

高反射电介质多层膜折射率的测定

摘要: 本文叙述和讨论了一种方法, 根据这种方法, 可以在生产过程中从多层膜的透射系数测定中, 确定电介质薄膜的折射率, 按这种方法获得 CaF_2 , Na_3AlF_6 , MgF_2 , ThF_4 , PbF_2 , Sb_2O_3 , ZnS 和 ZnSe (这些材料的各种组合) 的折射率。结果, 与文献中所给出的数值基本一致。只有在极疏松的基膜上 (如在 CaF_2 薄膜) 所沉积的膜层, 折射率明显地偏小, 由此可以推断, 从底层向表层存在一定疏松度的过渡。

一、引言

一种蒸镀膜层的折射率 n 与大块材料的折射率有所不同; 根据不同的材料, 它们会或多或少地受到制造条件的影响。基底的结构也属这种制造条件。如果将在玻璃表面上的镀膜以另外一种基底代替玻璃面镀膜, 则会得到不同的折射率^[1]。我们所熟知的测定薄膜折射率的方法中 (F. Abelès^[2] 和 O. S. Heavens^[3] 对此也有过总结报告) 测定的是直接在基底上蒸镀膜层的折射率。本文所谈的方法有所发展, 用这种方法可通过测量多层膜而获得各单层膜的折射率, 并由此而取得计算电介质交替膜系的可靠数值。准确的折射率对于计算多层膜来说是极为重要的。多层膜中, 单层膜的光学厚度 nd 与 $m \cdot \lambda/4$ ($m=1, 2, 3 \dots$) 有出入, 如在电介质宽带反射镜 [4, 5] 和相应的干涉滤光片中 (相位的分散很大 [6, 7]); 以及在透镜范围宽的滤光片中。

二、原理

奇数 $K\lambda/4$ -多层膜 (图 1) 无损耗的反射强度 R_K , 在对波长为 λ 的垂直 λ 射光的情况下为:

$$R_K = \left(\frac{n_0^2 n_1^2 n_3^2 \dots n_{K-2}^2 n_K^2 - n_0 n_T n_2^2 n_4^2 \dots n_{K-1}^2}{n_0^2 n_1^2 n_3^2 \dots n_{K-2}^2 n_K^2 + n_0 n_T n_2^2 n_4^2 \dots n_{K-1}^2} \right)^2 \quad (1)$$

式中 n_T 为基底的折射率, n_0 为限制膜层的上方介质的折射率。

$K-1$ 层膜系亦即偶数膜系的反射等于下式:

$$R_{K-1} = \left(\frac{n_0 n_1^2 n_3^2 \dots n_{K-2}^2 - n_T n_2^2 n_4^2 \dots n_{K-1}^2}{n_0 n_1^2 n_3^2 \dots n_{K-2}^2 + n_T n_2^2 n_4^2 \dots n_{K-1}^2} \right)^2 \quad (2)$$

方程 (1) 和 (2) 可改写为:

$$R_K = \left(\frac{1-x}{1+x} \right)^2$$

$$\text{其中 } x = \frac{n_0 n_T n_2^2 n_4^2 \dots n_{K-1}^2}{n_1^2 n_3^2 \dots n_{K-2}^2 n_K^2} \quad (3)$$

$$R_{K-1} = \left(\frac{1-y}{1+y} \right)^2$$

$$\text{其中 } y = \frac{n_T n_2^2 n_4^2 \dots n_{K-1}^2}{n_0 n_1^2 n_3^2 \dots n_{K-2}^2} \quad (4)$$

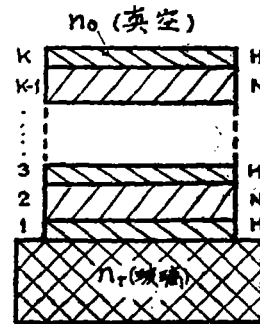


图 1 $\lambda/4$ 交替膜系的示意结构
($n_H d_H = n_N d_N = \lambda/4$)

