

矢量图解法关于最佳激光增透膜系的分析

谭 暑 生
(国防科学技术大学)

提 要

本文指出,制备高质量的两层非 $\lambda_0/4$ 激光增透膜的主要困难,在于各基片表面状态的不一致使得底层膜的厚度不能得到一致的精确控制。本文运用矢量图解法论证了解决上述困难的关键措施是,加镀一层膜组成三层膜系,其中最底层膜的折射率要尽量接近基片的折射率。

在激光技术中应用的增透膜大多属于单一波长的窄带增透膜,一般对它们的低反射区域的宽度没有要求,但对某一特定的激光波长应具有尽可能小的反射率。特别是在小增益的弱激光器和大量大功率的强激光器的应用项目中所使用的增透膜,剩余反射率越小越好。在某些应用中,激光增透膜的质量(如剩余反射率的大小、透射率的大小、牢固性等)会成为关系整个课题成败的关键问题。

如何可靠地得到剩余反射率尽可能小的单波长激光增透膜,这就是本文要讨论的主题。

一、问题的提出

关于两层非 $\lambda_0/4$ 增透膜的基本理论是成熟的^[1~3],它适用于作激光增透膜。这种增透膜的材料折射率没有严格的要求,可以选择合适的薄膜材料,在各种基体上镀制而成。对于任一确定的可见或近红外波长,原则上说来,只要两个非 $\lambda_0/4$ 层厚度控制准确,都能够达到接近零反射的最佳效果。但是,实验表明,以单面剩余反射率小于万分之五为标准,控制片往往能达到要求,其他镀片的剩余反射率却参差不齐,有时甚至出现多数高于万分之五的情况,因而影响了成品率。这种情况的出现,不是由于薄膜材料的吸收散射损耗,而是因为控制片和其片之间以及各基片之间表面状态(主要是光洁度)的不一致使得底层膜的厚度不能得到一致的精确控制所引起的。

当薄膜材料的蒸气分子达到基体表面,并不百分之百地被吸附凝结,它们有一定的几率从基体表面反射而重新回到气相状态。如果多个分子达到表面后,集合在一起形成了稳定的凝结集团,则此后到达凝结集团附近的蒸气分子就容易凝结。在蒸发速率较低时,这种情况更为明显,即大多数蒸气分子将从基体表面返回,凝结只在凝结集团附近发生,各凝结集团逐渐扩大,以致在整个待镀表面上连结成片,则蒸气分子开始在表面上淀积成膜。但是,在蒸镀底层膜时,由于各基片表面状态的不一致,使得形成凝结集团的难易程度各异,例如,光洁度和清洁度差的基片表面上凝结集团容易形成,较早地开始淀积成膜,底层膜就镀

得厚一些,对于光洁度和清洁度好的基片,情况恰好相反。

总之,控制片和各基片表面状态的不一致使得底层膜不能得到一致的精确控制,这种差异使得一些基片镀膜后的剩余反射率大于某一数值(例如万分之五)。

解决这个问题的办法,过去一直采用的是使控制片和各基片的表面状态(光洁度、清洁度等)尽可能一致。但是,在一般的光学加工条件下,上述要求往往得不到满足。本文提出一个解决问题的新方案:最底层加镀一层 $\lambda_0/4$ 或 $\lambda_0/2$ 的低折射率膜层,组成三层膜系,使基片表面状态不一致的影响降低到最小限度。

二、矢量图解法关于两层和三层增透膜系的分析

本节运用矢量图解法^[5]讨论两层非 $\lambda_0/4$ 增透膜和三层增透膜由于底层膜厚度误差所产生的剩余反射率,以此来阐明,加镀一层 $\lambda_0/4$ 或 $\lambda_0/2$ 低折射率膜层后,究竟是什么因素使基片表面状态不一致的影响降低到最小限度。

两层非 $\lambda_0/4$ 增透膜系如图 1 所示,其中菲涅耳系数

$$r_0 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad r_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad r_3 = \frac{n_2 - n_s}{n_2 + n_s}, \quad (1)$$

式中 $n_i = n_i \cos \varphi_i$ (对于 s 偏振分量),

$n_i = n_i / \cos \varphi_i$ (对于 p 偏振分量),

$i = 0, 1, 2, s$ 。 n_0, n_1, n_2, n_s 分别表示空气,外层膜,底层膜和基片的折射率。 φ_i 表示光在相应介质中的入射角(或折射角)。在垂直入射情况下,无论对于 s 或 p 偏振分量,等效折射率 n_i 等于折射率 n_i 本身。

