

高空探测火箭 应用的旋转楔形滤光片光度计

摘要

本文描述扫描光度计，它采用旋转楔形干涉滤光片作为在 6300 \AA 附近波长扫描元件。给出滤光片制备的详细说明，着重在制备期间应有位置波长控制方法。其次，简单地描述了完整的光度计，并且介绍了该光度计在极光探测火箭飞行上应用的一些结果。

绪言

在高层大气中弱光源，如空中辉光发射和低强度极光，通常使用高灵敏度扫描或倾斜滤光片光度计由地面正常地监控。

对高空探测火箭来说必须使用固定的滤光片光度计。它们对在背景发射中的变化一般不予校正，但其在极光区里却成问题。为此，挪威防护研究公司试制出一种以旋转楔形滤光片为基础小型的，简单又可靠的扫描光度计。

鉴于特殊的用途，窄带楔形滤光片市场上买不到的，在挪威防护研究公司努力地制备楔形滤光片，这样简单地通过旋转楔形滤光片给出有关波段扫描。这将保证光度计简单和牢固的安装，实质上它是火箭运载的仪器，这台仪器的波长分辨率是比艾逊和瑞塞尔所介绍的窄带光度计的稍微低，如同将要示出一样。

本文主要部分是涉及楔形滤光片的制备，包括所需要的复杂的监控技术。同时评论光度计的原理，并在文章的最后部分简单

地论述探测火箭在进入北极的初步结果。在附录中，解释本文所采用的术语。

圆楔形滤光片的设计

圆楔形滤光片(CWF)由用光学树脂胶合在一起的二个环形玻璃环组成。其中一个的(复盖)表面上由高低折射率交替物质十七层膜形成的滤光片结构。在淀积时这些膜层的厚度精确地控制如同下述。

几何结构，滤光片理论

简单的三级次法布里—伯罗干涉滤光片，由涂有二种介质反射膜层的玻璃基底组成。位于这些膜层之间的是在特定的波长点有三个半波光学厚度的间隔层(中间层)。反射镜的膜层由四分之一波长光学厚度高低折射率交替材料组成。对一定波长来说，滤光片的作用就像这些膜层不存在，并且透射率是高的，对于其它波长，滤光片起反射镜的作用。结果在间隔层等于三个半波的波长周围存在一定的透射带。透射带的宽度由二个相同反射镜膜层中半波长的数目，间隔层半波长的数目及交替膜层材料的选择来确定。对于十七层膜组成的滤光片(硫化锌和冰晶石组成的二个八层反射介质膜的间隔层是三个半波的硫化锌)在中心波长为 6300 \AA 理论带宽是 0.24% 或是 15 \AA 。

显然，假若滤光片的所有十七层膜都作成楔形，那么结果可变的楔形滤光片无论在那一点都具有同样的相对带宽，而波长的跨

度与楔率（膜层厚度最大和最小之间的比）成比例。然而，在滤光片的结构上正适宜当前的情况，即用二个（相对的）中间夹有半波长的间隔层的宽带反射镜时，显然，最关键层是间隔层。因此，另一种可能解决楔形滤光片的途径是存在的。

图1表示出这种类似楔形滤光片三点上的计算的透射率曲线。在这里，有厚度不变化的八层介质反射膜，但中间层的厚度是从5.8到6.0四分之一波长变化的。从这图中清楚地看出，对于目前的应用，只要是由控制方法改变中间层厚度，就可给出所要求的、形状不变的滤光片。另外，图中示出，间隔层的厚度与滤光片峰值波长之间的线性关系。

