

# 渐变滤光片遮蔽扇的设计

赵景愚

## 一 引 言

本文讨论了蒸镀膜形如图 1 所示的厚度随基底角度而变化的渐变滤光片所用遮蔽扇系统的设计方法。

一般用两个扇子与基底共轴，作相对转动而产生的。

Thelen<sup>[1]</sup>把蒸镀材料在基底上淀积速率

$\frac{dD}{dt}$  用博立叶级数展开式来计算：

$$\frac{dD}{dt} = SQ(\varphi_1, x) \cdot SQ(\varphi_2, x)$$

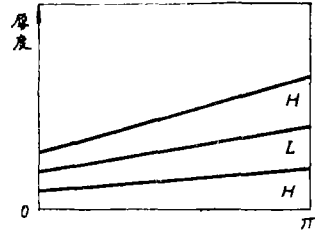


图 1

其中：

$$SQ(\varphi_n, x) = \frac{2\sqrt{C}}{\pi} \left[ \frac{\varphi_n}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin k_n \varphi_n}{k_n} - \cos k_n x \right]$$

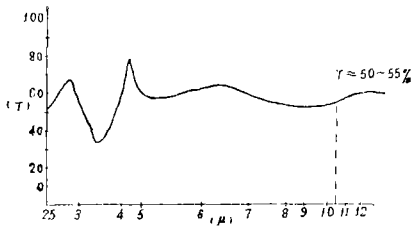


图 3 在 NaCl 基底上涂敷  $As_2S_3/NaCl$  /  $HfO_2$  制得的分束板。

防水胶，以防止水汽从暴露处侵蚀底面。没有防水胶，用其他易干的，对水汽有抵抗作用的胶体也所以。实践证明，完全保护好的 NaCl 底片（即膜层无裂纹或针孔，并无裸露之处），用水冲洗毫无影响。

## 结 语

NaCl 表面镀了保护膜后，只能起到防护其表面免受水汽的侵蚀作用，并不会改变 NaCl 晶体本身很软的这一性质。所以，在使用镀膜后的 NaCl 元件过程中，还必须注意保护，严防外伤，若膜面划伤，水汽由裂缝处进入膜内，在膜层底下扩散，而造成晶

体表面损伤。往往可以发现晶体表面发毛，而膜层仍附着在表面上，就是这种原因造成的。还应注意，为了使膜层起到好的保护效果，在 NaCl 的光学加工和镀膜前的各项处理中，不要划伤 NaCl 表面。因为深的划痕会影响保护性能。

用  $CO_2$  激光照射涂敷的 NaCl 元件时，会发现当 NaCl 表面有潮解现象时，即使较低的功率，也会使保护层很快烧去。若基底抛光的好，保护膜的质量高，用 100 瓦的激光束照射较长时间（半小时～1 小时）也不会烧毁。这里还应指出的是，NaCl 表面粘附的污物或嵌入的颗粒或划伤，也会引起对激光的强吸收，从而导致膜层的破坏。由  $As_2S_3$  和  $BaF_2$  交替制备的分束板，其抗水汽性能劣于单层  $As_2S_3$  保护层。这是由于  $BaF_2$  抵抗水汽不及  $As_2S_3$  的原因及  $BaF_2$  与  $As_2S_3$  之间的间隙所致。

## 参 考 文 献

"Thin Solid Films" Vol. 6, No. 6, p. 423, 1970.

$\varphi_1, \varphi_2$  为两扇的开口角,  $C$  为常数。

这样推导出来的厚度作为角度函数与扇形关系其数学形式比较麻烦, 不便于设计使用, 甚至为了进行某种扇形的计算, 而不得不在电子计算机上进行较长时间的计算。

作者提出了一种十分简单而又容易掌握的设计方法。甚至不用电子计算机, 就可以迅速地得出获得一定厚度比的扇形具体形式。

## 二 设计原理

一个开口角为  $\varphi$  的扇子 (图 2), 旋转  $\varphi$  角, 则基底的  $A, B, C, D$  各点曝光时间不同。  $A$  点曝光时间最长,  $B, C, \dots$  各点分别次之。  $D$  点曝光时间几乎为零。  $A$  点蒸着厚度  $d$  应与  $\varphi$  成正比:

