

元形可变滤光片

摘要 本文讨论了元楔形光学干涉滤光片的设计原理、几何结构、物理特征、光谱特性及其合理的应用。带通元形可变滤光片的设计也详细地进行了讨论。提出了角度和缝宽变化对这些滤光片的光谱性质影响的理论分析结果。

前言

具有体轻、结实和紧凑特点的色散元件(目前被认为元形可变滤光片(CVF))的完善性满足了在光谱学和其他领域中稳定性的要求。

元形可变滤光片是在元形基底上真空蒸涂的光学干涉涂层,随物理旋转改变光谱位置。实际上,由于多层镀膜技术的发展^[1, 2],任何滤光片都可设计成CVF型。采用适当的方法控制和掩模技术,制作出带通CVF,例如,这种滤光片通带中心波长的位置是随着转动的物理角成线性变化。对于长波通和短波通滤光片,这种关系也是适用的;然而,在此情况下,连续的或截止的波长是可变的。

方形带通CVF,甚至使用相当低 f -数值的光照射,在所感兴趣的波长范围内也能给出常值分辨率。以扫描型为例,它可容易地作为单色仪使用。在这种应用中,滤光片作物理旋转给出波长范围内的波长快速扫描,其容易定标,勿需维护及光学装调。这种滤光片在辐射计中^[5, 6, 7, 8]也得到广泛的应用。元形可变滤光片代替了以前用于辐射计中固定的滤光片组,并且给出实现连续波长显示的又一优点。

长波通CVF,在光谱光度计中能方便地采用为级次分离器。通过物理旋转改变截止波长,由于长波通滤光片给出主波长最

大透过率,于是大大地改善仪器的性能。

因许多应用带通CVF,且又因这种滤光片角度与缝宽的问题是非常重要的,下面将着重讨论一下这种滤光片的特性。

设计原理

干涉滤光片的光谱性能多少与每层膜的折射率,基底及入射媒质有关系。然而,滤光片的光谱位置却直接与组成滤光片的各层膜的厚度有关。CVF的作用原理就是利用干涉滤光片的这个特性。

因此,圆形可变滤光片是一种厚度与基底上角度位置线性变化的薄膜组成的光学干涉滤光片。理论上,膜层总厚度的线性变化,是从角度位置 $\phi = 0^\circ$ 的 t ,到 $\phi = 180^\circ$ 的 $2t$,并且再沿基底第二个半环返回到 t 。(图1)。

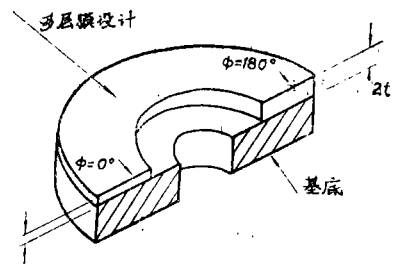


图1 圆形可变滤光片设计原理

因此,带通CVF,在 $\phi = 0^\circ$ 膜厚为 t 的中心波长取入,则膜厚增加到 $2t$ 时,在 $\phi = 180^\circ$ 的中心波长将是 2λ 。

由于这种厚度的依赖关系,实际上,只

要在使用波段中，膜层与基底材料不是完全吸收，在给定波长范围内，可实现元形可变滤光片任何膜层设计。在真空镀膜时，利用适当遮蔽技术与膜厚控制，是会达到目的的。

基底和几何结构

折射率、物理特性、基底材料的附膜性以及使用波长范围等因素确定滤光片基底的选择。在各种玻璃上，其中包括熔硅土和石英玻璃以及硅、锗和钇 VI 等成功地制备成 CVF。