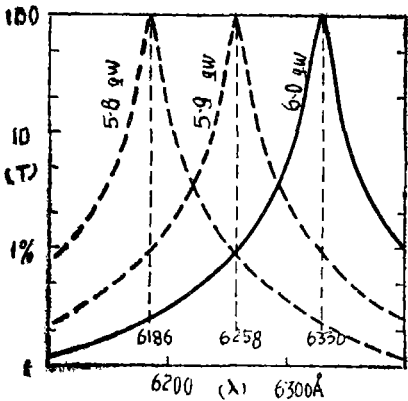


图1 在不改变反射板厚度时，滤光的中心波长与带宽的变化

下一步在于把这种楔形的结构变成环形的楔形几何形状。合成的滤光片是由一块带有八层反射膜系的玻璃基底组成，这些膜层均匀地淀积在主玻璃的整个表面上，它们是由以直线地沿着圆周从最小到最大厚度再回到最小变化的中间层来隔开的。在理论上，结果是滤光片在直径周围完全对称。然而，在生产类似现在所述的圆形滤光片的时候，有两个必须适当解决的主要几何问题：（1）沿任何一个半径所有膜层的厚度就是不变，（2）沿着圆周的间隔层厚度的变化必须完全是线性的。实际上，这二个准则是制约的，而这

些变化的实际公差将取决于有效口径的选择和滤光片的最佳带宽。

蒸发及监控装置

环形滤光片的制备是在一个标准的装有厚度控制与楔形几何形状控制用的一些特殊装置的直径为30厘米的真空蒸发室中进行的。（见图2）。在钟罩里，环形滤光片R通过发动机和传动系统（未表示）转动，大约转动60转/分。在真空室内，从百叶窗下面两种蒸发源Vs连续地蒸发出两种膜层材料，这样一来蒸汽总是从固定点发散。蒸汽蒸发并被机械旋转的百叶窗S遮断。在基底环R下面放置固定的180°扇形挡板Ma₁，该板将撞击到环上的50%左右蒸汽遮蔽。当蒸发源与基底间的距离以及蒸发源的偏心半径为最佳的时候，用这种装置在环形的整个有效表面上膜层均匀分布是可能的。位置相对的两个90°扇形挡板（Ma₂）以基底R一半的速度精确地旋转。用这个几何形状，结果在基底上形成楔形膜。挡板Ma₂仅在淀积滤光片中间层膜时使用。

滤光片各层厚度必须以很高精度控制。这是由在6328 Å波长下工作的氦-氖激光L来完成。激光束由反射镜M₁反射，同时被斩光器CH以360次/秒切断，并且在分光器M₂上一部分光透过而另一部分反射。反射

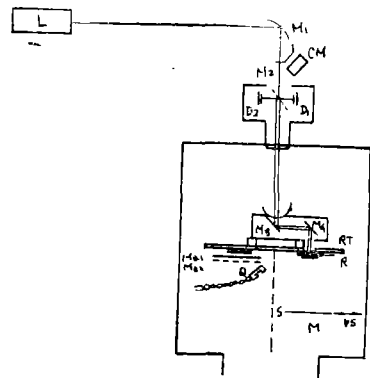


图2 滤光片制备及监控试验装置

光射到参考接收器 D_1 上。透射光向下进入真空室,在反射镜系统 M_3-M_4 中两次反射,并射到环形滤光片的上面。基底 R 与 M_3-M_4 一起旋转,因此,形成旋转的激光,其相对于基底 R 是静止的。从 R 上的一个选择点所反射的激光按原路返回到分光镜 M_2 而由接收器 D_2 接收。当蒸发薄膜在基底 R 上生长时,反射激光信号发生变化,并且通过接收器 D_2 监视滤光片膜层的生长是可能的。硅接收器 D_1 和 D_2 通过前置放大器接到同步整流器中,并且记录了接收器 D_1 和 D_2 中的直流电的比率。

因此,补偿了激光输出的任何变化量,而记录的信号表示来自生长的滤光片结构反射率的连续变化。蒸发膜层结构也淀积在石英晶体 Q 上。淀积的质量通过电变为频率偏移,这就为我们提供另一种在装置中监控膜厚及生长速率的方法。