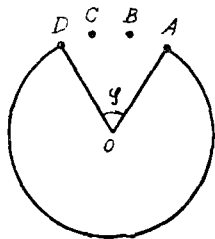


图 2

$$d(\varphi) = k\varphi \quad (1)$$

$k$  为比例常数。这种厚度值只能是相对的。

下面定义一个厚度的标准值: 设有一个理想的遮蔽扇, 其开口角为  $2\pi$ 。根据 (1) 式, 理想遮蔽扇旋转一周后, 在  $A$  点淀积的厚度 ( $A$  点厚度) 是

$$d(2\pi) = k2\pi \quad (2)$$

因此, 开口角为  $\varphi$  的扇子, 相对厚度为:

$$F = \frac{d(\varphi)}{d(2\pi)} = \frac{\varphi}{2\pi} \quad (3)$$

若两个扇子在同一转轴上旋转, 则厚度决定于开口角小的那个角度。

令:

$M_1, M_2$  表示扇 1 与扇 2。

$W_1, W_2$  表示扇 1 与扇 2 角速度。

$N_1, N_2$  表示扇 1 与扇 2 的叶片数。

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  表示扇 1 各开口角角度。

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_q$  表示扇 2 各开口角角度。

我们研究这样的一对扇子:

$$N_1 = N_2 + 1,$$

$$W_1 = W_2 - 1,$$

而且  $N_1 W_1 = N_2 W_2$ ,

我们这样扇子为“完整”扇子。

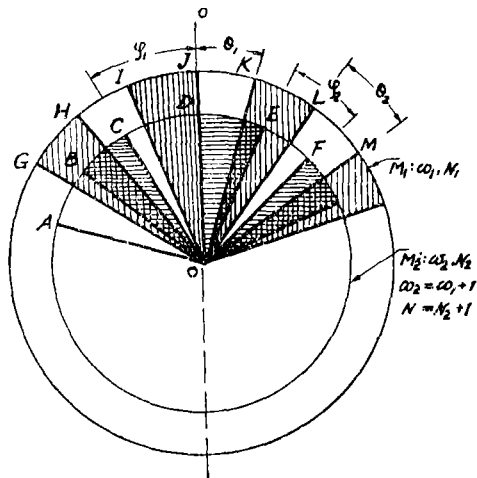


图 3

图 3 就是这样扇子。  $A, B, C, D, E, F, \dots$  是  $M_2$  上各角边上的点,  $G, H, I, J, L, \dots$  是  $M_1$  上各角边上的点。

令  $OJ$  与  $OD$  缝合处为基底原点。

又令  $\varphi_1 = \angle COD, \varphi_2 = \angle EOF, \dots$  等等

$\theta_1 = \angle JOK, \theta_2 = \angle LOM, \dots$  等等

等

下面顺次讨论  $M_2$  的  $\varphi_1$  与  $M_2$  诸  $\theta_1, \theta_2, \dots$  的相互作用, 然后  $\varphi_2$  与  $\theta_1, \theta_2, \dots$  相互作用, 等等。

$\theta_1$  左边  $OJ$  与  $\varphi_1$  右边  $OD$  缝合, 基底原点不曝光, 厚度为零。由于  $W_2 > W_1$ , 所以  $OJ$  与  $OD$  形成的狭缝逐渐张开。当某个扇子转到某个位置时,  $\theta_1$  全部落在  $\varphi_1$  里面, 出现曝光时间最长情况。循此下去,  $\theta_1$  的右边  $OK$  逐渐与  $\varphi_1$  的左边  $OC$  接近, 直至完全逢合, 又出现不曝光情况, 厚度复为零。

$\varphi_1$ 与 $\theta_1$ 相互作用全部结束。然后,又顺次出现 $\varphi_1$ 与 $\theta_2, \theta_3, \dots$ 等相互作用过程。

