柔软的 X 射线中也是如此；布赖恩进行了从 1000 埃到 300 埃的定量测量，汤博勒恩和贝多测量了 260 埃和 80 埃之间的相同材料、硝基清漆的透射率。

许多年以前，任德就发现虽然钠和钾的薄膜对可见光完全不透过，但在紫外中透过率是高的。经过进一步研究他指出了，碱金属原子愈轻其透明度的位置愈向较短波长移动，譬如，锂透过 2050 埃的短小区。这种特性波长是金属中存在自由电荷的结果，于是派内斯基于每个原子具有的自由的电子数计算了不同金属的特性波长。然而，由于他们的化学活动性，碱金属只有在象由欧·布赖恩完成了的石英板间的夹层一样密封时才能

使用，因此他们不能做为超紫外的滤波器。

早就知道金和银分别在 5000 埃和 3200 埃的窄带中透过。虽然莱尔德报导了银透过 900 埃之短的波长，但坎菲尔德和哈斯的最近工作已说明为了透过 10% 以上的 1000 埃波长的入射辐射，此种膜厚必须小于 300 埃。

曾测量过支承在胺基清漆上的铝膜的汤布兰和贝尔从 80 埃到 320 埃首次测量了薄金属膜的超紫外透射率。 $L_1$  和  $L_{2,3}$  X 射线的边缘处于这个光谱段，但只有后者能被观察清楚。阿斯托因和沃达为支承在火棉胶上的铝膜做了从 130 埃到 750 埃的相同测量。沃尔克等人和拉斯吉测量了各种其他金属以及铝的超紫外透射率。

要想获得关于金属光学性能的全部知识必须确定光学常数  $n$  和  $k$ 。用测量若干入射角度时的折射率，或折射率和透射比的方法就可确定他们。亨特已报导了铝和钢对于大部分他们透过的光谱区域的数据，并且不久前他已获得锡、锆、硅和铍的类似的结果。根据这两个光学常数就有可能计算给定厚度的膜的透射率并包括全部干涉效应以及  $n$  和  $k$  是已知的氧化层产生的效应。

## Parlodion

Parlodion 是硝酸纤维素， $C_{12}H_{16}(NO_3)_4$  的商品名。硝基清漆是一种类似的物质。赛璐珞和哥罗酊是含某种茨酮的硝酸纤维素。把用戊基醋酸稀释的 Parlodion 溶液滴放入蒸馏水表面上就制备了 Parlodion 薄膜。这种膜特别薄，用反射光照射时不反光并发现它很均匀。

图 1 表示用干涉仪测定的 270 埃厚的 Parlodion 膜的透射率，还有一条由欧·布

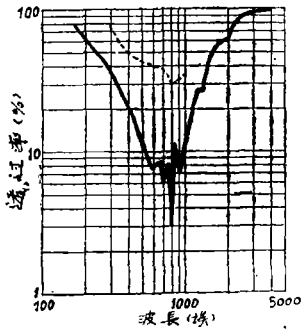


图1 270埃厚的Parlodion (实线)(硝酸纤维素)的透射率和由欧·布赖恩测定的100埃厚的赛璐珞的透射率。

赖恩测定的100埃厚的赛璐珞膜的透射率曲线。虽然考虑不同的厚度,但这两条曲线是合理一致的,都说明最大吸收接近800埃。对于Parlodion有若干其他吸收带的表示,而对于赛璐珞我们很可能发现用较多的波长数测定的相似的情况。这些膜可用作波长小于500埃的窗口和在网格上支承特别易碎的金属膜的底基片。

在100埃以下,Parlodion的透射率连续增长到碳的K边缘-44埃,而在此处透射率突然下降。在44埃的小区域,透射比又上升,但在N的K边缘31埃和O, 23埃时表现出不连续性。Mylar和Glyptal是透射率和X射线的薄窗口用的很相似的材料。他们的重要应用是象拜拉姆等人描述的例子那样的作为光子计数器的窗口材料和响应柔和X射线的电离室材料。

## 铝

到目前为止发现的最有用的超紫外透过的、可见和近紫外不通过的滤波器是薄的无基底的铝膜。800埃厚的膜对可见和近紫外辐射完全不透过而在837埃之短的波长,相当于电子本征损耗的临界波长时,刚开始透过。在短区域,透射率增大直达到170埃的 $L_{2,3}$ X射线边缘。