假如奇数膜层选择高折射率的材料, 而 2、4... $K-1$ 的偶数膜层选择低折射率的材料, 那么, 对于大的膜层数来说, x 及

$y \ll 1$ ，并近似等于：

$$R_K = 1 - 4x, \quad (5)$$

$$R_{K-1} = 1 - 4y. \quad (6)$$

因为对无耗损的膜层可代以 $T = 1 - R$ ，即引出：

$$T_K = 4x \quad (7)$$

$$T_{K-1} = 4y \quad (8)$$

以方程 (7) 除 (8) 并代入 $n_0 = 1$ (真空、空气) 这样便得：

$$T_{K-1}/T_K = n_K^2 \quad (9)$$

在确定折射率时，制成两种材料的 $\lambda/4$ 交替膜层，一种是高折射的 (n_H)，另一种是低折射的 (n_N)。假如达到充分的高反射时，则再加一层高折射 $\lambda/4$ 膜层后的透射变化将为：

$$T_{K-1}/T_K = n_H^2 \quad (10)$$

而对另加一层低折射物质膜层时透射变化将为：

$$T_{K+1}/T_K = n_N^2 \quad (11)$$

基底的折射率此时并未参予，为了提高测量的精度，可将膜系最后膜层所测诸值平均。

近似式 (9—11) 只可用于高反射，也就是用于多层膜的低透射。适用于测量的膜层数通过如下的原则加以限制：即透射随着膜层数的增多而越来越小，以致最后不再能准确地测量。

从方程式 (9) 推导时看得出来，这种测定折射率的方法，也可应用于 $\lambda/4$ 变化膜层，其中各单层膜的折射率可以各异。因为一种已知材料的蒸镀膜的折射率与制作时的参数有关，所以就有可能性在不同的制作条件下，在试验过程中来确定折射率。

三、向一般膜系的推广

本文所提到的测定折射率的方法，不仅限于 $\lambda/4$ 可变膜层，对于一种任意结构的、反射很高、又有些透明的膜系，将再加一层折射率为 n_K 的介质膜。随着膜层厚度 d_K 的增加，整个系统 T_K 的透射出现最大和最小。

根据已知的多层膜系透射公式所示 (9—11)，最大透射与最小透射之比，这时近似地相等于最上层介质膜折射率 n_K 的乘方。

膜系 II 的反射和透射，对一定的波长 λ 可以用与界面 G_I 有关的复反射和透射系数

$$\gamma_I = \frac{n_0 - n_K}{n_0 + n_K}; \quad t_I = \frac{2n_0}{n_0 + n_K}; \quad (t = 1 + \gamma_I)$$

来表示 (图 2)

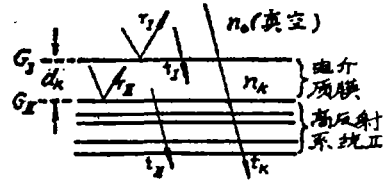


图 2 高反射膜系之上的电介质膜层

对膜层与真空之间的界面 G_I 相应的系数 γ_I 和 t_I ，都是实数，并在光垂直入射时，为非涅尔系数，并可用下式验出：

$$\gamma_I = \frac{n_0 - n_K}{n_0 + n_K}; \quad t = \frac{2n_0}{n_0 + n_K}; \quad (t = 1 + \gamma_I) \quad (12)$$

然后，由下式算出整个系统的透射系数：

$$t_K = \frac{t_I t_{II} \exp(-i\delta_K)}{1 + \gamma_I \gamma_{II} \exp(-i2\delta_K)}; \quad \text{其中 } \delta_K = \frac{2\pi}{\lambda} n_K d_K \quad (13)$$

假如 $\varphi_{II} - 2\delta_K$ 为 π 的整数倍，则透射 $T_K = |t_K|^2$ 达到峰值。设反射能力 $R_{II} = |\gamma_{II}|^2$ 很高，则通过把 (12) 式和 $|\gamma_{II}| = 1$ 代入 (13) 式，得出下式：

$$\varphi_{II} - 2\delta_K = 2m\pi; \quad T_K^{max} = \frac{|t_I|^2 |t_{II}|^2}{|1 + \gamma_I \gamma_{II}|^2} \approx |t_{II}|^2 \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{II} - 2\delta_K &= (2m+1)\pi; \\ T_K^{min} &= \frac{|t_I|^2 |t_{II}|^2}{|1 - \gamma_I \gamma_{II}|^2} \approx |t_{II}|^2 \left(\frac{n_0}{n_K}\right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ，测出最大和最小透射之比

$$T_{K+1}^{m_i} / T_{K+1}^{m_i} \approx n_K^2 / n_0^2 \quad (16)$$

有可能确定最上膜层的折射率 n_K 。

测量分两步进行，首先将上面第二层电介质膜层 $K-1$ (高反射膜系 Π) 达到这样的厚度：即该系统的透射达到极值。于是按 (14)(15) 式， $(\varphi_{11}' - 2\delta_{K-1})$ 为 π 的整数倍，而

$$\gamma_{K-1} = \frac{\gamma_2 + \gamma_1 \exp(-i2\delta_{K-1})}{1 + \gamma_1 \gamma_2' \exp(-i2\delta_{K-1})} \quad \text{为实}$$

