

# 仪器与仪表

(现代光学技术专辑)

1

---

上海机械学院情报室  
精密仪器工程系资料室

1981

# 前 言

编译“现代光学技术”是由于我们科研和教育工作的需要，也为了做好情报资料交流工作。这一期包括薄膜光学及集成光学方面的内容，共八篇文章。内容选择力求新颖，对从事这方面工作的同志所关心的问题，如薄膜光学中对多层膜系的吸收，散射损失的研究工作国内还做得不多，太阳能薄膜方面的资料也很欠缺，集成光学方面的应用，及对导波常数的测试等也是共同关心的问题。

参加本期校对工作的有袁一方、沈惠源和史大道同志，王力民同志负责本期组织出版工作，由于水平有限，错误之处恳切地望读者批评指正。

上海机械学院特种工艺研究室

上海机械学院情报室

1981.7.20

# 预计多层高反膜, 减反膜体吸收, 界面吸收及散射效应的简单表达式

## 提 要

本文提出了一种形式上紧凑的能预计在垂直入射时、多层 $\frac{\lambda}{4}$ 膜系的体吸收, 界面吸收的近似表达式。对高反膜而言, 所取得的这种表达式是 Koppelman's 等式的推广。在这些表达式中。明确地把介质的或金属的基体影响作为界面吸收和散射损失。同样得到形式上类似的用于具有吸收、散射性能的减反膜系透射率的表达式。实验上区别和测量单层膜界面吸收或体吸收, 及估计界面散射和体散射的技术已在文献上提出。且在这文献中提出的表达式可使在无需计算机帮助下。运用这些实验数据对预计 $\frac{\lambda}{4}$ 膜系的高反、减反多层膜堆性能成为可能。

## 介绍

减反膜和高反膜一直受到光学界的重视, 假设在多层膜的实际膜系设计中, 各个膜层在进行膜系计算时是以无吸收计入的。因此, 只须简单地利用足够的层数可使膜系的反射率随意地接近 0 或 1。不过, 在实际上, 各层膜的吸收是轻微的, 此外, 这种吸收和散射性能可以发生在膜层与基体界面。虽然对膜层而言吸收是极小的, 实际上, 膜层吸收系数高于大块材料的吸收系数, 这所预计到的吸收值, 仅在少数情况中, 膜层的吸收系数等于大块材料的吸收系数。为什么材料在沉淀成膜层后会出现增加, 这是难以理解的。不管原因何在, 膜层的吸收现象会影响多层膜反射率和透射率。

当单层、多层膜层表面的光学性质以边界值问题研究时, 那末, 这个问题的研究立即成为极为复杂的问题。利用阻抗原理和线性代数, 递推法计算已使这个问题得到解答。虽然, 通常设计时膜层是无吸收考虑的, 但一般设计理论是允许膜层有吸收存在, 甚至界面也允许有吸收存在, 这样一来多层膜的设计问题能得到解决。不过多层膜性能与膜层吸收、散射之间某些依赖关系仍然是模糊的。如使光学厚度正好为 $\frac{\lambda_0}{2}$ 或 $\frac{\lambda_0}{4}$ 问题就大大简化。那末, 对于减反、高反膜就有可能得到形式上紧凑的表达式。Koppelman 已推导出具有一定反射率的高反膜的表达式。这种高反膜是由 $\frac{\lambda_0}{4}$ 膜堆有吸收性能的高低折射率交替镀制而成的。最近, 此表达式由 Sparks 在不同的基础上作了第二次推导。已在一篇文献中证明了 Koppelman's 的表达式。此表达式是冗长且令人烦琐的表达式。但此结果, Sparks 用试探方法进行逐步逼近观察也可得到这结果。另外, 驻波比概念也用来分析高反膜结构造成的散射与吸收的损失。同样, 在多层膜中应用了矢量散射原理, 标量散射原理。Koppelman's 等式仅当基板作用忽略不计时才成立。但在实际中, 基板必须进行考虑, 在本文中所提出的简单表达式是考虑了基板的作用。基板可以是介质的或有吸收性能

的。对分别镀有一层  $\frac{\lambda_0}{4}$ , 二层  $\frac{\lambda_0}{4}$ , 三层  $\frac{\lambda_0}{4}$  减反膜的基板, 且这减反膜具有轻微的吸收性能时, 也提出了类似的表达式。Sparks 还引进了膜层存有薄吸收层的概念。在本文中此概念被用来专门研究高反膜、减反膜的界面吸收作用上。目前, 已提出区别膜层中界面吸收和体吸收的实验技术。业已发现, 在膜层界面附近的吸收可以与整个膜层体吸收相同, 甚至还要大。本文还扼要地讨论了多层膜的散射效应, 运用最终的表达式 (在本文结尾总结的表达式) 可以不借助计算机的帮助而近似地预测镀在介质基体或吸收基体上高反膜和减反膜的性能。

### 等效折射率

介质的复折射率可用  $\bar{n} = n - ik$  表示, 式中  $n, k$  是实数, 如介质无吸收则  $K = 0$ , 又如基体是吸收的, 那末, 当我们选膜层的光学厚度所造的相位变化加上基体的相位变化为 0 或  $\pi$  时, 则由此基体和单层膜组合体的等效折射率在一个给定波长可以是实数。这样, 对单一界面垂直入射时, 反射率  $R = rr^*$ , 且

$$r = \frac{n_0 - \bar{n}}{n_0 + \bar{n}} \quad (1)$$

这里  $r^*$  表示是  $r$  的共轭复数,  $n_0$  是入射介质的折射率, 则膜层导纳定义为

$$Y = H/E \quad (2)$$

这里,  $H$  是磁场强度,  $E$  是电场强度, 两者都表示切向方向的场强复振幅。从麦克斯韦方程组可知, 如用高斯单位制则  $H/E = \bar{n}$ 。因此, 导纳等于单层介质膜的等效折射率 (此折射率用  $n$  表示)。利用对称膜系的概念。就反射方向上位相变化而言。使膜系在某一给定波长上模拟单层膜的折射率是可能的, 假如多层膜是不吸收的。那末, 这个等效折射率经常被称为赫平折射率。且当所有膜层的光学厚度是某一波长的  $\frac{\lambda_0}{4}$  倍或  $\frac{\lambda_0}{2}$  倍, 或  $k\frac{\lambda_0}{4}$  倍 ( $k$  为整数) 时, 则赫平折射率为实数。同样, 当膜层并非  $\frac{\lambda_0}{4}$ , 但是对称膜系时, 且选择从膜堆反射的合成相位差为 0 或  $\pi$  时, 这赫平折射率也可能是实数。在本文中仅研究  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜层的情况。

在折射率为  $n_s$  的基板上多层膜堆导纳由  $Y = b/a$  求出  $i \sin \delta_r / n_r$ 。这里

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \left\{ \sum_{r=1}^N \begin{bmatrix} \cos \delta_r & (i \sin \delta_r / n_r) \\ i n_r \sin \delta_r & \cos \delta_r \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