无基底的铝膜如下制备:把用空气溶胶擦洗干净的一块玻璃显微镜片镀上火棉胶

膜,再放入一真空蒸发器里。达到良好真空之后,拉动一条原先放入镀层里的导线就去掉火棉胶。另外,把品红作用剂薄膜蒸发到这块玻璃上。紧接着用产生最高折射率的铝的哈斯等人的方法蒸发铝。脱离真空之后,铝膜离开镜片浮动到水面。最后,在支承物上,例如一块有一个被复盖的孔的薄的抛光不锈钢板上得到铝膜。虽然小孔可不用支承物复盖,但直径大于2毫米的孔用最好的网格屏才能复盖严实。用这种方法可以制造大面积的滤光片。80英寸(31.5厘米)的网格屏和80%的透射率是满意的。要使小孔为最小必须细心清洁蒸发器里的一切器件,否则几天后就要有变化。这些孔在要被去掉的杂光具有低强度的应用中不重要,但当充分使用铝滤光片时甚至连最小的孔也不能有。

图2表示用这种方法制备的800埃厚的铝膜的透射率数据。若考虑不同的膜厚度并且根据拉斯吉的最近工作,这些数据与大于476埃波长的沃尔克等人的结果很一致。从300埃到150埃的数据与Zapron上的铝的汤布赖恩和贝尔的结果一致。没发现他们报导的关于170埃吸收边缘的长波长边的结构,恐怕由于他们的建议与Zapron基片的应用结合一起了。

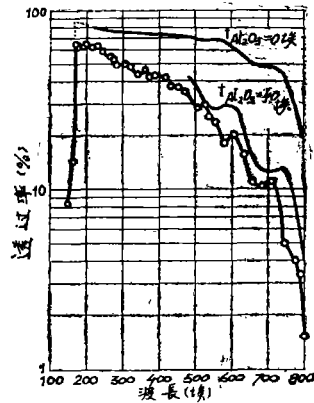


图2 800埃厚的无基底铝膜的透射比。包括在两面无氧化物和有40埃氧化物的情况下根据光学常数计算的铝的曲线的比较。

$L_{2,3}$  边缘的短波长边上, 铝的透射率很快下降, 在 150 埃达到一个约缩小因数 8 的值。当波长小于 150 埃时, 汤布赖恩和贝儿的测量值说明透射率缩减还要多, 近 130 埃达到最小值。在这个波长以下, 透射率开始慢慢上升并且对于小于 80 埃的波长, 这种滤光片又变成有用的。

图 2 所示的最小的近 500 埃、580 埃和 660 埃厚的膜的透射率曲线的起伏特性是真实的并且类似于沃克尔等人数据表示的起伏特性。这是因为在铝表面出现的氧化层增强干涉效应造成的。亨特计算了无氧化层的和每个面有 40 埃厚的氧化层的 800 埃厚的铝膜的透射率证明了这点。如图 2 所示, 对于每面上有 40 埃厚的氧化物的情况, 计算的曲线完全一致地复制测量的曲线。因此, 氧化物构成铝滤光片的大部分不透明体, 特别是对于它的透射带的长波长末端。到目前为止, 还不可能生产无氧化层的铝滤光片。

## 钢

首次研究无基底钢膜的是沃尔克等人, 他发现了 800 埃厚的膜在波长小于 1120 埃时开始透过, 在 775 埃时达到 17% 的最大透射比, 而在 730 埃时突然下降到 0.3%。长波长的透射比极限与电子本征损耗确定的临界波长一致。

已发现, 在象铝一样的情况下, 用蒸发到品红或碘化钠上的方法难以制备无基底的钢膜; 这种膜在水中不会浮离。然而, 卡彭特和柯乔为制备无基底铝膜而使用的糖的悬浮溶液证明了可作为满意的作用剂。钢从约  $5 \times 10^{-8}$  托的真空中钨舟在约 3 秒钟内蒸发。图 3 表示两层钢膜的透射率的曲线。在 1120 埃以下透射率迅速增高, 波长小于 900 埃时处于水平, 而波长小于 760 埃时突然下降。这种波长与按照桑德斯特罗姆的波长约为 780 埃的  $N_{4,5}$  边缘相结合。