设从第一个厚度为零的地方经过时间  $t$  以后到达第二个厚度为零的地方,且“完整”扇子的挡空比都是  $1:1$ ,即:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_{N_2} = \frac{\pi}{N_2}$$

$$\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_{N_1} = \frac{\pi}{N_1}$$

则出现第二次厚度为零的条件是  $OK$  与  $OC$  重合:

$$(W_2 - W_1)t = \frac{\pi}{N_1} + \frac{\pi}{N_2}$$

这时候 $\theta_1$ 的右边 $OK$ 已经旋转到 $W_1 t + \theta_1$ 处:

$$W_1 t + \theta_1 = W_1 \left( \frac{\pi}{N_1} + \frac{\pi}{N_2} \right) + \frac{\pi}{N_1} = 2\pi$$

所以第二次出现厚度为零处是在基底 $2\pi$ 处。

在两个厚度为零之间曾出现曝光最大的情况,即 $\varphi_1$ 的右边 $OD$ 与 $\theta_1$ 的右边 $OK$ 重合,这时 $\theta_1$ 开始完全落在 $\varphi_1$ 之中。 $OD$ 与 $OK$ 重合的条件是

$$(W_2 - W_1)t_1 = \frac{\pi}{N_1}$$

这时 $OD$ 的位置是:

$$W_2 t_1 = \pi$$

所以厚度最大的地方是在基底的 $\pi$ 处。这个厚度是由开口角比较小的 $\theta_1$ 决定,即:

$$d(\varphi_1 \sim \theta_1) = \frac{\pi}{N_1} / 2\pi = \frac{1}{2N_1}$$

这里符号  $d(\varphi_1 \sim \theta_1)$  表示 $\varphi_1$ 与 $\theta_1$ 相互作用对厚度的贡献。

下一个是 $d(\varphi_1 \sim \theta_2)$ ,  $\varphi_1$ 与 $\theta_2$ 开始相互作用是出现在 $\varphi_1$ 与 $\theta_2$ 开始接近,即 $\varphi_1$ 的右边 $OD$ 与 $\theta_2$ 的左边 $OL$ 开始缝合,其条件是:

$$(W_2 - W_1)t_2 = \angle JOK + \angle KOL = 2\pi / N_1$$

这时 $OD$ 已经旋转到:

$$W_2 t_2 = 2\pi$$

所以 $\varphi_1$ 与 $\theta_2$ 作用其第一个厚度为零出现在

$2\pi$ 处。重复上面讨论,第二个厚度为零,即 $\varphi_1$ 与 $\theta_2$ 作用结束,出现在 $4\pi$ 处;而完全曝光是 $3\pi$ 处。结果,在基底上 $d(\varphi_1 \sim \theta_1)$ 与 $d(\varphi_1 \sim \theta_2)$ 完全叠加在一起。所有 $d(\varphi_1 \sim \theta_i)$   $i=1, 2, 3, \dots$ 叠加的结果,就是图4虚线所示。所以在 $\pi$ 处的厚度是

$$N_1 \times \frac{1}{2N_1} = \frac{1}{2}$$

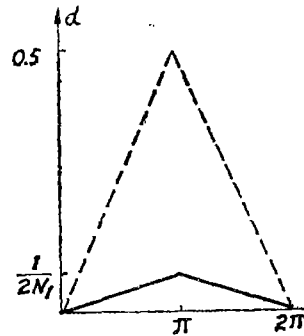


图 4

### 三 叶片的切除

#### 1. 只切除一个扇子的叶片

在图2“完整”的遮蔽扇系统中切除掉一个叶片,就出现一个新的开口角。例如切掉 $\angle KOL$ 只要在上述基础上分析一下 $\varphi_1$ 对新开口角 $\angle KOL$ 的相互作用 $d(\varphi_1 \sim \angle KOL)$ 。 $\varphi_1$ 与 $\angle KOL$ 发生相互作用是从 $\varphi_1$ 的右边 $OD$ 与 $\angle KOL$ 的左边 $OK$ 缝合以后开始的。这时厚度为零。从图2状态出发,经 $t_3$ 以后 $OD$ 与 $OK$ 缝合,条件是:

$$(W_2 - W_1)t_3 = \theta_1 = \frac{\pi}{N_1}$$

这时 $OD$ 已经旋转到:

$$W_2 t_3 = \pi$$

即第一次出现厚度为零的地方是在基底为 $\pi$ 处。

经 $t_4$ 后出现第二次厚度为零,其条件是 $OC$ 与 $OL$ 缝合

$$(W_2 - W_1)t_4 = 2 \frac{\pi}{N_1} + \frac{\pi}{N_2}$$

这时OC的位置是:

$$W_2 t_4 + \varphi_1 = 3\pi$$

重复上面讨论, 可知完全曝光, 即厚度最大是出现在基底 $4\pi$ 处。迭加结果如图5虚线所示。如果切除两个叶片, 在O与 $2\pi$ 处, 虚线又上升 $\frac{1}{2N_1}$ 。余此类推。

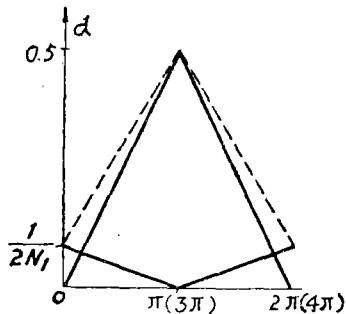
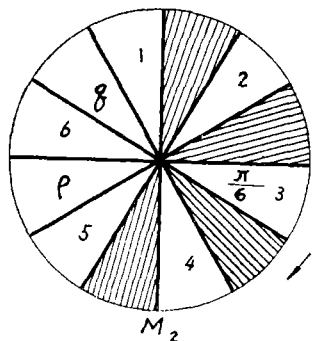


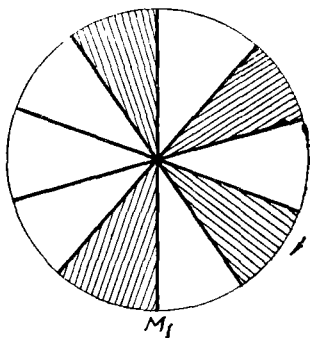
图5

## 2. 同时切除两个扇子的叶片

令 $CutN_1$  表示把  $M_1$  切除掉叶片数,  
 $CutN_2$  表示把  $M_2$  切除掉叶片数。



$$CutN_2 = 2, W_2 = 5$$



$$CutN_1 = 1, W_1 = 6$$

图6

以 $N_1 = 5, N_2 = 6, W_1 = 6, W_2 = 5$  的系统为例子。

下面采用一种简明的记号: 如“2~3”中第一个数字指第二个扇子的第几个开口角, 第二个数字指第一个扇子的第几个开口角。图7表示两个扇子的相互作用过程:

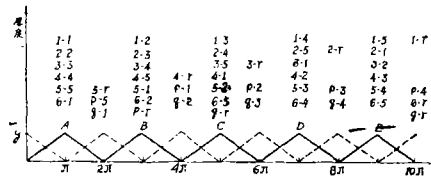


图7

图中, 每一对开口角相互作用所产生的最大厚度  $y$  由开口角小的叶片决定。上例中  $y = \frac{1}{2 \times 6}$ 。图6表明像折线  $A(O - 2\pi)$  这样的相互作用有 1—1, 2—2……等六对。故在  $A$  点总厚度应是  $6y$ 。其他段折线亦同样。但是由于  $M_1$  切掉一个叶片, 多一个开口角  $r$ 。同样  $M_2$  多两个开口角  $p, q$ 。这三个新开口角都参加到相互作用中去。根据前面计算方法, 推出:

1.  $M_2$  的 1, 2, 3, 4, 5, 6 诸开口角与  $r$  的相互作用, 正好跟原来位置差一个  $\pi$ 。即图6中虚线。

2.  $M_2$  的新开口角  $p, q$  与  $M_1$  的  $r$  相互作用, 落在原来曲线(实线)位置。

3.  $p, q$  与  $M_1$  的 1, 2, 3, 4, 5 诸开口角的相互作用也差一个  $\pi$ , 亦用虚线表示。

在基底上, 所有相互作用重叠结果, 在  $\pi$  处产生总厚度是  $32y$ 。而在原点处总厚度是  $6y$  (图8)

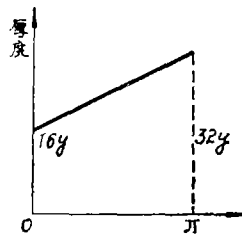


图8

在普遍情况下，基底  $\pi$  处与原点处厚度比  $t$  的一般公式可归纳为：

$$t = \frac{N_1 \cdot N_2 + \text{cut} N_1 \cdot \text{cut} N_2}{N_1 \cdot \text{cut} N_2 + N_2 \cdot \text{cut} N_1} \quad (4)$$

根据此公式，算出不同  $N_1$  与  $N_2$  情况下  $\text{cut} N_1$  与  $\text{cut} N_2$  所对应的  $t$  值表格，对于设计工作极为有利。

#### 四 叶片的填补

处理图9这样一对扇子，可以用前面所述的相反过程。仍把它当作“完整”扇子处理。

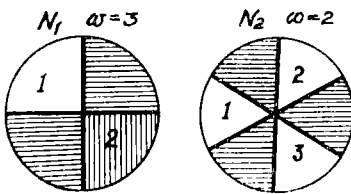


图9

由于在  $N_1$  中第二个开口角已被填补，所以有些相互作用不出现，即图9中方括弧所标帜的相互作用应取消，更复杂情况，都可以如法处理。

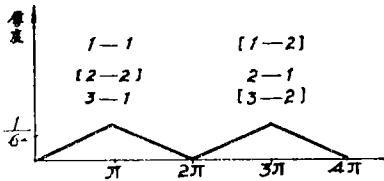


图10

#### 五 消除系统误差办法

两个扇子的转速比不应有系统误差，否则渐变性质即被破坏。

图11中  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$  均为齿轮的齿数。

令  $p, q, r$  分别表示基底  $M_2, M_1$  的旋转圈数。则

$$\frac{p A_1}{A_2} \cdot \frac{B_2}{B} = q,$$

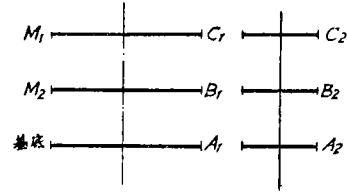


图11

$$\frac{p A_1}{A_2} \cdot \frac{C_2}{C_1} = r \quad (5)$$

选择整数  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1$  与  $C_2$  及合适模数使上述二式凑成整数比，并满足

$$q - p = N_1 \quad r - p = N_2 \quad (6)$$

这样设计的齿轮严格保证速比系统误差为零。

#### 六 结束语

用上述方法设计对称型的渐变滤光片所须的遮蔽扇，其结果与 Thelen 用复杂数学方法计算的结果完全一致。这方法原则上也适用于非对称型渐变滤光片的遮蔽扇的设计。

实验中，首先采用了最简单的扇形结构： $N_1 = 1, N_2 = 2$  以获得厚度比为 2:1 的渐变滤光片。其线性是很好的。亦与文章<sup>[1]</sup>的结果一样，在  $\theta = 0$ ，与  $\pi$  处出现略有偏离线性的情况（图12）。关于实验的更多情况，将有专文发表。

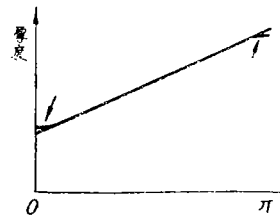


图12

#### 参考文献

- [1] Alfred Thelen, Appl. Opt. 4 (1965) 977.
- [2] J. Ward, Vacuum 21 (1971) 85.