数；也就是说，在这一特定的膜系上，反射时的相位跃迁为 0 或者是 π 。在这个系统上蒸镀上 K 层膜的试验材料，其厚度 d_K 如下选择：即透射达到最近的极值。最上膜层的光学厚度为 $n_K d_K = \lambda/4$ 。 K 层膜的极值透射率和 $(K-1)$ 层膜透射之比，按 (16) 式重新提供了最上层膜层的折射率 n_K 。

四、实验过程

a) 制作膜层

根据这种新方法，测定适于 6328 \AA (He-Ne 激光的红光) 各种不同蒸镀材料的折射率。蒸镀是在商品的镀膜装置上 (Balzers BA500) 进行该装置配备一台油扩散泵，水冷却的挡油器，以及一个泵架内的冷却筒。开泵约四十分钟后，以液氮注满冷却筒，使压力小于 $5 \cdot 10^{-6}$ 托。然后用预熔的办法使蒸镀材料除气，在压力为 1 到 $5 \cdot 10^{-6}$ 托之间开始镀膜，用平面平行的以沥青抛光的玻璃片 (反射镜玻璃 ZK07) 作为基底，玻璃的清洁按照以前讲过的方法进行 (参考文献 [12])。

因为相干长度较大，基底膜层与背面反射的激光光线产生干涉。然而，玻璃基底平行度和平面度的误差如此之大，以致使其在光束截面内有很多的最大值和最小值，并以此平衡所得出的干涉效应。相反，采用面平行板时，会出现明显的干扰。

蒸镀角约为 17° ，也就是指膜层法线与向坩埚连线之间的角度 (坩埚放置在围绕容

器轴一个圆周上)。蒸镀以高速率进行时，镀膜厚度达到 $\lambda/4$ 后，用一电动机械的挡板冲击式地迅速隔断蒸镀。其余蒸镀条件不求统一，对于各种材料的条件，见表一详指。

b) 测量设备

膜层厚度检测设备同时用来测定透射率，光源为 He-Ne 激光，输出功率 10 毫瓦，波长为 6328 \AA 。激光照射蒸镀膜近于垂直，并通过一窄带干涉滤光片 (半宽度 14 毫微米) 射落于一个硅光电管 (西门子 TP60 型) 之上。光电流通过一个高读数精度的静电检流计来测量，其内阻 ($R_i = 2$ 至 25Ω) 在全部测量范围小到以下的程度，即实际测得与光强度成比例的短路电流。

在达到透射率的最小值 (高折射材料) 和最大值 (低折射材料) 时，停止蒸镀，并测量其透射率的变化。

测量设备的直线性用一旋转的扇形挡板来检测。测量精度要在约 0.5% 内无误差。即使受到坩埚辐射光的干扰，因为激光辐射的强度较大，所以测量不受影响。在用白炽灯作为光源、倍增管作为接受器的初步试验中，既出现直线性较小的偏差，又有坩埚辐射偶然的干扰。

测量过程中，并非直接测定出多层膜的透射率，而是由于基底背面的反射，测得一偏小的值。然而，目测基底内多次反射的光束说明，这种干扰在高反射膜层情况下是可忽略不计的。

由于读数误差所产生的 T_{K-1}/T_K 和 T_{K+1}/T_K 商数的变化，估计在 $\pm 0.5\%$ 内，因此对折射率产生 $\pm 0.25\%$ 的相对误差。因为对多个测点可予以平均，则所得受透射测量所限的 (偶然的) 误差约为 $\pm 1\%$ 。

五、结 论

图 3 为折射率测定的典型示例。说明了作为用 $ZnSe$ 和 ThF_4 所镀 $\lambda/4$ 交替膜层膜数函数的 T_{K+1}/T_K 和 T_{K-1}/T_K 值。测点逐渐趋