最外层膜,  $r=1$  紧贴基体的膜层  $r=N$ , 垂直入射时位相厚度  $\delta_r$  与  $r$  层折射率  $n_r$ 、几何厚度  $Z_r$ , 入射波长  $\lambda$  有关。

$$\delta_r = 2\pi n_r Z_r / \lambda_0 \quad (4)$$

假如膜层光学厚度是  $\frac{\lambda_0}{4}$  或  $\frac{\lambda_0}{2}$ , 那末,  $\delta_r$  分别为  $\frac{\pi}{2}$  或  $\pi$ 。然而,  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜层的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 1/n_r \\ i n_r & 0 \end{bmatrix}, \text{ 同样, } \frac{\lambda_0}{2} \text{ 膜层的特征矩阵为 } \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

### 减反膜

如镀有减反膜的表面没有反射光。且  $n_0 = 1$  (空气), 那末, 从等式 (1) 可知。  $Y = 1$ 。折射率  $n_L$  的  $\frac{\lambda_0}{4}$  单层减反膜有:

$$\begin{bmatrix} 0 & i/n_L \\ i n_L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i n_S/n_L \\ i n_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Y = b/a = n_L^2/n_S = 1$$

对单层全减反射膜给出了众所周知的结果  $n_L = \sqrt{n_S}$ 。

又如透射能量等于入射能量即假如  $n_0 E_0^2 = E^2 Y$ ,  $n_0 = 1$  那末, 在空气界面的场强  $E = E_0 (n_S/n_L^2)^{1/2}$ , 相类似, 在基体界面的场强  $E = E_0/n_S^{1/2}$ , 在膜层内的平均能量是  $(n_L E_0^2/2n_S)(n_S + 1)$ 。

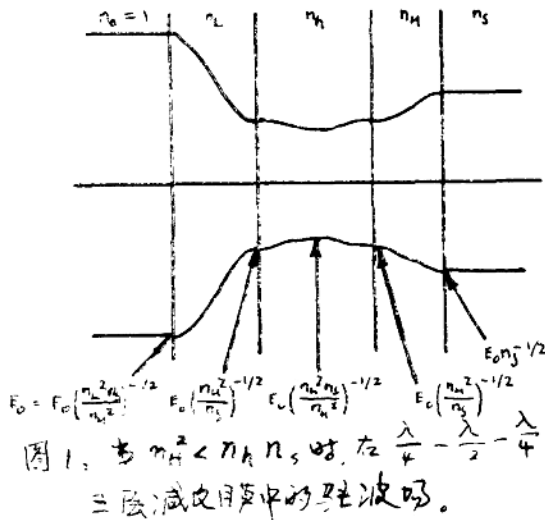
对双层  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜堆, 在表达式(3)中,  $N = 2$ , 如外层折射率  $n_L$ , 内层折射率  $n_H$ , 那末。

$$\begin{bmatrix} -n_H/n_L & 0 \\ 0 & -n_L/n_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n_H/n_L \\ -n_S n_L/n_H \end{bmatrix} \quad (6)$$

因此要使膜层具有减反作用则需

$$Y = \frac{b}{a} = \frac{n_S n_L^2}{n_H^2} = 1 \quad (7)$$

在空气——膜层界面的面的场强为  $E_0/(n_S n_L^2/n_H^2)^{1/2}$ 。在膜层——膜层界面的强度为  $E_0/(n_H^2/n_S)^{1/2}$ , 对三层  $\frac{\lambda_0}{4}$  减反膜的场强可用类似方法给出。不过, 更为普通的三层减反膜为  $\frac{\lambda_0}{4} - \frac{\lambda_0}{2} - \frac{\lambda_0}{4}$  膜系。其减反区域比  $\frac{\lambda_0}{4} - \frac{\lambda_0}{4} - \frac{\lambda_0}{4}$  膜系要宽得多。由于  $\frac{\lambda_0}{2}$  膜层的特征矩阵为单位矩阵, 因此在该层上下两个界面的场强不受其影响。不过, 在该层中心的场强为  $E_0/(n_S n_L/n_H^2)^{1/2}$  ( $n_H$  为该层折射率)。这是因将  $\frac{\lambda_0}{2}$  膜层看作为两层顺序排列的  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜层之故。且在其不同的每层中的场强分布都是正弦型的, 如图 1 所示。



单层  $\frac{\lambda_0}{4}$  减反膜的  $R$  可以用  $y$  代替等式(1)中的  $n$  求得, 所以

$$R_1 = \left( \frac{n_S - n_L^2}{n_S + n_L^2} \right)^2 \quad (8)$$

同理对双层  $\frac{\lambda_0}{4}$  减反膜或中间层为  $\frac{\lambda_0}{2}$  的三层减反膜的反射率为

$$R_2 = \left( \frac{n_H^2 - n_S n_L^2}{n_H^2 + n_S n_L^2} \right)^2 \quad (9)$$

表 1

|                                                               | 吸 收 值                 |                              | 反 射 率                       |               | 透 射 率                        |          |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------|------------------------------|----------|
|                                                               | 近似值                   | 精确值                          | 近似值                         | 精确值           | 近似值                          | 精确值      |
| 单层 $\text{MgF}_2/\text{BK}_7$                                 | $1.5 \times 10^{-5}$  | $1.3 \times 10^{-5}$         | 0.012601                    | 0.012601      | 0.987384                     | 0.987386 |
| 双层 $\text{MgF}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{BK}_7$           | $3.1 \times 10^{-5}$  | $3.0 \times 10^{-5}$         | 0.000940                    | 0.000940      | 0.999029                     | 0.999030 |
| 参层                                                            |                       |                              |                             |               |                              |          |
| $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{BK}_7$ | $7.56 \times 10^{-4}$ | $7.54 \times 10^{-4}$        | 0.000940                    | 0.000935      | 0.998304                     | 0.998311 |
| $\text{MgF}_2$                                                |                       | $\text{Al}_2\text{O}_3$      | $\text{TiO}_2$              | $\text{BK}_7$ | $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ |          |
| $n = 1.38$                                                    |                       | $n = 1.65$                   | $n = 2.25$                  | $n = 1.52$    |                              |          |
| $\beta = 0.7 \text{cm}^{-1}$                                  |                       | $\beta = 1.0 \text{cm}^{-1}$ | $\beta = 30 \text{cm}^{-1}$ |               |                              |          |