蒂尔福德使用真空电火源和希尔格尔的擦地倾角的 3 米的光谱照片研究了无基底钢

膜滤光片的应用。从 750 埃到 120 埃没探测出透射辐射, 但是, 再往短波区, 发现钢膜变成透明。这个范围大概扩展到 15 埃的  $N_{2,3}$  边缘。布莱克等人分别在 443 埃和 67 埃测得 1560 埃厚的膜的 19.5% 和 37% 的透射率值。

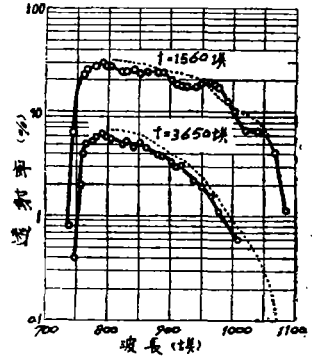


图 3 测得的钢膜的透射率和根据光学常数计算的曲线(虚线)

钢膜的透射率依赖蒸发条件和其它因素。譬如, 虽然沃尔克等人报导的那些膜只有一半厚, 但他们的透射率相当低于图 5 所示的对于完整波长区域的透射率。和铝的情形不同, 钢的表面层有一点点吸收或无吸收。根据图 3 所示的被测曲线和在假设无吸收表面层前提下用亨特确定的光学常数的计算值的虚线之间相一致, 可看到这点。这点和钢膜随着使用期限而无透射率的损失是一致的。在较薄的测量膜中, 可观察由内反射产生的干涉效应, 但在较厚膜中的干涉效应太小。因为在计算的曲线中没出现这些起伏, 所以不知其原因。在忽略吸收的情况下, 更改指数的表面层可能产生这些起伏。

这种钢膜滤光片对于透过铝不通过的 750 埃到 1000 埃的波长区有效。另外, 看来从 120 埃到较短的波长, 铝不通过的整个 80 埃到 120 埃的区域是有效的。它对于可见和近紫外辐射全不透过。

## 铋

把铋蒸发到事先用真空蒸发法镀上偏磷酸钠的玻璃基片上就制备了铋膜。他们易浮离并且相当强烈。图 4 表示测得的透射率的

## 锆

值。虽然派内斯给出了临界波长是 950 埃，但在 750 埃以上无透射率被探测。在这个波长以下发现了 950 埃厚的膜的透射率迅速上升，在 520 埃时达到 28% 的峰值。对于较短波长，在 505 埃有一个达到最小值的锐点大概与  $O_{4.5}$  边缘的吸收有联系。这种识别不肯定，因为考乔伊斯计算的值是 370 埃而桑德斯特罗姆计算的值是 413 埃彼此不同，并且与测量值也不相同。

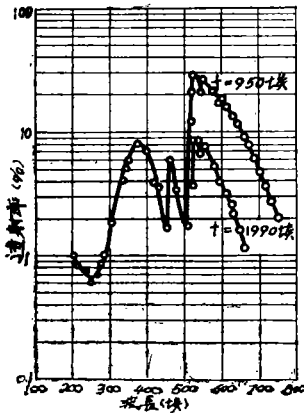


图 4 测量的无基底铋膜的透射率

这些计算值给出  $P_{2,3}$  边缘的波长分别为 886 和 1305 埃； $O_{2,3}$  的边缘分别为 122 埃和 129 埃。没确定  $P_1$  边缘的值，但由于  $P_{2,3}$  和  $O_{2,3}$  边缘远离上述区域，并且在 520 埃时突然开始吸收，这是该透射率曲线最显著的特点，因此看来有理由把 520 埃归于  $O_{4.5}$  边缘。该透射率曲线的两个另外的峰值处于未鉴定的 470 埃和 380 埃。蒂尔福德用摄影法证实了它们的存在。

铋的现在的结果与沃尔克等人的结果不完全一致。虽然其厚度约相同，但他们膜的透过很小。他们报导在波长小于 700 埃时开始透过，在 500 埃时达到峰值 2.5% 而在较短波长时迅速下降。

铋膜似乎可能作为特殊用途滤光片使用。由于峰值透射率降到接近 HeI 的共振线 (584 埃)，因此可用铋膜隔离这条线，他们还用于有序分类。至今在波长小于 200 埃的范围内还没进行测量。