近于极限值，达到该极限值对 ZnSe 约在第 13 层膜；对 ThF₄ 约在第 10 层膜。该极值按式 (10) 和 (11) 得出膜层折射率的乘方 n^2_{ZnSe} 和 $n^2_{ThF_4}$ 。如果用所得折射率计算出 T_{K-1}/T_K 和 T_{K+1}/T_K (未用近似法 $1-R \ll 1$) 商数的精确值，那么就得出图 3 曲线。

(未用近似法 $1-R \ll 1$) 而算得。

测量结果与一些蒸镀参数均归纳在表 1。对于各种材料组合，多次重复进行了测量，其中表现了两种折射率优于 $\pm 1\%$ 的可重复性。各种不同蒸镀的可重复性，正如它在蒸镀中所得到的那样，低于这种方法的本来测量精度。对不同蒸镀在 1% 范围内折射

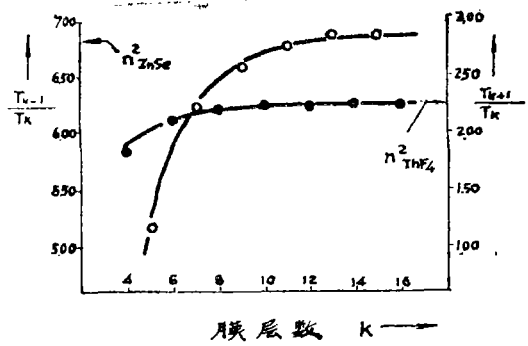


图 3 在 ZnSe-ThF₄ 交替膜系上折射率的测量 (左边为 T_{K-1}/T_K 的商数; 右边为 T_{K+1}/T_K 的商数) 曲线以 $n_{ZnSe} = 2.60$ 和 $n_{ThF_4} = 1.50$ 按 (1)、(2) 式和 $T = 1 - R$

表 1 电解质膜折射率，在 $\lambda/4$ 交替膜层所测，波长 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$

蒸镀材料	折射率 n (实测)	多层膜所用材料	疏松度	折射率 (文献值) 蒸镀膜	蒸镀速率 大块材料 (大约数)	坩锅材料
CaF ₂ (无色、单晶制作者 Schuohardt)	1.23	Zn, ZnSe	0.57	1.21—1.43 [13], [14]	1.43 [15]	90 W
Na ₃ AlF ₆ (灰—红粒状, Balzers)	1.31	ZnSe	0.88	1.30—1.35 [14], [16], [17]	1.36 [15]	40 Pt
	1.28	Sb ₂ O ₃	0.80			
MgF ₂ * (白, 粒状 Balzers)	1.33	ZnS ₃ , ZnSe	0.87	1.33—1.46 [13], [14], [16]	1.38 [15]	50 Pt
ThF ₄ * (灰—白粒状 Balzers)	1.50	ZnS ₃ , ZnSe		1.50—1.52 [13, 16, 18]		45 Pt, Mo
PbF ₂ (白, 粉状 Riedel De Haen)	1.74	Zn Se	<0.91	1.74 [19]	>1.84** [20]	10 Pt
Sb ₂ O ₃ (白、粉状 Merck)	1.96	Na ₃ AlF ₆	0.92	1.97 [21]	2.08 [20]	10 Pt
ZnS (绿—白, 粒状 Balzers)	2.35	ThF ₄ ; MgF ₂	1.00	2.30—2.33 [22]	2.35 [23]	20 Pt, Mo
	2.19	CaF ₂	0.93			
ZnSe (黄—褐, 粒状 Balzers)	2.60	Na ₃ AlF ₆ ; MgF ₂ ; ThF ₄	~1.00		2.59 [24]	3 Pt
	2.51	PbF ₂	0.97			
	2.37	CaF ₂	0.93			

表注 * 通过 X 光精细结构分析确定下来 [18] 在选用 Balzers 公司的蒸镀材料中，实在是用的 ThF₄。文献 [12] 中所说的以前的分析结论是不正确的。

** 在“美国测试与材料协会”的卡片索引中，指出有 α -和 β -PbF₂ 的两种形式，在 X 光精细结构的分析之后，这里所用的原始材料是 α PbF₂，然而，在蒸镀膜层上形成的是 β PbF₂。折射率 $n > 1.84$ 适用于 β -PbF₂。