矢量 r_0 和 r_1, r_1 和 r_2 之间的夹角为

$$2\delta_1 = (4\pi/\lambda_0)n_1d_1 \cos \varphi_1, \quad 2\delta_2 = (4\pi/\lambda_0)n_2d_2 \cos \varphi_2, \quad (2)$$

n_1d_1 和 n_2d_2 分别表示外层膜和底层膜的光学厚度。

两层非 $\lambda_0/4$ 膜欲达到零反射(对于 $\lambda = \lambda_0$), 矢量 r_0, r_1 和 r_2 应首尾相接而封闭,构成一个三角形。以 $n_1 = 1.38$ (MgF₂), $n_2 = 2.35$ (ZnS), $n_s = 1.52$ (K₉ 玻璃) 为例,对于垂直入射情况, $r_0 = -0.16, r_1 = -0.26, r_2 = +0.214$, 可以作出图 2 (实线)。由此可量得 δ_1 和 δ_2 , 它们分别是外层膜和底层膜应镀的位相厚度。根据前节的分析, δ_2 不能得到一致的精确控制,对于 δ_1 则不存在这个困难。用 β 表示 δ_2 对准确值的偏离量,则如图 2 所示, r_2 移动到虚线位置 r'_2 , β 所引起的剩余反射率

$$R_2 = r^2 = 4r_2^2 \sin^2 \beta = 4 \left(\frac{n_2 - n_s}{n_2 + n_s} \right)^2 \sin^2 \beta. \quad (3)$$

如果加镀一层低折射率膜层,组成三层增透膜系,如图 3 所示,其中菲涅耳系数

$$r_0 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad r_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad r_3 = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}, \quad r_4 = \frac{n_3 - n_s}{n_3 + n_s}. \quad (4)$$

r_i 的意义同前。矢量 r_0 和 r_1, r_1 和 r_2, r_2 和 r_3 之间的夹角分别为

$$2\delta_1 = \frac{4\pi}{\lambda_0} n_1 d_1 \cos \varphi_1, \quad 2\delta_2 = \frac{4\pi}{\lambda_0} n_2 d_2 \cos \varphi_2, \quad 2\delta_3 = \frac{4\pi}{\lambda_0} n_3 d_3 \cos \varphi_3, \quad (5)$$

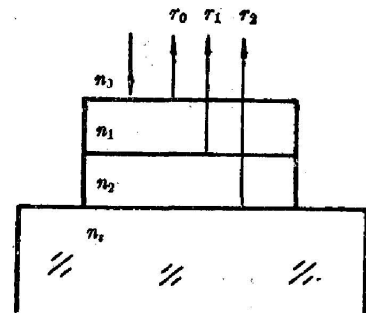


图 1

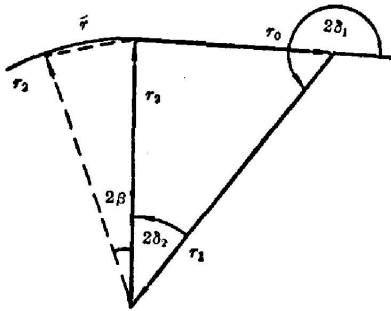


图 2

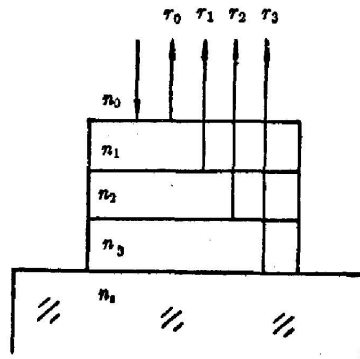


图 3

式中 n_1, n_2, n_3 和 n_s 分别表示外层膜、中层膜、底层膜和基片的折射率, $n_i d_i (i=1, 2, 3)$ 分别表示这三层膜的光学厚度。

欲使三层膜零反射(对 $\lambda = \lambda_0$), 矢量 r_0, r_1, r_2 和 r_3 必须首尾相接, 最后 r_3 的终点与 r_0 的始点重合。与两层非 $\lambda_0/4$ 增透膜的情况不同, 欲达此目的, 当各折射率给定之后, 位相厚度 δ_1, δ_2 和 δ_3 有任意多种可能的选择。但是, 当其中之一(如 δ_3)任意取定之后, 则其他两个(如 δ_1 和 δ_2)也只有两组可能的取值。

以 $n_0=1, n_1=n_3=1.38(\text{MgF}_2), n_2=2.35(\text{ZnS})$ 和 $n_s=1.52(\text{K}_9 \text{ 玻璃})$ 为例, 对于垂直入射情况, $r_0=-0.16, r_1=-0.26, r_2=+0.26, r_3=-0.048$, 并分别取 $2\delta_3 < \pi$ 的某值(即 $n_3 d_3 < \lambda_0/4$), $2\delta_3 = \pi (n_3 d_3 = \lambda_0/4)$, $2\delta_3 = 2\pi (n_3 d_3 = \lambda_0/2)$ 作图, 分别得到图 4(a), (b), (c)。这三种情况均可达到零反射。量得 δ_1 和 δ_2 (它们一般不等于 $\pi/2$, 即 $n_1 d_1$ 和 $n_2 d_2$ 一般不等于 $\lambda_0/4$), 它们就是在取定的 δ_3 下为达到零反射, 外层膜和中层膜应镀的位相厚度。