蒸发源 VS 是由两个装有蒸发材料的坩埚组成的。高折射率材料(硫化锌)是用三氧化二铝坩埚来蒸发,而低折射率材料(冰晶石)是用钼片坩埚来蒸发。这些材料是通过每个坩埚顶上的扁平的钨丝圈的辐射来加热的。借助于石英晶体蒸汽速率计,膜层的生长用手调正,因此每个连续层能够淀积大约八分钟。

上述环形滤光片用的基底是普通的钠玻璃 1mm 厚,分别切成直径为 $\phi = 75\text{mm}$ 和 $\phi = 40\text{mm}$ 的环形。

蒸发程序

如前所述,滤光片序列由十七层膜组成,其中开头的和最后的八层膜均匀分布,而中间层沿圆周稍有楔形。在理论上,用激光反射计从头到尾圆满地淀积十七层滤光片是可能的。实际上,不管怎样,由于转动系统的不理想情况,使反射激光就有起伏和噪音。正如前所述,在滤光片表面上一个固定的点要进行连续地监控。我们发现用三个玻璃试

片控制膜层厚度是可行的。这些试片是 0.15 毫米厚的显微镜盖片玻璃,并在圆形玻璃上用硅油一次粘一片。第一个玻璃试片控制前四层。

真空放气时换上第二个试片同时控制中间九层。然后,第三个试片控制其余四层。

用这种方法,代替一次控制完十七层窄带滤光片,监控器在整个过程以高的信噪比,控制二个反射板和九层宽带滤光片。在主要的宽带滤光片中间层涂镀以前,真空室放气,把两个 90° 挡板 Ma_2 放进去,而中间层的楔形是用这样方法制备:即圆环表面上控制点构成楔形的最大厚度部分。在表 1 中给出了制备程序。一个完整滤光片制备用的总时间(包括四次真空度下降)是三到四小时,滤光片最后用光学树脂与玻璃环胶合在一起而进行保护。

表 1 制备程序

步骤	控制片	挡板	四分之一波长数
1	玻璃试片号码 1	180° 静态	4
2	"	2 "	4+4 (中间层)
3	石英晶体	180° 静态 $2 \times 90^\circ$ 转动	0—0.2 楔形
4	玻璃试片号码 2	180° 静态	1.8 (中间层) + 4
5	"	3 "	4

径向和圆周公差

到现在为止,我们假定环形滤光片厚度在半径方向上完全是不变的,而认为圆周厚度对所有膜层(除微小线性楔形的中间层外)都是均匀的。这意味着滤光片有效带宽是由使用光学口径大小及滤光片的结构来确定的。径向均匀性由蒸发源的蒸汽方向性的性质(当蒸发源坩埚容量减少时蒸汽方向性质便改变)、蒸发源到基底环的几何位置,及蒸发时基底环表面上温度的分布来支配。

图 3 表示在一个固定蒸发源几何位置的蒸发膜层在环形基底不同部位上的理论厚度的分布情况。 180° 固定挡板 Ma_1 位于旋转的

制成的滤光片评价

滤光片用Perkin-Elmer方法450分光计来校定的。这台仪器具有几个埃的波长分辨率并且探测滤光片0.5cm长和0.1cm宽的径向扇形部分。此仪器观察总视场是 3° ，并且使得滤光片变宽很小的值 0.2 \AA 。

中心波长 λ_c 沿着滤光片的中心线(r_c)是从在 $\theta = \theta^\circ$ 附近 $\lambda_c = 6350 \text{ \AA}$ 变到在 $\theta = 160^\circ$ 附近 $\lambda_c = 6250 \text{ \AA}$ ，而点透射率在有关区内(图4)从50%变到70%。滤光片非径向特性明显地表示在图4中。由于制备时基底加热不均匀最容易引起在接近中心线部分 λ_c 的增加。