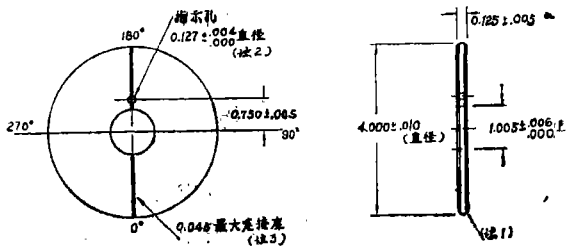


图2 CVF 的标准几何结构。

注：1. 0.010×45°，全部锐边

2. 指示孔是任选的，而对组合 CVF 的指示孔是在90°上。

3. 环氧树脂是任选的，而对于组合的 CVF 是最好的。

4. 基片距表面不超过0.01

5. 表面性质 80—50，仅有划痕和砂眼

6. 抛光 ≤25 条纹，平行度 ≤0.001时/时

图2 绘出元形可变滤光片标准几何结构。

其他滤光片直径从3吋到6吋已制成。

另外，用其他结构也可淀积这种滤光片，如在1吋的宽角90°扇形板上已制备成功。

环阱特征

涂镀牢固的干涉滤光片的技术易适于制备元形可变滤光片。

CVF 始终能经受 MIL-C-675A 中规定的湿度（24 小时，相对湿度 95%，华氏 120°），磨损（20—rub 磨损器）试验，以及膜

层附着性在 MIL-M-13508 B 规定（赛璐珞带试验）。另外，从基底材料可经得住反复的温度周期试验，未见到明显的 CVF 性能的降低。在液态氮温度下，元形可变滤光片很成功地进行了工作。

如需要的话，CVF 也可用丙酮及其他镀膜元件采用的标准洗净剂来清洗。

波长比和光谱范围

在制作的滤光片的标准结构中，方形带通 CVF 中心波长是由 $\phi = 0^\circ$ 的 λ 到 $\phi = 180^\circ$ 的 2λ 及反回到 $\phi = 0^\circ$ 的 λ 线性地变化。此规定为，在 180° 范围内具有 2:1 的最大对最小波长比的标准滤光片。

也已制成 1.5:1 的滤光片，并且诸如 1.11:1, 1.25:1 和 1.33:1 比等也是可行的。而且，上面列举的诸比值，可在 90° 的形板上实现。

由 90° 扇形板与 180° 扇形板任意结合构成的组合 CVF 提供另外的优越性，并且波长比大于 2:1。例如，在 180° 范围内包含 $2-4\mu$ 滤光片的第一个半片可与另一个 180° 内波长范围 $4\mu-8\mu$ 滤光片的另一半片组合。于是，这种组合滤光片包括两个滤光片的 0° 到 180° 扇形板，用树脂（见图2中的选择）或用机械办法合并在一起，给出 4:1 波长比。利用同一原理，最大对最小波长比达 16:1 是可能的（四个 2:1 的 90° 扇形板）。

制备的所有带通 CVF，最小波长近似为 0.4μ ；最大波长 25μ 。在这个波段中，已镀成的滤光片具有非常好的结果。其他类型的 CVF（如长波通等等）的光谱位置也在这个波段范围内。

光谱特性

如前所述，CVF 的光谱位置（如带通的中心波长，长波通的起始波长）和物理旋转角（ ϕ ）之间的关系，完全近似为一条直

线。

图 3 给出光谱范围为 $4\mu\text{--}8\mu$ 的标准带通滤光片盘的中心波长对其旋转角度的曲线。如图所见，与直线的偏差是很小的，并且所有制备的滤光片这种偏差保持小于 3%。

相关的机械指标的意义，如在图 2 中表出的指示孔，这种特征允许作为简单的波长校准。

径向（误差）定义为 CVF 沿径向直线

（或恒定角或旋转），对于给定波长的理想 CVF 的位置的偏差，不考虑滤光片的中心距离。对于直径为四吋的 CVF，在可用的口径上，这种径向误差值小于 0.5%。

从 0.4μ 到近于 20μ 的波段范围的 CVF 结构已制备成达半宽度窄到中心波长的 1% 那样程度的膜层设计。对于光谱范围包括 14μ 到 25μ ，半宽度为 4% 的带通 CVF 也已成功地镀制。这种和其他有用的方形带通设计数据列入表 1 中。

| 波 长 范 围 | 带 通 CVF 的 峰 值 透 过 率 | | | | | |
|------------------------------|---------------------|------|-----|------|----------|--------------------|
| | 规 一 带 宽 (见 表 II) | | | | | |
| | 1% | 1.5% | 2% | 2.5% | 4% 8% | 5.5% 10% 12% |
| 0.4 — 1.2 μ | * | | * | | * | |
| 1.20 $\mu\text{--}1.35\mu$ | 15% | | 15% | | 20% | |
| 1.35 $\mu\text{--}1.45\mu$ | 25% | | 25% | | 30% | |
| 1.45 $\mu\text{--}1.50\mu$ | 30% | | 35% | | 35% | |
| 1.50 $\mu\text{--}2.50\mu$ | 40% | | 45% | | 50% | |
| 2.50 $\mu\text{--}4.00\mu$ | 40% | | 50% | | 55% | |
| 4.00 $\mu\text{--}6.00\mu$ | 50% | | 55% | | 60% | |
| 6.00 $\mu\text{--}8.00\mu$ | 55% | | 65% | | 75% | |
| 8.00 $\mu\text{--}11.00\mu$ | 50% | | 60% | | 70% | |
| 11.00 $\mu\text{--}13.00\mu$ | 45% | | 50% | | 70% | |
| 13.00 $\mu\text{--}15.00\mu$ | 30% | | 50% | | 70% | |
| 15.00 $\mu\text{--}18\mu$ | 25% | | 40% | | 55% | |
| 18 $\mu\text{--}20\mu$ | 15% | | 15% | | 40% | |
| 20 $\mu\text{--}25\mu$ | — | | — | | 20% | |