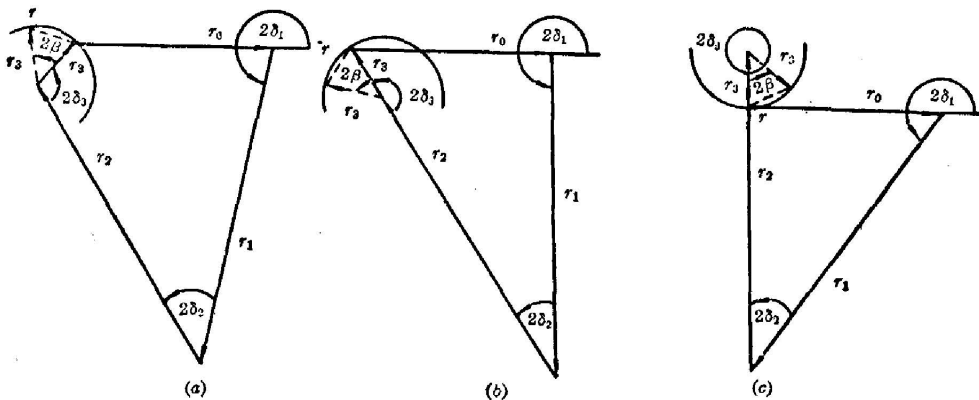


图 4

如果以 r_0 为轴, 将整个图转至 r_0 上方与图 4 对称的位置上, 则可得到关于 δ_1 和 δ_2 的另一组解。这种情况与两层非 $\lambda_0/4$ 增透膜完全类似。

现在考虑 δ_3 不能得到一致的精确控制(δ_3 对准确量的偏离量仍以 β 表示), 但是 δ_1 和 δ_2 能够得到一致的精确控制的情况。此时, 图 4(a), (b), (c) 中 r_3 (实线) 分别移动到 r'_3 (虚线) 的位置上, 反射率不再为零。三种情况下的剩余反射率均可表示为

$$R_3 = r'^2 = 4r_3^2 \sin^2 \beta = 4 \left(\frac{n_3 - n_s}{n_3 + n_s} \right)^2 \sin^2 \beta. \quad (6)$$

由(3)式和(6)式可以看出,无论是两层或三层增透膜,底层膜厚度误差 β 所产生的剩余反射率,与底层膜至基体界面的菲涅耳系数的平方成正比。为减少这种剩余反射率,底层膜的折射率应尽量接近基片的折射率,使得上述菲涅耳系数尽可能小。

是否可以取底层膜为低折射率材料,外层膜为高折射率材料,组成两层非 $\lambda_0/4$ 增透膜,以满足上述要求呢?不可能。如文献[4]所述,在 $n_1^2 > n_s, n_2^2 > n_s$ 的一般情况下,底层膜的折射率 n_2 必须大于外层膜的折射率 n_1 的 $\sqrt{n_s}$ 倍,才能得到两层非 $\lambda_0/4$ 膜的零反射解(δ_1 和 δ_2)。因此,为了使表面状态不一致的影响降低到最小限度,必须镀制三层膜,其底层膜折射率应尽量接近基片折射率。

下面举例说明各种具体情况下底层膜厚度误差 β 所产生的剩余反射率。为此引入表1(考虑垂直入射情况,并取 $n_0=1$):

表 1

增透膜系	分类号	n_s	r_2 或 r_3	R_2 或 $R_3(\%)$
两层膜系 G-ZnS-MgF ₂ $n_1=1.38, n_2=2.35$ $r_0=-0.16, r_1=-0.26$	2-1	1.46	+0.234	0.60
	2-2	1.52	+0.214	0.50
	2-3	1.54	+0.208	0.47
两层膜系 G-ZrO ₂ -SiO ₂ $n_1=1.46, n_2=1.90$ $r_0=-0.19, r_1=-0.13$	2-4	1.46	+0.131	0.19
	2-5	1.52	+0.111	0.13
	2-6	1.54	+0.105	0.12
三层膜系 G-MgF ₂ -ZnS-MgF ₂ $n_1=1.38, n_2=2.35, n_3=1.38$ $r_0=-0.16, r_1=-0.26, r_2=+0.26$	3-1	1.46	-0.028	0.008
	3-2	1.52	-0.048	0.025
	3-3	1.54	-0.054	0.032
三层膜系 G-SiO ₂ -ZrO ₂ -SiO ₂ $n_1=1.46, n_2=1.90, n_3=1.46$ $r_0=-0.19, r_1=-0.13, r_2=+0.13$	3-4	1.46	0	0
	3-5	1.52	-0.020	0.004
	3-6	1.54	-0.027	0.008
三层膜系 G-Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ -SiO ₂ *	3-7	1.62	-0.003	0.000