制备无基底锆膜有两种方法。第一种方法，用蒸发法把锆镀在先用真空蒸发法镀上偏磷酸钠的玻璃基片上，并且锆在普通情况下在蒸馏水表面上浮离。第二种方法，把一块很好的网格屏浸渍到一种糖的悬浮溶液里，然后允许排水 20 分钟。表面张力足以维持网格跨接带溶液的孔，而在蒸发前持续 3、4 小时的真空，这些孔保持跨接。锆蒸发到这种“液态”基片上。当放入蒸馏水中时，锆膜在几秒中放松，采到另一个网格上并从水面脱离。同其中任意一种方法制备的膜都具有相同的透射率性能。图 5 表示两种不同厚度的锆膜的透射率数据。透射率从临界波长 730 埃增大，而对于 700 埃的厚度，在 430 埃时达到峰值 60%。对于较短波长存在与  $M_{4,8}$  边缘相关的急剧下降。在 380 埃达到最小透射率。对于较短波长，透射率在 290 埃再次上升，对于 700 埃厚的膜达到最大的 45%，然后在 140 埃降到最小。对于较短波长，透射率再次增大，可假定升到桑道斯特罗姆报导的处于 105 埃的  $M_3$  边缘。

虽然锆膜在红外和红色波段透过，但这并没有限制他们作为超紫外滤光片的应用，因为 Schumann 型的照相底片对绿色的和较长波长不敏感。他们比在波长小于 170 埃时具有很好透过的铝优越。有一个易碎的缺点，因此处理时要小心。虽然铝膜能容易延伸一个直径为 6 毫米的孔，但在这种情况下的锆绝对需要一个良好的网格。

## 硅

由于硅这种材料不易蒸发并且非常易碎，在浮动过程时常常粉碎成小碎片，对制备无基底硅膜造成了很大的困难。发现最好的作用剂是 Victawet，将它涂在玻璃基片的表面上，擦至无可见的痕量保留。用电子束加热法蒸发硅。硅膜在蒸馏水中浮离然后拾取到良好的网格上。

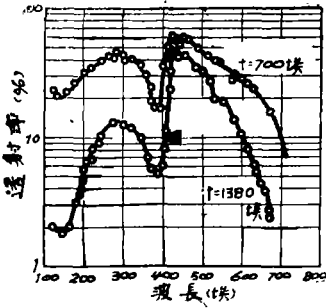


图5 测得的无基底铍膜的透射率

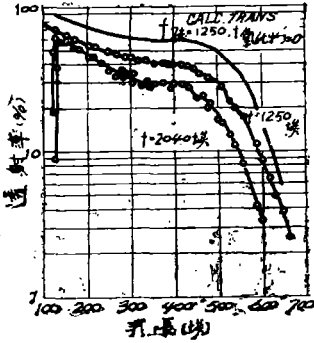


图6 测得的无基底硅膜的透射率和根据光学常数计算的曲线

图6表示两种厚度的硅膜的透射率数据。在小于临界波长700埃时透射率开始迅速上升，在约400埃以下不动，然后逐渐上升到约130埃时的峰值，对于1250埃厚的膜具有70%的透射率。在130埃的透射率短区域的突然下降是由 $L_{2,3}$ 吸收边缘造成的。

包含在图7中的是用亨特测定的光学常数计算的1250埃厚的无氧化层的硅膜的曲线。可见大概由氧化层造成的表面吸收导致从1.4到2因数范围的透射率损耗。

## 摘要

图7中是想要以图解形式总结可制备为薄膜的若干金属的透光性能。它是从许多资料中汇集成的，只起指导和鞭策今后工作的作用。箭头指示派内斯给定的临界波长的位置。虚线提出未经实验证实的可能的趋向。实线表示吸收时观察到的各种X射线边缘的位置而折线表示桑德斯特罗姆计算的边缘。

铍应是最有用的滤光片，因为在可见和

近紫外区它不透光而从其临界波长650埃，一直到110埃处的K边缘都透光。汤布赖恩和比德用铍薄膜在210埃到60埃范围慢慢蒸发到Zapon上的方法研究了吸收；拉斯特奇测量了迅速蒸发到铝膜上的铍的透射率，并用纠正铝的透射率的方法获得了铍的透射率的值。报导了约为875埃厚的铍膜在240埃时透射率是82%。拉斯特奇的实验方法排除在近K边缘处测定铍的透射率的可能性，因为铝在这个区域一点也不透光。拉斯特奇和汤布赖恩数据之间缺少重合，因此比德很难做比较；然而肯定铍从约600埃到110埃透光具有象K边缘达到的一样很高的值。