* 规格的和要求的这种 CVF 正处在发展和完善状态。

表 II 规一半宽度的确定

| 规一半宽度（中心波长的百分数） | 极 限 * （中心波长的百分数） |
|-----------------|---------------------|
| 1% | 1.5% |
| 1.5% | 在 1% 和 2% 之间 |
| 2% | 在 1.5% 和 2.5% 之间 |
| 2.5% | 在 2% 和 3% 之间 |
| 4% | 在 3% 和 5% 之间 |
| 5.5% | 在 4% 和 6% 之间 |
| 8% | 在 6.5% 和 9.5% 之间 |
| 10% | 在 8% 和 10% 之间 |

* 从 CVF 扇形的七个等角间隙上观察的超度情况

表 1 也列入各光谱区所要求的峰值透过率。应注意：所得到的峰值透过率是与膜系统设计带宽、带的截除（列出峰值透过率是已截除次带后的滤光片的值，所以次峰带漏光率不会出现大于绝对值 0.1% 的透过率）和要求的谱区等有关。典型的峰值透过率随波长的变化曲线也在图 3 中绘出，并且由于膜层的或基底材料的吸收而有改变。虽然，固定截止滤光片（一般无膜基底直径为 1 吋，如氟化钡）常常需要长波方面的截止，因

此, CVF 通带值容易衰减到在截除次峰后不会出现大于 0.1% (绝对值) 的次峰带漏光。0.01% 数量级也容易获得。然而, 在远红外, 目前可利用的商业上的光谱光度计 (如 Cary 90 和 Beckman IR 12) 限制了对理论上那样小的次峰带漏光的检测。

制备在 90° 扇形板上的一种典型的 CVF, 在不同旋转角上的实际扫描情况, 在图 4 中给出。

任何干涉滤光片的光谱特性是随下述情况变化的: (a) 滤光片的温度和 (b) 入射光束的入射角与宽度的变化而变化。因此, 在考虑使用元形可变滤光片, 重要点是, 不仅应知道用光谱光度计 (如准直入射光束和通常以垂直入射及室温下) 测量的滤光片的光谱特性, 而且也应考虑到把滤光片装入光学系统中的通常情况下所产生的与这些条件不同而予期的性能。

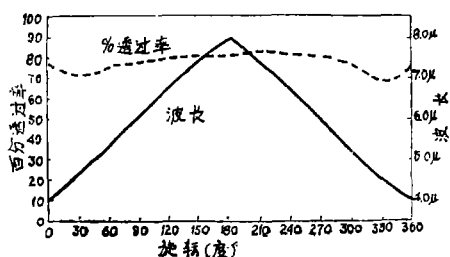


图 3 峰值透过程和中心波长与旋转角关系

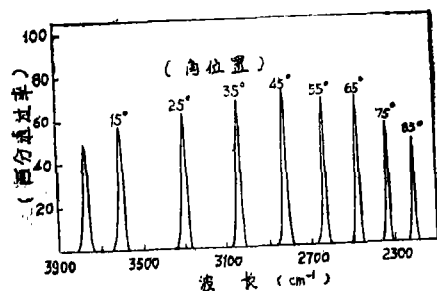


图 4 镀在 90° 扇形上的 1% 带通 CVF, 从 2.5μ~4.5μ 光谱扫描 (T=0.1% 通带以外)

下面的讨论和数据通用于所有 CVF。除非特殊解释。这些数据都是通过方形带通滤光片设计的考虑而得到的。这些滤光片作

重点讨论, 因为滤光片的光谱特性较小的改变会显著的影响系统的性能。

温度变化

在给定入射角情况下, 带通干涉滤光片的中心波长随温度的降低而向短波位移, 并且反之亦然。由温度影响的波长位移近似为膜层温度的线性函数, 主要是因为组成滤光片的涂镀的膜层一般具有折射率随温度成线性地变化。温度变化引起的波长位移较小, 温度变化每 100°C 时, 通带中心波长位移一般小于 1%。所以, 例如在给定的旋转角和 CVF 的中心波长为 5μ, 随温度增加 10°C, 其波长位移 5,00—5,005μ 之间。在宽的温度范围, 通带 CVF 也保持其峰值透过率和光谱形状。然而, 对于, 某些设计, 在滤光片的温度超过 50°C 时, 由于基底及膜层材料的吸收所致而产生透过率的损失。