以上等式仅当假设膜层的吸收忽略不计时是正确的。

为求出膜层的吸收,可利用坡印廷定理。坡氏定理提出在介质中能量的损耗与  $nE^2$  成正比,  $n$  为介质折射率,  $E$  是介质中的电场强度。为此,在膜层中对单位入射能量的体吸收为:

$$A_r = (\beta L) \langle nE^2 \rangle_{av} / E_0^2 \quad (10)$$

$\beta$  是膜层吸收系数,  $L$  是膜层几何厚度。  $\langle nE^2 \rangle_{av}$  是膜层平均能量。除了用界面能量代替膜层中的平均能量外,在原则上界面吸收可用同样方法求得。事实上,界面吸收一定出现在界面两边极窄的区域内。这样,吸收系数沿着界面两边迅速减小。实验测出的吸收是吸收系数和沿着界面两边厚度乘积的整数倍。如重新定义界面的吸收系数是指每单位光学厚度的吸收系数,并非指每单位几何厚度。这样等式(10)中  $n$  可以放入界面吸收项中,那末,确定界面每一边所造成的局部吸收的这个疑难问题可以避免。这样,我们可以表示设计所用的材料 1 和材料 2 之间  $A_i$  界面的总吸收。

$$A_i = A_i(E/E_0)^2 \quad (11)$$

这里

$$A_i = \int_{L_1}^0 n_1 \beta_1 dL_1 + \int_0^{L_2} n_2 \beta_2 dL_2 \quad (12)$$

$A_i$  是每单位场强界面吸收值,这个参数能以量热学通过实验加以测量得到。减反膜的近似吸收值可用替代等式(10)、(11)中  $\langle E \rangle^2_{av}$  或  $E^2$  的方法获得。由于假设研究的膜系光学厚度是  $\frac{\lambda_0}{4}$ , 则单层  $\frac{\lambda_0}{4}$  减反膜吸收为:

$$A_1 = A_{OL} + \frac{\beta_L \lambda}{8n_S} (n_S + 1) + \frac{A_{LS}}{n_S} \quad (13)$$

对双层  $\frac{\lambda_0}{4}$  减反膜,则在外层(低折射率层)膜中的平均能量为:

$$\langle n_L E^2 \rangle_{av} = \frac{n_L}{2} \left( E_0^2 + \frac{E_0^2 n_S}{n_H^2} \right) = \frac{E_0^2 n_L}{2n_H^2} (n_H^2 + n_S) \quad (14)$$

同理,在里层(高折射率)膜中的平均能量为:

$$\langle n_H E^2 \rangle_{av} = \frac{n_H}{2} \left( \frac{E_0^2 n_S}{n_H^2} + \frac{E_0^2}{n_S} \right) = \frac{E_0^2}{2n_H n_S} (n_H^2 + n_S^2) \quad (15)$$

所以,双层  $\frac{\lambda_0}{4}$  减反膜吸收值  $A_2$  为:

$$A_2 = A_{OL} + \frac{\beta_L \lambda (n_H^2 + n_S)}{8n_H^2} + A_{LH} \frac{n_S}{n_H^2} + \frac{\beta_H \lambda (n_H^2 + n_S^2)}{8n_H^2 n_S} + \frac{A_{HS}}{n_S} \quad (16)$$

中间层为  $\frac{\lambda_0}{2}$  的三层膜，其吸收值将是  $A_2$  减去界面吸收  $A_{LH}$  加入  $\frac{\lambda_0}{2}$  膜层所引起的吸收。求出吸收值的过程如前，所以此三层 AR 膜吸收值  $A_3$  为：

$$A_3 = A_2 + \frac{\beta_h \lambda}{4n_S} \left( \frac{n_S^2}{n_H^2} + \frac{n_H^2}{n_L^2} \right) + \frac{n_S}{n_H^2} (A_{Lh} + A_{hH} - A_{LH}) \quad (17)$$

这里脚标 h 表示  $\frac{\lambda_0}{2}$  膜层。

这样，由  $\frac{\lambda_0}{4}$  或  $\frac{\lambda_0}{2}$  组成的减反膜近似性能现可以简单地确定。单层减反膜的反射率由等式 (8) 求出，其吸收值由等式 (13) 求出。其透射率可用 1 减去反射率和吸收值得到。即  $T = 1 - R$ 。同样地双层减反膜的反射率由等式 (9) 求出，其吸收值由等式 (17) 求出。对三层  $\left( \frac{\lambda_0}{4} - \frac{\lambda_0}{2} - \frac{\lambda_0}{4} \right)$  减反膜的反射率由等式 (9) 求出，其吸收值由等式 (17) 求出。用这些等式求出的值与精确计算机计算出的值在表 I 中列出。(该值中不包括界面吸收)。这样，运用各种不同镀膜材料制成的膜，其理论吸收值可以运用实验测量不同膜料的单层膜体吸收值、界面吸收值进行比较。上述等式可以作为求作最佳非  $\frac{\lambda_0}{4}$  减反膜的设计起点，这些非  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜系的设计常有可能利用现有的材料实现，且比  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜系更完善膜层匹配，有时利用这些等式可获得较薄的膜层。对双层膜的设计而言，则每对可利用的材料在大多数情况下都可有两种不同的设计。而且可利用舒斯特图来加以简化。一种改善三层膜性能的设计方案的简单关系是由 Baer 推导出的，这种设计在膜层的某一材料具有较大吸收系数时，相对于双层而言，可显著的减少。

#### $\frac{\lambda_0}{4}$ 膜系多层高反膜

赫平折射率概念同样可用于  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜系多层无吸收的高反膜中，其每对高低折射率  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜层 (HL 层) 的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & i/n_H \\ i/n_H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & i/n_L \\ i/n_L & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n_L/n_H & 0 \\ 0 & -n_H/n_L \end{bmatrix}$$

因此，N 对 (HL 层) 其特征矩阵是每对 (HL) 层特征矩阵的 N 次方。所以，这个多层膜堆的赫平折射率为：

$$Y = (n_H/n_L)^{2N} n_S。且反射率 R = \left[ \frac{1 - (n_H/n_L)^{2N} n_S}{1 + (n_H/n_L)^{2N} n_S} \right]^2 \quad (20)$$

在推导等式 (20) 过程中，我们已假设最外层膜是高折射率膜，贴近基体的膜是低折射率膜。如此多层膜堆是对称的，因此，最外层膜层与贴近基体的膜是高折射率膜。这样特征矩阵成为

$$\begin{bmatrix} (-n_L/n_H)^N & 0 \\ 0 & (-n_H/n_L)^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & i/n_H \\ i/n_H & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & i/n_H \left( -\frac{n_L}{n_H} \right)^N \\ i/n_H \left( -\frac{n_H}{n_L} \right)^N & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

则赫平折射率为

$$Y = n_H^{2N+2} / (n_L^{2N} n_S) \quad (22)$$

Sparks 提出了一种能估计  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜系高反膜性能的简单方法。现假设基体是一种介质，一个具有特征如图 2 所示的完善的全反射器将形成驻波。如反射率为 1，则在每对 HL 膜层的外层膜界面上场强为 0。而每对 HL 膜层之间界面的场强为最大值。在每一膜层内，场强为正弦驻波的 1/4。此驻波由两个行波组成，一个行波场强为  $E^+$ ，且由左向右前进，另一个行波场强为  $E^-$  且由右向左前进。在 HL 层与 HL 层之间界面的场强为  $E^+ + E^- = 0$  对膜层——空气界面在空气一边入射场强  $E_0^+ = 1$ ，由于镜面是全反射镜则  $E_0^- = -1$ ，所以  $E_0^+ + E_0^- = 0$  不过， $E_0^-$  是由二部分组成，一部分是由空气——膜层界面反射形成的。另一部分由通过多层膜堆返回来的那部分。令脚标 H 表示最外层膜，那末，空气一边的振幅反射系数为  $r_{OH}$ ，且  $r_{OH} = \frac{1 - n_H}{1 + n_H}$ 。从介质 1 进入空气振幅透射系数  $t_{10} = \frac{2n_H}{1 + n_H}$ ，这样，反射振幅  $E_0^-$  等于  $(-1)$  且有下式给出

$$E_0^- = -1 = 1 \times \frac{1 - n_H}{1 + n_H} + E_1^- \times \frac{2n_H}{1 + n_H} \quad (25)$$