铍薄膜难于处理。不管汤布赖恩和比德还是拉斯特奇都在另一种金属材料的膜上制备铍膜。美国海军研究实验室要制备无基底铍膜的企图未成功。由于浮离品红到水上时，铍膜粉碎成小片并卷起，因此似乎他们具有大的应力。

初看硼膜似乎甚至于比铍膜有用，然而在海军研究实验室蒸发到玻璃上的硼在黄色和红色波段表现了很高的透射比。而且，这种材料特别难迅速蒸发并且在低压下制备良好膜必须需要两个条件。

萨姆森和凯恩斯最近测定了碳膜的透射

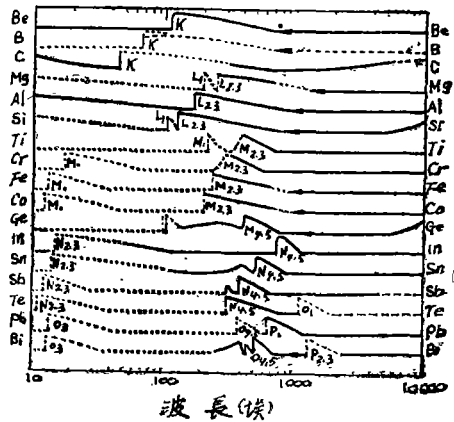
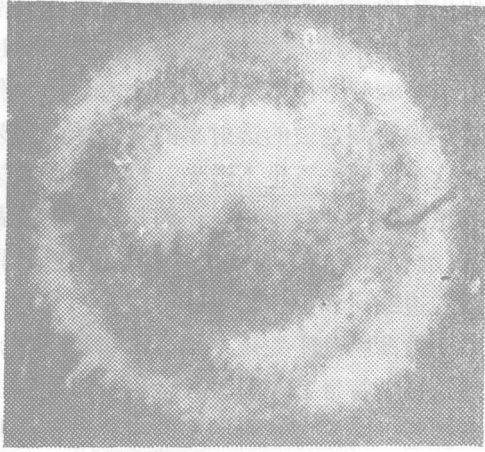


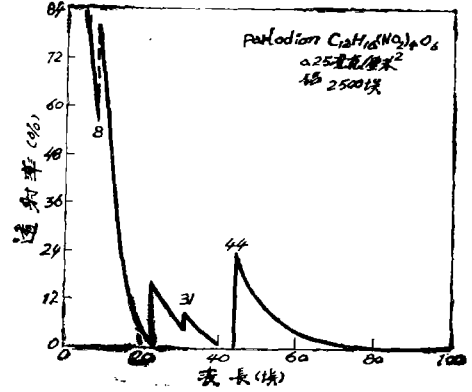
图7 大部分能制成薄膜的若干材料的透射率性能的简略图形。X射线边缘以梯级表示，箭头表示派内斯计算的临界波长；虚线部分指示无数字的区域。

率。他们发现270埃厚的膜的透射率从1000埃到500埃非常低，然后开始增大，在300埃（测定的最短波长）时达到约55%。该透射率继续增到44埃的K边缘。然而，这种膜从1000

埃一直到可见波段透过辐射；对于钨灯的可见辐射其透射率是47%。通常这种厚度的碳膜是不用在照相胶卷，而他们可用在遮盖波长大于并等于1300埃的光电探测器。



(a)



(b)

图9 (a) 1960年4月9日用针孔相机获得的太阳X射线的图象。在曝光时相机绕着地球太阳轴前后旋转造成图象在方位上的拖影。(b) 用于遮盖X射线相机孔径的薄膜的透过特性。根据制作滤光片材料的原子吸收系数计算了透过。

克罗格和汤布赖恩测量了蒸发到 Zapon 上从230埃到775埃的镁膜的吸收。由于亨特能够采用临界角技术测量蒸发到玻璃上的从260埃到1200埃的镁膜的折射率，很清楚镁膜从约250埃的 $L_{2,3}$ 边缘到约1200埃透过。镁不能从基片浮到水面上，因为由于金属镁能与水起作用而很快变成氧化镁。

拉斯特奇等人测量了钛、锶和碲的透射率，最近拉斯特奇也进行了测量。图7中标绘的是后者的数据，根据克罗格和汤布赖恩的工作获得铬、铁和钴的数据，而海军研究实验室和国家标准局共同获得锡的数据。沃尔克已经研究了铅膜的透射比。