点带宽变化从在 $\theta = 160^\circ$ 附近 $\Delta\lambda = 20 \text{ \AA}$ 到 $\theta = 100^\circ$ 和 $\theta = 270^\circ$ 附近 $\Delta\lambda = 30 \text{ \AA}$ 。这些点带宽的变化，可能是与光度计的有限口径和中心波长 λ_c 的大坡度有关(特别在 r 方向)。在 $\theta = 160^\circ$ 附近点带宽观测值与本文前节中所讨论的理论值相当一致。当光度计上采用较大口径时，以提高仪器的灵敏度，但是滤光片的带宽问题便增加了。为了获得波长的最佳分辨率必须使实际波长(6300 \AA)尽可能靠近 $\theta = 180^\circ$ 。然而，这需要温度的稳定装置，以便完全地防止滤光片有关的波长漂移。

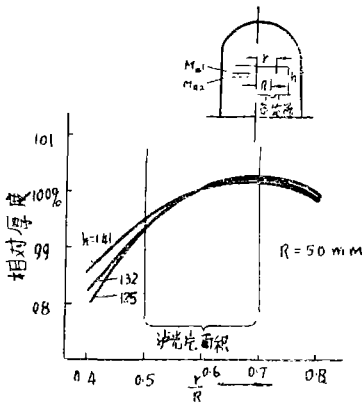


图3 基底环上蒸发膜层的理论厚度分布

基底下面。当蒸发源与基底间距离 h 增大，仅得到更均匀的蒸汽分布，而同时蒸汽量减少。拿现在的布置来说，蒸发源到基底的距离为132毫米给出沿着滤光片半径(是对主滤光片面积平均半径而言)理论厚度在 -0.7% 和 $+0.2\%$ 之间变化。图3中曲线是在蒸汽源具有郎伯逊特性基础上计算的，即大部分发射遵循余弦定律。实际上，蒸发源的特性随着坩埚材料蒸完时间发生微小的变化而基底受蒸发源的热辐射。基底环在镀膜夹具中沿内孔边装上，因此基底外部周围渐渐地升温。对某些蒸发膜层材料，附着系数随温度变化是灵敏的，结果表明，硫化锌层在基底环的外部附近厚度趋于减少，因此，补偿或完全补偿图3上的分布趋势。对于实用的滤光片径向上的非均匀性可以认为稍小于 1% (60 \AA)，并且这值是用实用值来确定的。

滤光片沿圆周的线性依赖于在短期蒸发过程中两个挡板 Ma_2 的转动，但主要是由淀积时蒸汽速率的恒定来决定。为了获得优于 2ppm 的线性，每层淀积膜需要转板至少旋转500转，或者8分钟，同时要有固定的蒸发速率。用人工操作来满足这些要求那是非常困难的。而且，在蒸发源中的旋转系统中除旋转以外，还允许向下少量的移动。结果，滤光片盘各点厚度的变化，变成具有理论的锯齿波的叠加二次谐波的线性曲线，并且滤光片一半比另一半变得更线性。

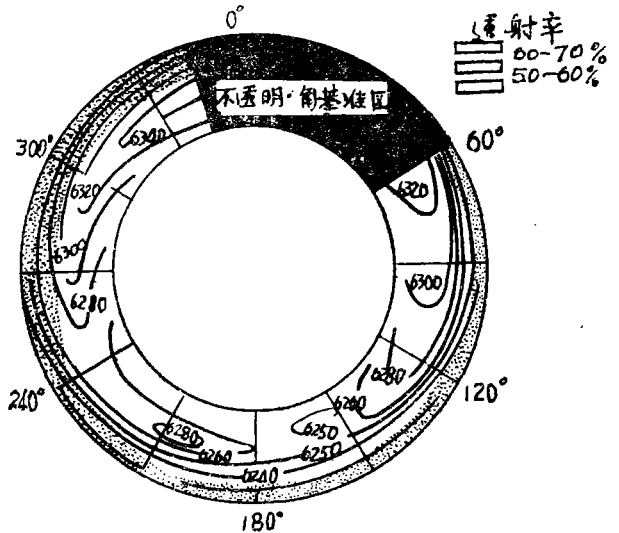


图4 制备的滤光片的中心波长 λ_c 和有效透射率 T 的观测分布

中，那里的全部值是以1.0为最大值归化的。对于最大的 θ 值，有效带宽 $\Delta\lambda_{\text{有效}}$ 小于 35 \AA ，而总波长扫描 $\Delta\lambda$ 等于 100 \AA （与我们的要求完全一致。）当滤光片旋转1周时，对于OI(6300 \AA)线的相对透射率是从85%变到20%。