这里， $E_0^-$  是指在最外层膜中由右向左行进波的振幅，大小为

$$E_1^- = -\frac{1}{n_H} \quad (26)$$

在介质，(即在最外层膜中)中由右向左行进波的振幅是  $E_1^+$ ，且  $E_1^+$  由透射振幅分量  $E_0^+$  和反射振幅分量  $E_1^-$  组成。

$$E_1^+ = 1 \times t_{01} + E_1^- r_{10} = \frac{2}{1 + n_H} - \frac{1}{n_H} \left( \frac{n_H - 1}{n_H + 1} \right) = \frac{1}{n_H} \quad (27)$$

在 HL 界面上由左向右行进波的振幅是不变化的，这可看作是场强矢量  $E$  是沿着切向边界情况的结果。在 HL 界面上  $E$  的平均场强是 0。在下一个 HL 对中的  $E$  振幅可用此 HL 对界面上的透射率来测定。且其值比上一个 HL 对的  $E$  振幅数值为  $n_L/n_H$  倍以下膜振幅情况类同。

### 吸收性基体

假如多层膜沉淀在金属基板上，且贴近基板的膜层厚度是不能调节使之补偿因金属基体所引起的反射相位变化，那末，此金属——膜层组合体的吸收将是以后沉淀的最初二层或三层膜层吸收的好几倍。当然，这二层或三层膜层的厚度是适当的。为了补偿这个相位差，则最初沉积的第一层介质膜的光学厚度略比  $\frac{\lambda_0}{4}$  薄或厚。由金属基体所引起的反射相位变化为  $\delta$ ，且  $\delta = +a_n^{-1} \frac{2nk_s}{n^2 - n_s^2 - k_s^2}$ 。这样，当  $n^2 > (n_s^2 + k_s^2)$ ，按笛卡尔坐标，这时  $\delta$  在第一象限，否则  $\delta$  在第二象限。在金属基体上第一层高折射率介质膜的光学厚度  $n_H L$  应选择

$$n_H L = \frac{\lambda}{4} \left( 1 + \frac{\delta}{\pi} \right) \quad (29)$$

如换低折射率介质。则

$$n_L L = \frac{\lambda}{4} \frac{\delta}{\pi} \quad (30)$$

以上任何一种情况。这些数值代入等式(3)中。这种以矩阵形式表示基体和第一层膜层组



合体的递推关系给出了复折射率金属的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} \cos \frac{2\pi}{\lambda} n_L & i \sin \frac{2\pi}{\lambda} n_L \\ i \sin \frac{2\pi}{\lambda} n_L & \cos \frac{2\pi}{\lambda} n_L \end{bmatrix} / \begin{bmatrix} 1 \\ n_S - i K_S \end{bmatrix},$$

那末, 组合体导纳

$$Y_0 = \frac{(n_S - i K_S) \cos[(2\pi/\lambda)n_L] + i \sin[(2\pi/\lambda)n_L]}{\cos[(2\pi/\lambda)n_L] + i(n_S - i K_S)/n \sin[(2\pi/\lambda)n_L]} \quad (31)$$

这里的  $n$  可以是  $n_H$  又可以是  $n_L$ 。当  $Y_0$  中的  $n_L$  用等式(29)或(30)的右边式子代替时, 则  $Y_0$  的虚数为 0。又当金属——膜层组合体构成的一般基板看作是多层膜, 这样此组合体就转变介质基板。这种介质基板的等效折射率  $n_S^+$ , 由等式(31)得出。且简化为

$$n_S^+ = \frac{n_S}{\left\{ \frac{1 \pm \cos \delta}{2} \left[ \left( \frac{n_S}{n} \right)^2 + \left( \frac{K_S}{n} \right)^2 \right] + \frac{1 \pm \cos \delta}{2} \pm \frac{K_S}{n} \sin \delta \right\}} \quad (32)$$

这里  $\delta$  由等式(28)求出的相位差。式中上下符号分别适用于低、高折射率的基板。

### 多层高反膜的体吸收

如所组成多层膜堆的膜层是有轻微吸收及少量界面吸收, 那末这个膜堆可用图 2 所示的驻波加以计算。

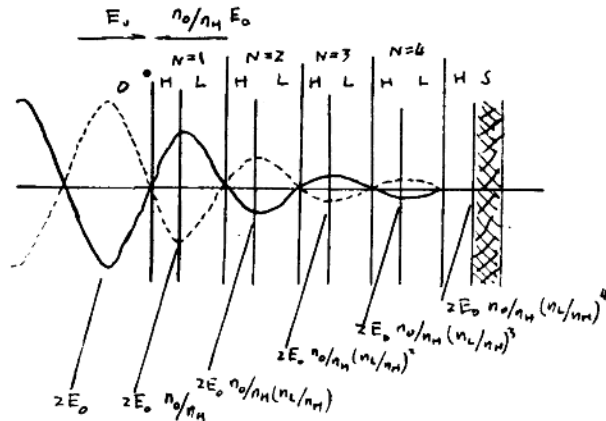


图2: 在多层全反射器中的驻波场

图 2 表示在多层膜全反射器内驻波电场分布。当基片是介质时, 那末, 在膜层——空气界面及每对 HL 层的界面场强可以忽略, 这样在镜面表面上的污染物影响可被减少到最小, 界面吸收及在交替界面上是重要的。如基片是金属, 则其最初膜层厚度必须进行修正。有关情况在文章中讨论。

首先, 研究该膜堆的体吸收, 如设低折射率膜层是均匀膜, 且体吸收系数为  $\beta_L$ , 同样高折射率膜层体吸收系数为  $\beta_H$ 。在第  $i$  膜对中低折射率膜因体吸收而被吸收的能量为  $A_L^{(i)}$ , 即

$$A_L^{(i)} = \beta_L L_L (n_L \bar{E}_i^2 / E_0^2) \quad (33)$$

其中膜层的光学厚度  $n_L L_L = \frac{\lambda}{4}$ ,  $\lambda$  是入射光的波长, 且在每一膜层中场强正弦形的分布。所以, 平均场强  $\bar{E}_i = E_{i\max} / \sqrt{2}$ 。对高折射率膜层也类似表示式。但从图 2 可知  $E_{i\max} =$