## 应用

无基底膜滤光片的主要应用与使用宇宙飞船摄影光谱照片的太阳超紫外光谱学有关。这工作较困难，因为太阳的长波长辐射比超紫外强许多数量级，譬如，对于波长大于1000埃的总的太阳强度大约比这种波长的

总的短区域大 $10^6$ ，因此必须完全消除长波区域，以避免光谱的超紫外部分被杂光淹没，用双色散光谱仪就可以做到这点，但他们的设计有困难。由于许多反射表面的原故，他们受人射光的限制并且速度低。使用具有单个色散光谱仪的无基底铝滤波器的结果是完全消除长波杂光。

图8\*表示该滤波器的两种应用。中间光谱是由奥斯汀使用于1963年5月10日在Aerobee-150飞船上飞行的一个小的掠入射光谱仪获得的，其滤波器直接放在狭缝的前面。上方和下方表示的是由珀塞尔等人获得的太阳的单色图象组成的光谱。用一个简单的凹光栅的正常入射角的光谱仪，它具有来自太阳的直接射到光栅上的平行光。支持在80英寸(31.5厘米)网格上的薄铝膜放置在照片前约1厘米处。不用滤波器，结果将只是浓密的雾。在晒照片时调整了掠入射光

\* 因图复制后模糊不清省略

谱的色散以匹配普遍入射系统的线性色散。在 He II, 304埃发射线及若干其他线中可看到太阳盘。在 He II, 304埃看到的不太强烈的地方是工作区, 关于这种数据的太阳盘上有 6 个工作区。第二个突出的太阳图象在