率的变化，有可能是由于蒸镀参数无意的变化而引起的。

在大多数的镀膜材料中，进行了多种膜层组合的试验，对于绝大部分的材料。其折射率不受第二种材料的影响，这正是对其本身所希望的。对于 ZnSe 在误差为 $\pm 1\%$ 范围内，折射率为 $n=2.60$ ，不管它用 Na_3AlF_6 、 MgF_2 还是用 ThF_4 作为低折射材料。在 CaF_2 、 PbF_2 和 Sb_2O_3 的多层膜中，差别是明显的，特别是在用 CaF_2 的组合中，变化尤为特出。如参考文献[13]中说明蒸镀膜 CaF_2 的折射率，严重地受到蒸镀条件的影响，其变化处于 $n=1.43$ （大块物质）和 $n=1.21$ [13、14] 值之间。这里所制作的 CaF_2 镀层折射率 $n=1.23$ ，明显地很疏松，估计影响到其他材料与其连接的膜层中，使其有一微小的充填作用，因此，折射率也较小。用 PbF_2 和 Sb_2O_3 （表1）的膜层组合，即使是不甚明显，但也大致适于同类情况。

为了对按这种新方法测得的折射率和用其它测量方法所得的进行比较，表1中归纳了新近公布文献中的数值，其中大部分数据也是从以往的工作中摘取。除了以 CaF_2 、 PbF_2 和 Sb_2O_3 组合时所得折射率外，新的数值对目前所得结果给予有利的补充。

图4以例说明蒸镀速率对于折射率的影响。在用 ZnS 和 ThF_4 制作四分之一波长的交替膜层时，在蒸镀条件不变的情况下， ThF_4 膜的蒸镀速率为 $45 \text{ \AA}/\text{秒}$ ，在第16层降为 $17 \text{ \AA}/\text{秒}$ ，到第18层降为 $4 \text{ \AA}/\text{秒}$ 。图4清楚地表明 T_{K+1}/T_K 值在第16层到18层的下降，而在20层速率又恢复到 $45 \text{ \AA}/\text{秒}$ ，于是又达到差不多它在第14层所达到的极限值。

蒸镀速率小的时候，可期望折射率降低，蒸镀速率下降1/10，则折射率会小1%。这种相对的小变化，用这种方法是无可怀疑地表现出来。

虽然，一定的材料构成一定的疏松膜层，材料在膜的形式下的密度 Q 。与大块材

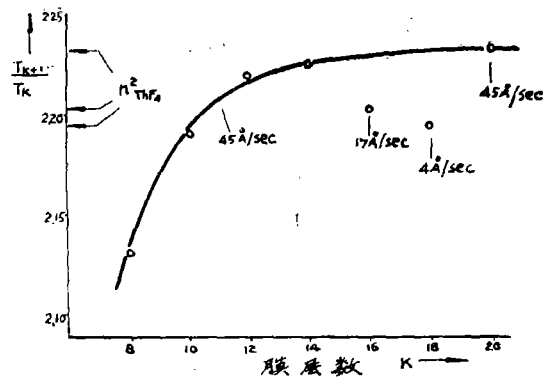


图4 蒸镀速率对 ThF_4 蒸镀膜的影响，曲线是以 $n_{\text{ZnS}}=2.35$ 和 $n_{\text{ThF}_4}=1.49$ 计算的。

料的密度 Q_m 之比，被标为疏松度 P ，而其与相应的折射率 n_s 和 n_m 通过下式连结：

$$P = \frac{Q_s}{Q_m} = \frac{n_s^2 - 1}{n_m^2 + 2} \frac{n_m^2 + 2}{n_m^2 - 1} \quad (17)$$

对于 CaF_2 ， $P=0.57$ 是从所测得的膜层折射率 $n_s=1.23$ 和大块材料的折射率 $n_m=1.43$ 得出的，也就是有膜层容积的40%以上被小气孔所占。其它所研究的材料构成较密的膜层（见表一）。