$(1/n_H)(n_L/n_H)^{2i}E$ 。因此,在第  $i$  膜层对中的吸收  $A^{(i)} = A_L^{(i)} + A_H^{(i)}$  且有下列式给出。

$$A^{(i)} = (\beta_L + \beta_H) \frac{\lambda}{4} \times \frac{1}{2} \left[ \frac{2}{n_H} \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^i \right]^2 = \frac{\lambda}{2} (\beta_L + \beta_H) \frac{1}{n_H^2} \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2i} \quad (34)$$

这样,在多层膜堆中总的吸收数  $A_v$ ,

$$A_v = \frac{\lambda}{2} (\beta_L + \beta_H) \frac{1}{n_H^2} \sum_{i=0}^N \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2i} \quad (35)$$

当  $N \rightarrow \infty$  时,运用二项式定理

$$A_{v,\max} = \frac{\lambda}{2} (\beta_L + \beta_H) \frac{1}{n_H^2 - n_L^2} \quad (36)$$

等式(36)首先由 Koppelman 以等值形式推导得到。最近, Sparks 运用类似于本文中提出的方式论证了等式(36)。这等式使我们可以预测膜层材料的体吸收系数。同样,如果面吸收(包括散射引起的吸收)可以忽略,且运用足够数量膜层使基体引起的吸收也忽略时,那末,上等式还可预测膜系极限反射率是多少。当膜层的吸收和体散射太大时,则容易看出所需的反射率是不可能得到的,如使用较少数量的膜对。那末,膜层的吸收和散射减少了,但基板引起的吸收却提高了,在这个情况中,虽然,等式(35)可用于计算多层膜的计算,但有一种更为方便的表示式。具体请参阅 Sparks 论文第五节。这里仅写出这个表示式

$$A_v = \frac{\lambda}{2} (\beta_L + \beta_H) \frac{1}{n_H^2 - n_L^2} \left[ 1 - \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N+1} \right] \quad (37)$$

### 界面吸收

在多层膜堆中一个重要的吸收说是同 HL 膜层界面有关。参见图 2。可知在外界面和每 LH 界面场强是极弱的,且在這些界面上杂质,即散射对作第一次近似总不影响薄膜的性能,不过,在 HL 界面上的杂质影响因界面上的场强是处在极大值,所以将是重要的。这样,HL 界面上的吸收可以用一种类似于计算体吸收的方法得到精确的计算,仅除了涉及到的场强是  $E_{i,\max}$  而不是  $E_i$  而已。则此“介质对”所引起的界面吸收影响

$$A_{IF} = 4A_{HL} \frac{1}{n_H^2 - n_L^2} \left[ 1 - \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N+1} \right] \quad (38)$$

这里  $A_{HL}$  是以一个光学厚度计算的界面吸收。且这界面取得足够小,此致,这足够小的界面上的场强可作为恒值。从已有的有关界面直接吸收的少量数据。作者认为所涉及的界面厚度是  $0.1\mu m$ 。同样,界面上散射引起的吸收也是十分重要的。另一个界面吸收(此吸收也许是必须研究的)为  $A_{IS}$ ,且发生在膜层——基板界面上。在当基板是金属时,这个吸收实际上是十分重要的。在基板是介质时,这吸收对大多数高反膜来说也许是可以忽略的。但对膜系整体而言,这吸收是应该注意的。如  $n_L < n_S$ , 对于  $O(HL)^{NS}$  情况。介质膜层基板界面位于波节上,在此界面上表面吸收和散射对第一级近似可以忽略不计。不过,对  $O(HL)^{NHS}$  膜,当  $n_H > n_S$  时,介质膜层基体界面位于波腹上,在这情况中,高折射率膜层贴近介质基体,那末,界面吸收为

$$A_{IS} = 4A_{HS} \frac{n_S}{n_H^2} \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} \quad (39)$$

这里  $A_{HS}$  是高折射率介质——介质基板界面的吸收。

除了多层膜或界面吸收外,有些光线也可透过膜层而进入介质基板。如贴近基板的是低折射率膜层,那末,进入基板的能量为:

$$T_L \approx \frac{4}{n_S} \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} \quad (40)$$

反之，贴近基板的是高折射率膜层，那末，进入基板的能量为：

$$T_H \approx \frac{4n_S}{n_H^2} \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} \quad (41)$$

上式对镀有适当厚度低折射率膜层金属基板能量吸收计算同样有用的，用  $n_S^+$  代替上式中  $n_S$ ，则金属基板的吸收为

$$A_S = \frac{4n_S^+}{n_H^2} \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} \quad (42)$$

此式可以与介质基体的界面吸收，（由表达式(39)求出）进行比较，这样，表达式(40)能作类似的修改。以致，可表示镀有适当高折射率膜层的金属基板的吸收。这样，镀在金属反射镜上、且第一层为调整好的低折射率的多层膜的吸收为

$$(1-R) = \left[ \frac{\lambda}{2} (\beta_L + \beta_H) + 4A_I \right] \left[ 1 - \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N+1} \times (n_H^2 - n_L^2)^{-1} + \frac{4n_S^+}{n_H^2} \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} \right] \quad (43)$$

如基板是一种介质，而其外层及贴近于基板的膜层是高折射率膜层。那末，表达式除了  $n_S$  代替  $n_S^+$  及加入  $A_{IS}$ （表达式(39)）外，表达式其余部分是相同的。如贴近介质基极是低折射率膜，则在等式(43)中最后一项变成， $(4/n_S)(n_L/n_H)^{2N}$ 。这样，我们就得到了一个简单而紧凑的通式，使我们近似地计算镀在金属基板或介质反射膜上的多层膜内的吸收值。用等式(43)进行近似计算的吸收值与精确计算的吸收值相比较的情况由表Ⅱ列出。这些计算中不包括界面吸收，同时，要注意在此表中金属基体的情况，如我们已将最后一层膜算入通常的基体中，则“膜层对”数目  $N$  必须比原来的“膜层对”数目少 1。表中的通常基体是  $\text{ThF}_4/\text{Mo}$  组合体。

### 散射光

因膜堆不均匀性，基板材料的缺陷。那末，光线能在各膜层之间、空气界面、基板界面发生光线散射效应。通常在基板中的体缺陷是能严格地控制的。这样，在未镀膜的光学玻璃中基板表面散射是起支配作用。所以选择镀膜材料标准是材料呈薄膜状时有低的体散射，在这种情况下，界面散射将支配体散射。一种检验体散射的直接方法是在基板上迅速淀积一层厚膜，且观察散射效应是提高了还是维持原状。在用这种方法的最近一次检验中，被检验的膜层材料中，有一部分材料确实是随着膜层厚度的增加而散射呈现迅速增加。但在这种情况下，界面应力使膜层产生许多微小裂缝的破裂结构，且可用显微镜观察到的。而另一个材料在厚度为  $1000 \text{ \AA} \sim 7000 \text{ \AA}$  之间，随着厚度增加而散射却不增加。上述两种情况表明：