257 埃处, 它是几条线的混合。在这两个图象之间可能看到由 284 埃的 Fe XV 线产生的第三个图象。在这条发射线中只反映出工作区, 而没反映太阳盘。

相当 5890埃的 NaD 线的 Fe XVI 发射线

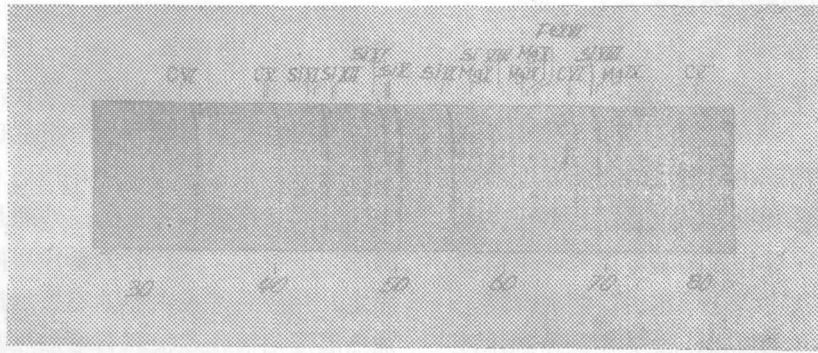


图10 美国海军研究实验室在1963年 8 月20日用一个2400条线毫米光栅拍摄的太阳的柔软的 X射线的 spectra。

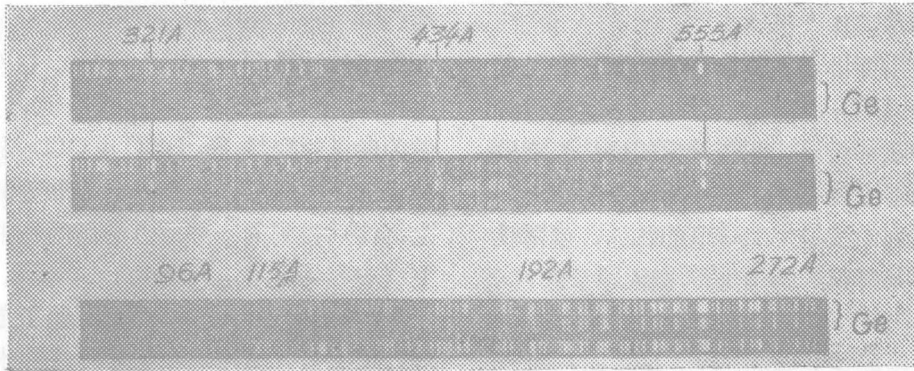


图11 使用和不使用锗滤光片的真空火花的光谱。曝光时间 (分) 从大到小: 1, 9, 3, 1, 9, 3, 12, 3, 3/4。

中的相同的工作区在 335 埃时也是可见的, 结论是, 这种大量失去铁原子的辐射只来自处于放电温度约为  $10^6$  K 的工作区。

图 9 (a) 表示薄膜滤光片的另一种应用。这是布莱克等人在 1960 年 4 月 19 日用一个针孔相机获得的太阳的 X 射线的图象。针孔用一层 Parlodion 和 2500 埃的铝的合成膜复盖。在这种情况下, 铝起消除可见和近紫外光的作用而 Parlodion 吸收 837—170 埃由铝透过的长波长区。图 9 (b) 中复制的最后的透射比曲线表示这个图象主要由 10—80 埃的柔和 X 射线产生。工作区强烈地发射, 当仪器围绕着太阳的方向旋转时, 火箭的进动使他

们形成电弧。

图10表示奥斯汀等人使用与图 8 相同的掠入射仪器拍摄的从 33 埃到 80 埃的太阳的光谱。这说明使用薄的铝滤光片使得有可能很好地把简单的掠入射光谱仪应用到柔和的 X 射线区域而不遭受杂光引起的雾的危险。C VI 33.7 埃的拉曼  $\alpha$  线具有特殊兴趣, 这是至今在太阳辐射中拍摄的最短波长的线。

在飞船上还没有使用锗和硅的滤光片, 因为当飞船上升时, 迅速抽空仪器而造成压力差和飞船马达的振动使它们易破碎。他们

(下转第 40 页)

跟踪误差，用本系统的参量表示误差如下：

$$\theta \varepsilon = 10^{-4} \times \dot{\theta} + 2 \times 10^{-4} \ddot{\theta} \dots \dots (1)$$

其中 $\theta'$ 和 $\theta''$ 分别是瞄准线的角速度和角加速度（图7）。

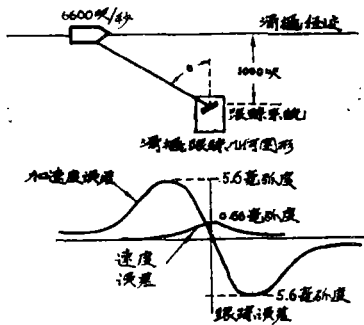


图7 滑撬跟踪几何图形和跟踪误差曲线

- $\theta$ 最大值=6.6弧度/秒
- $\dot{\theta}$ 最大值=28.3弧度/秒<sup>2</sup>
- $\varepsilon$ 最大值=5.6毫弧度

一个以6马赫速度运动的靶在1000呎处产生56毫弧度的峰值误差。注意速度和加速度峰值误差不同时发生，而加速度误差在两个方面摆动。如上所述，这光学视场必须有足够的宽度才能在偏移时使系统能看到逆向

反射器。形成光束的望远镜发散激光束约15毫弧度以便在所有条件下逆向反射器总是被照明。

## 跟踪结果

系统的静态精度是25毫微弧度均方根值，动态精度用方程(1)表示。在系统运到霍洛曼空军基地之前，在威尔兹姆(Walthem)莫斯(MoZZ)实验时静态和动态精度被证实。距离运输车大约60呎的地方使小逆向反射镜在5呎圆环上旋转来模拟瞄准线角加速度，以此来测量系统的动态性能。这逆向反射器可以手动摆动加速度，相当于滑撬以3马赫的速度运转。实验结果其峰值误差比1毫弧度稍多一点。由于 $\dot{\theta}$ 与滑撬速度平方成正比，这个跟踪器的性能与预计的误差是相一致的。

译自“J. SMPTE”Vol. 78, No. 1, P 26.

1969.

(上接第55页)

制作实验室仪器的有用的滤波器，然而这种滤波器的偶然失败并不危害实验。

图12\*中由蒂尔福德拍摄的真空火花的光谱说明硅滤光片的应用。每对的上方都是用1200埃厚的硅膜产生的。这说明硅在有序分类中 useful。当波长大于686埃时放入硅滤光片时只出现第二级线，而从550埃到686埃第一级线相对于第二级线大大减弱。在上方光谱，清楚地看到在130埃时尖锐切断。原

先的板说明了在49埃硅再次透过，但至今还没做过特别短波长时的透射比的定量测量。

译自“Applied Optics”

Vol. 4, No. 8, August,  
1965, P891.

〔于和平译、林开华校〕

\* 因图复制后模糊不清省略