电子设备

光度计必要的高灵敏度是与火箭仪器在光度计的电子设备上的苛刻限制的其它特殊要求分不开的。

根据其低暗流和强固的优越性，和合适的尺寸，选择了装有 S_{20} 光电阴极的菲利普XP1117型光电倍增管。暗电流表示在电压1500V时 10^{-10} A 的值。因此，检测极背景大气辉光在40瑞利水平由光电倍增管产生输出电流 $2 \times 10^{-10}\text{ A}$ 是可能的。

利用两个独立的具有不同增益的线性放大器，可得到百倍的动态范围，它允许我们

监测出从40瑞利到5000瑞利的极光强度，而没有使遥控系统饱和。

光度计的性能

本文讨论的光度计已装在两架探测火箭上，成功地飞行到最大飞行高度290公里极光区中。在旋转一周时，光度计通过由南部水平线和最低点所确定的圆锥体扫描。当在选择几个周期光度计趋向地球方向时，我们可得到火箭下面OI(6300 \AA)辐射的水平分布。

从火箭飞行其中之一的一个几个光谱扫描例子和在其中之一火箭上观测得来的部分纬度图一起表示在图7中。在不变纬度 68.5° 上，在火箭的下面，观测最大发射值大约为200瑞利。向北推进（图中没表示）观测到的发射基本上保持常量在50瑞利水平左右。这种弱辐射用现在的工艺技术不能尽详细的研究，主要因为光度计的有效带宽很大。由