（一）在膜层中体散射损失是少的。

（二）表面散射损失和表面细微粗糙部分不随着膜层厚度的增大而显著地增加。

第二个结论可通过电子显微镜剖面图片观察而独立地得出。

界面细微粗糙部分同样必须研究。界面散射既可由基板表面不平整部分引起（这不平整部分可用淀积膜层来很好地得到改善）又可由膜层本身形成时造成的不平整引起。假如用大的蒸发速率淀积膜层，那末，形成的膜层表面会无规则地趋向晶体状，所以，通常界面粗糙部分是造成膜层一般表面不平整部分的主要因素。但这些现象将同基板的粗糙部分

无关, 也同以前已镀好的膜层无关。在室温下将  $\text{CaF}_2$  淀积在玻璃基板上就是一个例子。这种膜层形成高散射表面。不过, 更为典型的是膜层界面的细微粗糙部分首先是由基板的细微粗糙部分决定的, 而由膜层形成时所造成的额外粗糙部分相对来说是小的。而对随膜层数目增加所引起的细微粗糙部分略为增加的情况, 一般可使膜层光学厚度为  $\frac{\lambda_0}{2}$  或  $\frac{\lambda_0}{2}$  的几倍时, 以致在膜堆中多一个界面的场强是相同的情况来加确定, 在由 Ebert 等人用这个技术所作一个例子中, 每个界面细微粗糙部分的增加大约是基板细微粗糙部分的 10%。这样, 对第一个近似式而言, 膜层的细微粗糙部分既同基板细微粗糙部分有关, 又可由基板细微粗糙部分来加以确定。

为了制成一个多层膜散射理论模型, 必须规定在不同膜层中界面细微不平整部分之间的关系。假如每层膜真正地改善在其下面表面的细微不平整部分, 那末, 在所有不同界面上的细微不平整部分是相关的。反之, 则是完全不相关的。一种十分简化实验情况的粗糙度模型是一种附加的粗糙度模型。在这种模型中每层膜层再现了基板细微粗糙度。且在每层膜中附加粗糙度与其它界面上产生的粗糙度无关。当这附加的粗糙度被置为 0 时, 则这种模型又变成了粗糙度相关模型。现已确定了多层膜系相关的、不相关的、附加的粗糙度模型的散射原理。这些原理既可用矢量原理进行描述(在矢量原理中, 相位情况和偏振效应仍保持不变)又可用标量原理进行描述, 此原理中可运用基尔霍夫衍射积分时所得到的数学式加以简化。而矢量原理则需解释角散射效应的一些细节, 这是一个十分复杂的问题, 即使用标量原理, 则对所涉及到的多层膜通常也需有一个计算机程序。不过, 如膜层是完全相关的, 则由标量原理计算出的多层膜散射值等于具有同一反射率单一表面的散射值。垂直入射时, 镜面反射率的减少  $\Delta R$  是由相关散射造成的, 当  $\sigma \ll \lambda$  时。

$$\Delta R = R_0 (4 \pi \sigma / \lambda)^2 \quad (44)$$

这里  $\sigma$  是指表面细微不平整的相对平均表面的间隙深度, 这里  $R_0$  是光滑镜面的反射率, 且对一个高反射器  $R_0$  近似等于 1。相类似情况, 垂直入射的镜面透射率减少为  $\Delta T$ , 在空气中, 镀有多层膜表面的透射率为  $T_0$  时, 则

$$\Delta T = T_0 [(2 \pi \sigma / \lambda) (n_s - 1)]^2 \quad (45)$$

而镀有减反膜的表面第一级近似而言可以是 1。这样, 每片试片的散射光近似等于  $2\Delta T$ 。且假设试片两面的细微粗糙度是相等的, 且  $\Delta R$  是被忽略不计的, 所以假设这些表面是减反的, 从等式(45)可清楚地看出, 要想尽量地减少散射光, 不仅同  $\sigma$  有关, 而且同试片的折射率有关, 应尽量地取小。如在设计波长处所采用的是  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜系, 那末, 相关的不平整度的假设同实验情况相当符合。如假定上层膜的表面细微粗糙度在所有情况下是保持不变。那末, 这种相关的不平整度的假设将预测高反膜表面散射程度比用附加的、或不相关的不平整度假设预测的高反膜表面散射程度要大。这样, 这种相关粗糙假设对分析  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜层的散射是保守的。但提供了一个估计多层高反膜散射光大小的简单方法, 这个方法毋须借助于计算机。在靠近多层膜通带或通带外面的波长处, 用其它一些模型预测了的散射相对于这个相关不平整模型来说是提高了膜层通带的精度。但本文论述的仅是光学厚度为  $\frac{\lambda_0}{4}$  的膜层。在对多层膜透射中的散射效应几乎无资料表明上述假设是适用的。再则, 在设计波长

处, 一个通带滤光片的散射效应与理论上的散射效应呈现相当好的一致性。但在通带外面都不符合, 这个例子再次强调本文所研究的问题仅涉及  $\frac{\lambda_0}{4}$  光学厚度膜层。

### 总结

上述过程中, 本文列出了一些膜层吸收、散射效应的近似式。这样, 加上从实验测量到的表示膜层材料和基板的特征的一些参数。则运用这些等式可以预计高反膜或  $\frac{\lambda_0}{4}$  减反膜的性能。这些等式相对而言是简单的, 以致在研究这些多层膜问题时不需要计算机。同时, 这些等式构成了选择膜层材料的基础, 且作为求得最佳反射率、最佳吸收值、最佳透射率或最佳激光损耗阈值的膜层设计的起点。现将这些等式总结如下:

AR 减反膜

单层膜:

$$T_1 = 1 - \left( \frac{n_s - n_L}{n_s + n_L} \right)^2 - \left[ \frac{\beta_L \lambda (n_s + 1)}{8 n_s} + A_{OL} + \frac{\Lambda_{LS}}{n_s} \right] - \left[ \frac{2 \pi \sigma (n_s - 1)}{\lambda} \right]^2 \quad (46)$$

双层膜:

$$T_2 = 1 - \left( \frac{n_s - n_s n_L}{n_H^2 + n_s n_L^2} \right)^2 - \left[ \frac{\beta_L \lambda (n_H^2 + n_s)}{8 n_H^2} + \frac{\beta_H \lambda (n_H^2 + n_s^2)}{8 n_H^2 n} + A_{OL} + \Lambda_{LH} \frac{n_s}{n_H^2} + \frac{A_{HS}}{n_s} \right] - \left[ \frac{2 \pi \sigma (n_s - 1)}{\lambda} \right]^2 \quad (47)$$

三层膜:

$$T_3 = T_2 - \frac{\beta_h \lambda}{4 n_s} \left( \frac{n_s^2}{n_H^2} + \frac{n_H^2}{n_L^2} \right) - \frac{n_s}{n_H^2} (\Lambda_{Lh} + \Lambda_{hH} - \Lambda_{LH}) \quad (48)$$