六、对方法和干扰问题的讨论

a) 未完善的镜反射的影响：

推导方程式 (14) 和 (15) 时，膜系 II 的反射振幅以 $|r_{II}|=1$ 代入。由于这里所不可少的透射率 T_{II} ，又由于吸收和散射的损失 V_{II} ，反射率 $R_{II}=|r_{II}|^2=1-T_{II}-V_{II}$ 总是小于1。如果在 (13) 式中不令 $|r_{II}|=1$ ，而假设 $1-|r_{II}|\ll 1$ ，则得 $1-|r_{II}|\approx 1/2(1-R_{II})$ 和 $n_0=1$ ，将 (12) 式代入 (14) 和 (15) 式，可近似得到下式：

$$T_K^{n_s^2}/T_K^{n_m^2} \approx n_K^2 \left[1 - \frac{n_K^2 - 1}{2n_K} (1 - R_{II}) \right] \quad (18)$$

按此方法所得折射率 $\bar{n}_{n_K} = \sqrt{T_K^{n_s^2}/T_K^{n_m^2}}$ 有些偏小，相对误差计为：

$$\Delta n_K/n_K \approx \frac{n_K^2 - 1}{4n_K} (1 - R_{II}) \quad (19)$$

对于这里所测得的折射率 $n = 1.2$ 至 2.6 ，误差 $\Delta n/n \approx -(1 - R_{II}) \cdot [0.1 \text{ 至 } 0.6]$ ，亦即 $(1 - R_{II})/2$ 数量级的误差。因此，为准确测量 $\Delta n/n \leq 1\%$ ，该方法要求以 $R_{II} \geq 98\%$ 的反射膜层作为所研究膜的基底。这一反射值用介质交替膜层在实践中可较好地达到^[12, 26]。

在折射率测定时，由于反射 R_{II} 偏小所产生的误差，当然可在已知的 R_{II} 值中（该值从透射率算出）按方程（18）进行修正。反射膜 II 除了反射值之外，无其他特性会对折射率的确定产生影响。膜层 II 的结构可以任意选择，可以是不均匀，或者部分由金属膜层构成。

b) 低吸收的影响

如果所研究的电介质膜层具有一种低的吸收能力，那么就应当在 $\delta_K = 2\pi n_K d_K / \lambda$ 中，对于 n_K 代以一个复折射率 $n_K = n_K - iK$ ；同样， $\delta_K = \delta' - i\delta''$ 也是复数，其中 $\delta'' \ll 1$ 。相反，菲涅尔系数(12)的值不会由于低吸收而产生重要的影响。如果在真空中 ($n_0 = 1$)，在 $|r_{II}| \approx 1$ 和 $\psi_{II} = 0$ 的反射镜系统 II 上，观察 $\lambda/4$ 膜层，并将 $\exp(i\delta_K) = \exp(-i\frac{\pi}{2} - \delta'') \approx (-i)(1 - \delta'')$ 以及表达菲涅尔系数的(12)式代入(13)式，那么运算的近似结果如下：

$$|t_{II}| / |t_K| \approx (1 + \delta''/n_K) n_K$$

式中 $\delta'' = \pi K / 2n_K$ (20)

所测折射率 $\bar{n}_K = |t_{II}| / |t_K|$ 在这里有些超过膜层的实际折射率 n_K ，相对误差 $\Delta n/n \approx +\delta''/n_K$ 。如果这时要求 $\Delta n/n \leq 1\%$ ，则对于 $n_K \approx 1.2$ 到 2.6 的折射率来说，必须令吸收指数为 $K \approx (1 - 4) \cdot 10^{-2}$ 并须令吸收常数 $\alpha = 2\pi K / \lambda$ (其中 $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$) $\alpha \leq (1 - 5) \cdot 10^{+2} \text{ cm}^{-1}$ 。这一条件对于电介质膜层当算在它本身的吸收范围之外时，一直是能满足的^[29]。

c) 相位条件的变化

实验中在蒸镀最上层的膜层时，测量整个系统的透射率，并在其达到极值时，停止蒸镀，这时虽可以较为精确地测得峰值 T_{K-1} ，

然而为了对之认识清楚，须略超过一些。因此，所蒸镀的膜层的厚度会稍大于 $\psi_{II}' - 2\delta_{K-1} = m\pi$ 条件所要求的厚度。

膜层折射率 n_K 的测量过程中，开始测得的峰值 T_{K-1} 虽然等于无干扰情况的值，然而，反射镜系统 II 在反射中的相位跃迁，却与 0 或 π 稍异。K 膜蒸镀时，在 $n_K d_K = \lambda/4$ 之前就达到了透射的 T_K 峰值，然而，透射系数 $|t_K|$ 的值按方程式(13)与此无关，并如同蒸镀精确的 $\lambda/4$ 膜层一样，得到相同的值 $T_K = |t_K|^2$ 。