角度和缝宽的变化

当入射光入射于垂直入射到带通滤光片表面上的角度时, 其通带向短波位移, 并且光谱形状发生改变。

波长位移的准确值依赖于滤光片的设计和选用材料的折射率等等。当准直能量入射在滤光片上时, 全部辐射是以给定角度入射到它的表面上。然而, 为了获得最佳能量, 大多数应用中, 其中包括 CVF, 都采用会聚锥体形的入射光, 如图 5。

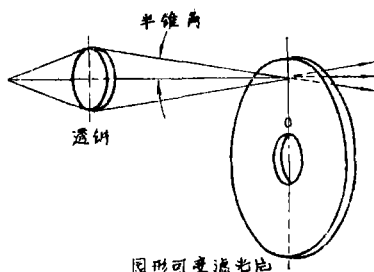


图 5 锥体照射的 CVF 的略图

此外，入射辐射在锥体内可以不是等强度的；所以，其变化也与通过光线的能量分布有关。能量角分布与光源及其在一特定的系统中采用的辐射方式有关。

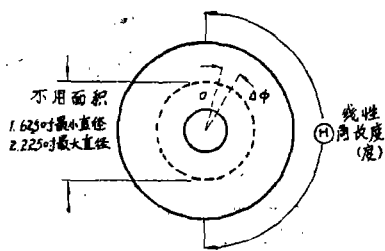


图6 角缝宽

在这里，不打算考虑在实际中将遇到的所有可能的辐射角分布；将考虑三种辐射：准直辐射，朗伯辐射和会聚辐射，同时给出在大部分应用中是有联系的能量分布。

通常，随入射角的增加，带宽也增加，同时在给定角位置旋转的矩形带通 CVF 的峰值透过率减少。

在元形可变滤光片光谱特性变化的研究中，缝宽必须与角度影响一起考虑，这个问题就变成一个非常复杂的问题。

正如前面所讨论的，以会聚在滤光片上的锥体辐射照射滤光片是可增加透过能量的一种方法。然而，对于 CVF 采用的光束或狭缝最佳形状是一角度扇形，而采用较宽的狭缝也可以增加透射能量。在图6中用 $\Delta\phi$ 表示的角缝宽随狭缝刃间角度的变化而改变。因为 CVF 给出连续的波长扫描，其透过波长依赖于光束射到滤光片上的准确定位，角缝宽的增加将同时带来透射波长数的增加和发生通带变宽引起峰值透过率减少。然而，角缝宽改变不带来中心波长的位移。

另一方面，为得到 CVF 的设计分辨率，找出最小缝宽值，低于此值则通带发生微小变窄；因此，为使最大能量透射不损失分辨率，应该采用此缝宽。

对于垂直入射时，可采用一个近似的最佳角缝宽的简单公式：

$$\Delta\phi_{opt} = \frac{D \times H}{1 - (1/F)} f$$

其中 $\Delta\phi_{opt}$ ——最佳角缝宽 (度)

$D^{\circ P'}$ ——设计的半宽度 (半功率带宽)
(即 1% = 0.01)

H ——线性角长度 (度)

$$F = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}$$

$$f = \frac{\lambda}{\lambda_{max}}$$

例如：对于带通 CVF，其半宽度为 2%，从 0° —— 180° 的波长范围为 2μ — 4μ ，其中 $2\mu(\phi = 0^\circ)$ ， $3\mu(\phi = 90^\circ)$ ，和 $4\mu(\phi = 180^\circ)$ ，确定 $\Delta\phi_{opt}$ ：

$$D = 2\% = 0.02$$

$$H = 180^\circ$$

$$F = 4\mu/2\mu = 2$$

$f =$ 变量 而

$$f(\text{在 } 2\mu) = \frac{2\mu}{4\mu} = 0.5$$

$$f(\text{在 } 3\mu) = \frac{3\mu}{4\mu} = 0.75$$

$$f(\text{在 } 4\mu) = \frac{4\mu}{4\mu} = 1.0$$

代入，

$$\text{在 } 2\mu \text{ 处, } \Delta\phi_{opt} = \frac{0.02 \times 180^\circ}{1 - 1/2} \times 0.5 = 3.6^\circ$$