高反膜 (R 近似 1)

基板为介质, 且贴近基板的为高折射率膜层:

$$R_H = 1 - \left[ \frac{\lambda}{2} (\beta_L + \beta_H) + 4 \Lambda_{HL} \right] \left[ 1 - \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N+1} \right] \frac{1}{n_H^2 - n_L^2} - 4 \frac{n_s}{n_H^2} \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} (1 + A_{HS}) - \left( \frac{4 \pi \sigma}{\lambda} \right)^2 \quad (49)$$

这个等式同样可用于高折射率膜贴近基板的情况, 且这基板由金属及其上镀有适当厚度低折射率层的一般基板的情况。在这个情况中由等式(32)给出的  $n_s^+$  代替  $n_s$  ( $n_s^+$  为组合体阻抗)。应注意因我们已把最后一层膜计入一般基板中, 所以“膜层对”数目  $N$  应减少 1, 这对描出象图 2 一样的图是有十分帮助的, 对确定所用的正确  $N$  数目, 制定出如表 I 所用的形式膜层设计也是十分有帮助的。

基板为介质, 且贴近基板的为低折射率膜层:

$$R_L = 1 - \left[ \frac{\lambda}{2} (\beta_L + \beta_H) + 4 \Lambda_{HL} \right] \left[ 1 - \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N+1} \right] \frac{1}{n_H^2 - n_L^2} - \frac{4}{n_s} \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} - \left( \frac{4 \pi \sigma}{\lambda} \right)^2 \quad (50)$$

这个等式同样可用于低折射率膜贴近基板, 且这基板由金属及其上镀有适当厚度高折射率层的一般基板的情况, 在这情况中, 同样, 由等式(32)给出的相应形式  $n_s^+$  的代替  $n_s$ , 又因我们已把奇数膜层合并到这一般基板中, 所以, “膜层对”  $N$  数目是不变的。现将各种符号的意义表示如下:

R 反射率  
 T 透射率  
 A 吸收率  
 $\beta$  体吸收系数  
 $\lambda$  波长  
 n 折射率  
 L 低折射率膜层  
 H 高折射率膜层  
 h 半波层  
 I 界面  
 F 膜层  
 S 基板  
 O 入射介质  
 N “膜层对”数目  
 $\sigma$  粗糙度  
 $n_s^+$  基板——膜层组合体导纳(实数)

为能利用这些等式,我们必须知道用来制成膜层的材料的体吸收系数、界面吸收值、折射率大小、及表面细微粗糙度。这些参数全部可以通过实验由每一层膜层或每层表面测量决定。而知道了这些参数后、则减反膜或多层高反膜的近似性能就可进行简单地预测。

#### 补充证明:

等式(49)(50)中的 $(4\pi\sigma/\lambda)^2$ , 等式(46)(47)中的 $[2\pi\sigma(n_s-1)/\lambda]^2$  散射项是以细微不平整散射起支配作用为条件的,在紫外、可见、近红外这些假设通常是正确的,不过,在波长大于 $1\mu\text{m}$ 的红外波段处。表面污点和颗粒的散射通常起支配作用,且散射几乎成为与波长无关。〔参阅 H·E·Bennett ‘光学材料特征’一文。此文刊登在 opt,Eng<sup>17</sup>,480—488(1978)〕。这区域的全部综合散射强度通常为 $5 \times 10^{-4}$ 或更少,但这样低的散射值在某些场合下可能会显得十分重要的。定量地考虑红外散射值时,在实验上得到的总的散射值必须代替上述的分析表达式。

#### 参考文献略

译自 J. Opt. Soc. Am., Vol. 70, No 3 (1980)

沈惠源译

# 非均匀金属/介质膜选择太阳能吸收器

## 提 要

非均匀金属/介质膜已研究成功并应用于太阳能选择吸收器。这些薄膜有最好的选择吸收效用,比较适合于太阳能转换系统,非均匀膜机理简单,因此可实现自动化生产,并且是经济的。

这个器件,对太阳光谱有高度的吸收率( $\alpha$ ),对由器件工作温度所规定的黑体光谱中的红外波长有非常高的反射率(低辐射系数,  $\epsilon$ )。最好的吸收器  $\alpha \approx 90\%$  和  $\alpha/\epsilon \approx 5.4$ , 这意味几乎所有太阳入射的辐射能都被吸收,实际上,只逸出全部热黑体辐射能的 17%,但在正常情况下这部分能量全部耗损掉。这器件在入射角很大的范围内仍保持这样高的吸收效率意味不需要太阳跟踪器。许多研究者集中于研究和选择薄膜材料,这不仅是为了要得到高的  $\alpha/\epsilon$  比,亦是为了经得起周围空气的高温(450℃)以及适合于经济的不锈钢基底。

## 引 言

这篇论文叙述一种生产选择吸收表面独一无二的薄膜技术,它的特性是,在设计的工作温度下,对太阳光谱有高度的吸收率,对红外波长有很高的反射率(低辐射系数)。这样,吸收的能量不会通过热黑体辐射入大气而损耗,这器件能直接工作,像热交换器一样,传递吸收的能量到循环的冷却剂里。

这技术是利用气相混合金属中介质制成的单层非均匀膜的性质。这种技术研制的器件,其显示的特性,比得上或优于其他工艺生产的表面。这些非均匀膜太阳能吸收器显示的  $\alpha$  值相当于吸收了入射太阳能的 90% 到 95%,这器件的效率是良好的,因为收集了黑体辐射正常损耗 75% 到 80% 的能量使成为有用功。而且,这吸收器能在高温( $\sim 450^\circ\text{C}$ )中工作,实用上的热机在这种温度下的效率是非常高的。此外,这种吸收器不是干涉器件,它对入射角实际上是不灵敏的,所以不需要太阳跟踪器来调节它的效率。这种独一无二的器件的结构为选择基片和薄膜材料提供了优点以及为自动化生产提供了方便。

### 目的

这篇论文是基于国家科学基金会许可证 №: AER74—16330, 由泊金-伊尔曼公司执行的研究方案而写的,整个研究方案从 1975 年 10 月开始到 1976 年 6 月完成。这里所写的,是作者的意见,并不代表国家科学基金会。方案的目的概述如下。

泊金-伊尔曼用非均匀金属/介质膜来制备太阳能吸收器,它应有:

(1) 太阳能吸收率( $\alpha$ )大于或等于 90%,在设计的工作温度下吸收器尽可能保持高的效率(意味低辐射系数,  $\epsilon$ )