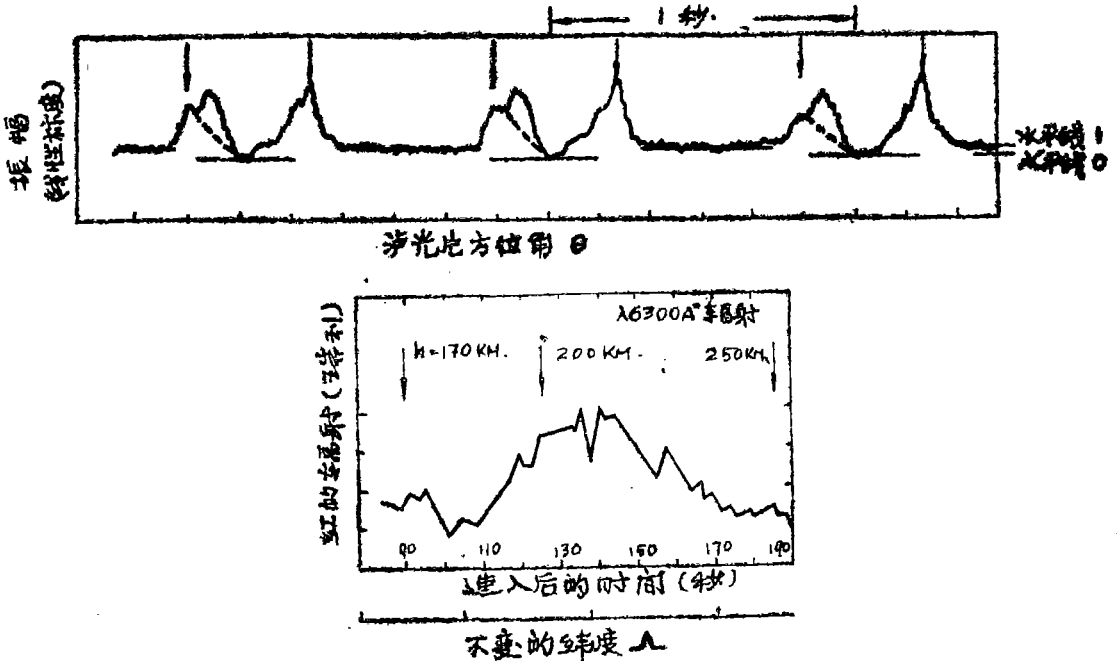


图7 在极光探测火箭伯拉1(a)上得到的光度计样品记录。水平线0相当于角基准(校正)区,而水平线1给出了在 $\lambda 6270\text{ \AA}$ 极光背景光性:用箭头表示的水平线和水平线1之间的差数,给出了红的OI($\lambda 6300\text{ \AA}$)的辐射。(不理想的,强光源混合在于 $\theta=33^\circ$ 附近数据。)由火箭观测得来的在火箭下面红的OI($\lambda 6300\text{ \AA}$)表示在(b)中。

艾瓦斯等人详细地介绍的这条曲线只有用扫描光度计才能有把握地获得,并且可能是高层大气红发射线6300 Å的纬度剖面的第一个瞬时照片。

在将来的火箭上详细研究在高层大气辐射中低强度(极区)的变化是有意义的,并且我们通过把有关系的波长放于接近 $\theta = 180^\circ$ 来改善现有的仪器。那里的滤光片完全是水平的。这将减少滤光片的有效带宽20 Å左右,而提高了仪器的灵敏度。我们预料到,这种改进将允许详细研究大约达10—20瑞利极光OI(6300 Å)发射,这对在高纬度形态学上的研究也是足够的。

附录: 术语

对于给定的点 (θ, r) ,点透射率 t 是波长 λ 的函数, $t = t(\lambda, \theta, r)$, (A1)

并且这点的中心波长 λ_c 是:

$$\lambda_c = \lambda_c(t_{max}, \theta, r) \quad (A2)$$

点带宽 $\Delta\lambda$ 定义为

$$\Delta\lambda = 2[\lambda(t_{max}, \theta, r) - \lambda(t_{max}/2, \theta, r)] \quad (A3)$$

绕轴线总波长扫描 ΔA 是:

$$\Delta A = \lambda(t_{max}, \theta, r_c) - \lambda(t_{max}, \theta_2, r_c), \quad (A4)$$

其中 $r_c = \frac{1}{2}(r_1 + r_2)$ 和 θ_1 及 θ_2 为相应的方位角, λ_c 分别表示极大值和极小值。

滤光片有效透射率为光度计口径 $A(\theta, r)$ 和点透射率的函数。

$$T_{(\theta, r)} = \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \int_{r_1}^{r_2} A(\theta, r) \cdot t(\lambda, \theta, r) \cdot dr \cdot d\theta \quad (A5)$$

因此,滤光片的有效带宽定义为光度计的分辨率,有效带宽给出

$$\Delta\lambda_{有效} = 2[\lambda(T_{max}, \theta) - \lambda(T_{max}/2, \theta)] \quad (A6)$$

参 考 文 献

- [1] R. H. Eather and D. Reasoner Appl. Opt. 8, 227(1969). 19.540(1971).
- [2] J. R. Stsömmann, B.N. Maehlum, and J.K. Olesen, Planet Space Sci. 19.540(1971).
- [3] D.S. Evans. T. Jacobsen. B.N. Maehlum, G. Stovli, and T. Wedde, Planet. Space Sci. (in press). 译自“Appl. Opt.” Vol. 11 No. 2 p. 421 1972. (田素贤 译 杨树梅、施评治 校)

(上接24页)

里斯、A.B.季莫列娃、高等教育出版社

[2] Diffraction grating ruled and holographic, Jobin Yvon optical systems.

[3] 仪器要闻 1965, 4.

第一机械工业部第四局技术情报室编

[4] 光谱仪器, 第一辑,

上海市科学技术编译馆

[5] Diffraction gratings for large telescopes, E.G. Loewen.

[6] The echelle story, E.G. Loewen, Bauch & Lomb.