$$\text{同样地, } \Delta\phi_{opt}(3\mu \text{ 处}) = 5.4^\circ$$

$$\Delta\phi_{opt}(4\mu \text{ 处}) = 7.2^\circ$$

所以，当确定了最佳角缝宽，如果已知 CVF 的中心距离，则容易变换成线性缝宽。

对于入射辐射的三种不同情况，结合着角度效应和缝宽变化两者影响编写了计算机程序，实际上就是对于给定的膜系设计，对全角度和缝宽进行了双重积分运算。这是在 IBM1130 计算机中进行的，并由计算绘图器边绘出了以波长 λ 为函数的滤光片光谱曲线。数字上表示为，

$$T(\lambda) = \int_0^\theta \int_0^h T(\lambda, \theta, h) d\theta dh$$

这里， θ ——半锥体角或入射角

h ——狭缝宽度

选择了1.1%，1.4%和2.5%三种膜系设计的半宽度，下面讨论此理论研究的一些结果。

这里必须指明：给定 ϕ （转动角）的带通 CVF 的中心波长由于入射角变化产生的位移，对于同一膜系设计的固定带通滤光片位移变化是相同的。在另一篇论文中，将十分详细地进行讨论。

图7表明，缝宽增加的影响是使 CVF 的分辨率损失。指出，对于无穷小的缝宽（在纵坐标上）滤光片的带宽增加只是由于 f —数的减少。

横坐标（用%表示）为线性角长度百分比表示的角缝宽，即 $(\phi H \times 100\%)$ 在 CVF 的最大波长位置 $(\phi = 0^\circ)$ 。对于 $\phi = 0^\circ$ 以外的其他角位置，这个百分比必须用 λ/λ_{m1} 来乘。

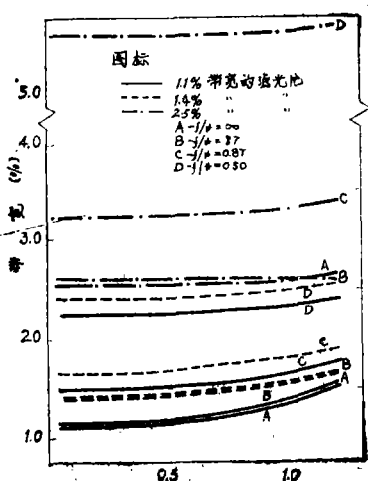


图7 线性角长度的相对缝宽(%) 缝宽随CVF带宽的变化($f = (\text{Cot } \theta)$, θ 为半锥体角)

图8绘出了由于 f —数引起的三种滤光片峰值透过率的减少和缝宽的变化。该完整的理论研究的细节将在以后的论文中发表。

因此，下面只是引出一些结论：

(1) 在 CVF 的最小波长 λ 位置 ($\phi =$

0°)，角缝宽 (%) 的选用不大于 CVF 的设计带宽 (%), 即使滤光片以相当低的 f —数的光辐射照射，一般讲，将不严重地损坏

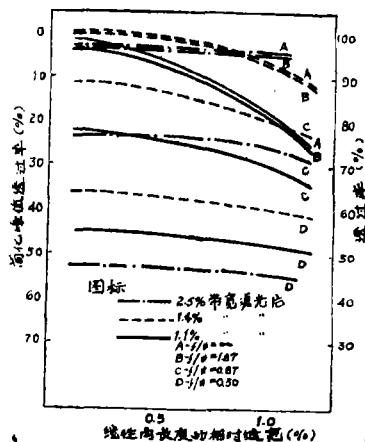


图8 缝宽随简化峰值透过率的变化 ($f = \frac{1}{2} (\text{Cot } \theta)$ 和 $\theta =$ 半锥体角)

CVF 的分辨率。

(2) $\phi = 0^\circ$ 处，若采用缝宽比设计带宽大两倍，则 CVF 的分辨率下降很多。例如，取 $f/2$ ，1.1% 的滤光片，在 $\phi = 0^\circ$ 时，将有：(a) 在近似 2% 的相对缝宽时，带宽为 2%；(b) 在近似 3% 的相对缝宽，带宽为 3%。

(3) 适当调正角缝宽度，对于所设计的很窄的带通 CVF，可使用相当低的 f —数光辐照时，而不发生严重的分辨率损失。

结 论

元形可变滤光片在中等分辨率的仪器中已广泛的应用。因为元形可变滤光片容易严格管理，而膜系设计和工艺要继续改进。要求元形可变滤光片越来越多的起到光学色散元件的重要作用。

译自“Optical Spectra”1969.9.78—83

(杨树梅译 袁幼心校)