(2) 耐热性能承受 450℃ 工作温度

为了制造这些吸收器,研制了一个全自动的系统,可以自动生产,并且容量大,成本低。

## 设计

所有太阳能吸收器的涂层必须克服的问题,说明在图1上。要吸收的太阳辐照光谱,

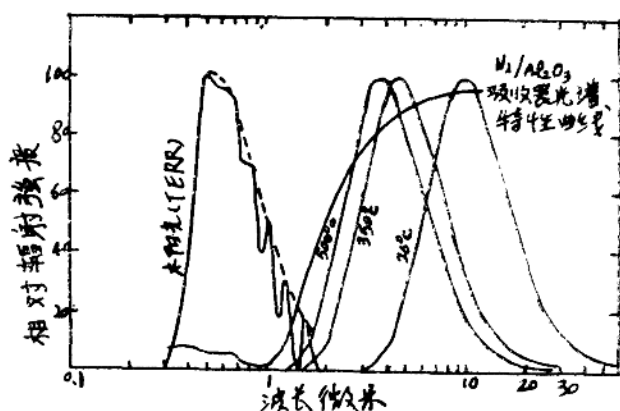


图1 太阳能吸收器反射光谱曲线,叠画在太阳辐照度和黑体发射光谱曲线上—全部归一化为100%

同三个假设的工作温度时的普朗克黑体辐射光谱,均归一化为100%,表示在同一张图上。重叠在图上的是我们设计的在450℃工作温度时的Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>非均匀吸收器的光谱反射曲线。最优的吸收器,当然在通过太阳光谱时的反射率为零,然后反射率陡峭地上升到100%而通过黑体辐射光谱。因为吸收器是不透射的,所以得到太阳辐射能100%的吸收率( $\alpha$ ),而从吸收器发出的红外热辐射率( $\epsilon$ )为0.0%。这100%的反射率自然可想像为防止了红外热辐射的逃逸而使它回到了吸收器。这样这些能量亦可以转变为有用功。吸收器的这种工作能力称为吸收器效率并用 $\alpha/\epsilon$ 来量度。这里,我们只讨论正入射的光谱效率,

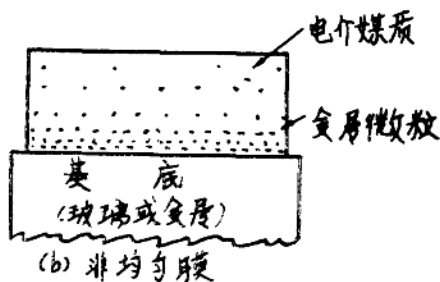
很明显,没有一种膜层能达到这样陡峭的转向,最大的效率是在较低的工作温度时得到的。但是,热交换器的卡诺效率在较高的温度时较高,所以实用上最好的吸收器是一种最能接近理想的高工作温度的器件。

过去,这种锐转变只有干涉器才能达到。像图2(a)中的多层膜结构。可是我们的非均匀膜吸收器可以得到较好的光谱特性,说明在图2(b)上。薄膜包含气相混合的金属成分和电介质成分。换句话说,金属和介质是由两个可以独立控制淀积速率的蒸发源同时蒸发淀积的。薄膜膜层的组成成份是变化的,在基底侧金属100%没有介质,到空气侧界面介质100%而没有金属。膜层断面的分布可以是任何函数,但至今只对线性函数及余弦函数进行了研究。断面分布是余弦函数得出的结果,比线性函数略好,这证明非均匀膜的淀积控制是不十分重要的。

比较这两种设计的另一个方面,由于入射的辐射能实际上只通过一个界面。所以,我们发现非均匀膜系统实际上没有干涉效应。这器件入射角在很大范围内能保持光谱的特性。所以这器件能保持完全的效率而不需要维持太阳光正入射角的跟踪系统。同样,不需要精确的监控,速率控制,分布控制等,意味着实现自动化及低成本生产是容易做到的。



(a) 多层膜结构



(b) 非均匀膜

图2 多层膜和单层非均匀膜吸收器图介



此外,不要求表面进行精确的抛光,只需对表面抛光到有高反射率(低 $\epsilon$ )。非均匀膜的应力亦是较小的。这是真实的,因为金属微粒悬浮于介质的基体内不产生大的薄膜应力,而介质用作产生低应力的厚包围层。在仅有的界面(薄膜/基底界面)薄膜的成份主要是金属。所以我们可以总结非均匀膜吸收器比多层膜吸收器有以下优点:

- 不需要精密的膜厚控制。
- 不需要太阳跟踪器,因为它具有广入射角响应。
- 不需要对基底进行高度的抛光。
- 薄膜的应力很小。
- 可提供自动化和低成本生产。

## 概念和理论基础

用非均匀膜来得到连续变化折射率的薄膜的思想已经存在了一个很长的时间以及在物理学别的领域中有类似的情况。第一个提出非均匀膜的应用是1941年的一个专利,为了制造减反射膜。杰柯松写有关于光学薄膜的应用的详细文章。

了解选择反射(或吸收)滤光片研制的一个直觉的方法,可以以研制选择透射滤光片来类推,后者现在是相对普遍的。特别是我们感兴趣于宽带滤光片,它不像窄带滤光片,而是由大量介质膜层所组成的。这种透射滤光片的一个很普遍的设计方法是设计梯度折射率,薄膜的折射率在基底表面从基底折射率 $n_s$ 开始,递减到多层膜表面入射介质的折射率 $n_0$ (或尽可能接近,因为可以得到的最低折射率为1.35)理论上的最优设计是连续梯度折射率,但这是不可能实现的,所以实际上是用阶梯多层膜。递减率可以是指函数、线性函数或任何函数,虽然指数函数是适宜的。理论是设计这些宽带梯度折射率透射滤光片的基础,包括那些熟知的膜层折射率的阻抗匹配。介质膜的折射率是实数。但是,当设计选择宽带反射滤光片时,金属膜的折射率是复数,为了获得所期望的反射金属膜必须放在多层膜之后。这些复折射率亦必须进行阻抗匹配,最好且可控制的复折射率的因素是金属薄膜。

一种解是包括阶梯梯度,设计若干金属膜,它的虚数折射率或消光系数(K)从金属的数值减小到介质的数值(基本上为零)。这是不可能得到的,因有两个理由,其一是这一问题并不是简单的像图3(a)所描述的二维问题。由于金属膜的严重色散,这问题实际上是如图3(b)所描述的是一个三维问题。于是对于任一选定的膜厚就限制了进行阻抗匹配的波长区域。第二个问题对于最外层的金属膜必须非常薄,以至任何淀积控制都无法进行。

这问题唯一实际的解是制备非均匀膜,其梯度在基底侧金属100%,到空气界面时介质100%。所以,对所有波长,实折射率和虚折射率都是连续递减的阻抗匹配如图3(b)所表示的那样。这器件在理论上是非干涉器件,但实际上由于实际折射率的终端值 $>1.0$ ,在较短的波长处有一些干涉效应。当然应该认识到,非均匀膜的梯度,仅是多层膜堆阶梯折射率当薄膜厚度无穷小时的极限。

非均匀金属介质膜的概念,是泊金-伊尔曼最初研究的,它是为了提供一种宽带高吸收镜表面,制造了一个从 $0.3\mu\text{m}$ 到 $10.0\mu\text{m}$ 范围吸收率优于95%的器件。这种要求通过控制整个膜厚来控制红外起峰点的思想,由于最近太阳能吸收器的研制方案而在实验上得