d) 非均匀性对所研究膜层的影响

已经知道，蒸镀膜层不一定是均匀的，特别是在一层疏松膜上蒸镀较宽的膜层时，必须算到：界面产生有限厚度的过渡膜层，或者是表面膜的整个纵深形成折射率的连续变化，因此，需要检查一下，所用的折射率的测量方法是否因此而受到严重的干扰；或者，在这种非均匀膜层结构情况下，这种测量方法是否能求得折射率的平均值。

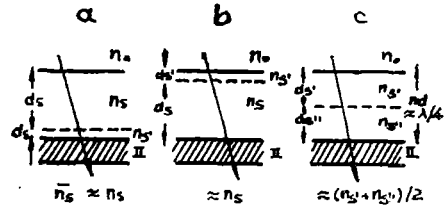


图5 在高反射的膜系 II 上，电介质的各种双膜层

为此目的，将适用于单层膜的(13)式（应用 Mayer^[13] 所提方程(166, 4; 5) 扩展到一种双层膜，并引进近似式 $|r_{II}| \approx 1$ 。然后分别观察底层膜与上层膜，上层膜与真空之间的过渡薄膜的特殊情况（图 5 a, b）并按这种方法近似地算出所期待的折射率 \bar{n}_s 。这时，实际上有一干扰的补偿过程，并为 \bar{n}_s 得出具有较大厚度 $d_s \gg d_s'$ 的膜层的折射率 n_s （直至比 $\delta_{s'} = 2\pi n_{s'} d_{s'} / \lambda$ 乘方较高级的项）。此外，也考察各具有约为 $\lambda/8$ 厚度膜层的双层膜，其折射率 $n_{s'}$ 和 $n_{s''}$ 变化很小

（下转第 47 页）

规定的透镜的半径停止作业，这样就较容易加工出高精度的透镜。

研磨盘和精磨盘使用凹型盘、以线形研磨方式进行研磨。因而以前非常需要操作者熟练与研磨盘组合，已经没有必要了，现在，即使是没有经验的人，也能从事零件生产。进行线形研磨方式时，因为和以前的机械比，不但磨盘旋转轴低，而且磨盘的加压也低、磨擦大，所以效率高，研磨作业时，透镜的偏斜度也少，能用来制作高级透镜。

用这种透镜研磨机同历来的其它种研磨机相比较一下它们的作业情况，例如，35毫米的主镜透镜，以前只贴3片，而这种透镜研磨机能贴8片以上。另外研磨时间也大大缩短，以前需要50~55分钟，而这种研磨机只需20~25分钟就可以加工完毕。零件最重要的稳定性可由原来的25%达到95%以上，

而且效率能比原来提高4~7倍左右。另外透镜加工精度，能够比效容易地把做为高级透镜值的牛顿圈控制在5道以内。

另外，除透镜研磨以外，如宝石、玻璃，塑料等球形物体，都可以加工，可以说是划时代的球面研磨机。

《规格明细表》

作业范围：	25半径—60半径
研磨盘旋转数：	150~180转/分
幅度：	750毫米
深度：	700毫米
高度：	110毫米
重量：	150公斤

译自“光学技术コンタクト”

Vol.11 1973 №9

〔宋世春译 裴玉珩校〕

(上接第39页)

(图5.c)，这种情况，该方法近似得出平均值 $\bar{n}_s \approx (n_{s'} + n_{s''})/2$ 。

计算之后可以认为：本文所谈的测定多层膜系折射率的方法，即使在复杂膜层结构的情况下，可于最上面 $\lambda/4$ 膜层内，求得折射率的平均值。另外，在垂直入射光的情况根据反射能力或透射能力，确定电介质 $\lambda/4$

单层膜的折射率时，也出现类似的平均。相反，用倾斜入射光在布儒斯特角附近工作的测量方法，容易受膜层非均匀性的严重干扰。

参考文献29种

译自“Z. angew. Phys”23 Band

1967 Heft 4.S 221—229

〔大舟译 卢寿彬 林开华校〕