* 取 Al₂O₃ 的折射率为 1.61。

剩余反射率 R_2 (或 R_3)也依赖于 $\sin^2 \beta$ 。如取 $\sin^2 \beta=1$,就可以得到 β 产生的最大可能的剩余反射率。但是,这在实践上是不会出现的。表中最后一列的数据是取 $\sin^2 \beta=0.0273$ 算出的。 $\sin^2 \beta$ 的这个值使得表1中膜系(2-2)产生0.5%的单面反射率。我们的实验表明,在绝大多数情况下,实验值都小于这个值。

现在不难根据表中的数据作出两种膜系由相同的底层膜厚度误差 β 所产生的剩余反射率的相对比较。例如表1中三层膜系(3-1), (3-2), (3-3)分别与两层膜系(2-1), (2-2), (2-3)比较可得

$$\frac{R_3}{R_2} = \left(\frac{r_3}{r_2} \right)^2 = \begin{cases} 0.0143, & \text{石英玻璃,} \\ 0.0503, & \text{K}_9 \text{ 玻璃,} \\ 0.0674, & \text{水晶.} \end{cases} \quad (7)$$

表 1 中三层膜系(3-4), (3-5), (3-6)分别与两层膜系(2-4), (2-5), (2-6)比较可得

$$\frac{R_3}{R_2} = \left(\frac{r_3}{r_2}\right)^2 = \begin{cases} 0, & \text{石英玻璃,} \\ 0.0009, & \text{K}_9 \text{玻璃,} \\ 0.0044, & \text{水晶.} \end{cases} \quad (8)$$

由此可见, n_3 与 n_2 很接近的三层增透膜可以使基片表面状态不一致的影响大大降低。特别是当 $n_3 = n_2$, 这种影响则完全可以消除; 按前节定性的考虑也可以直接得到这样的结论。

由表 1 可见, 三层增透膜系 (3-1)~(3-7) 都是可以采用的激光增透膜系, 其中尤以膜系(3-4), (3-7)和(3-5)最佳。

SiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 膜牢固性好, 这也是一大优点。诚然, 镀制非 $\lambda_0/4$ 增透膜应当选用折射率稳定的薄膜材料。 ZrO_2 的折射率在蒸镀过程中与基体温度及真空度有密切关系, 镀完取出真空室与空气接触后将升高为基本相同的折射率, 这种情况将给厚度控制带来困难。如果在蒸镀过程中保持较高的基体温度和高真空度, 并固定蒸发条件不变, 上述困难是可以克服的。

关于三层增透膜系的底层膜的厚度问题, 过去人们认为两层非 $\lambda_0/4$ 增透膜的底层膜, 厚度大约只有 $\lambda_0/4$ 的 0.2, 故最后结果对此层的厚度很敏感, 若基片上先镀一层较厚的 MgF_2 衬底层, 衬底层厚取 $\lambda_0/2$ 为最好, 厚度稍差一些应该影响较小。实际上, 底层膜的厚薄对于克服表面状态不一致的影响无关紧要。例如, 若将两层非 $\lambda_0/4$ 增透膜的底层膜加厚 $\lambda_0/2$, 则一点也不能解决问题, 加镀一层折射率接近基片折射率的底层膜, 则无论厚薄, 都能收到大致相同的效果。

三、结 束 语

为了在实践上镀制出高质量的激光增透膜, 当然还要解决一系列的技术问题, 如稳定的光电反射控制法, 波长的精确控制, 膜厚的均匀性区域, 膜厚的控制和补偿, 镀盘转速的选择, 以及 MgF_2 填充密度效应等。关于这些问题, 文献[4, 6]已详细论及, 这里不拟赘述。

文献[6]已详细报道, 在水晶($n=1.543$)和 K_9 ($n=1.515$) 基片上双面蒸镀 G- MgF_2 - ZnS - MgF_2 三层非 $\lambda_0/4$ 增透膜, 其中底层膜 MgF_2 厚度 n_3d_3 取为 $\lambda_0/2$, 对于中心波长 $\lambda_0=6328 \text{ \AA}$, 用 DF 透反仪进行测量, 得到如表 2 的结果。这样, 双面镀膜后总透射率高于 99.80% 为标准, 采用上述三层膜系之后, 成品率提高了十多倍, 可达 70% 以上。

表 2

	透 过 率 T		剩余反射率 R (双面之和)	光 损 耗 α
水 晶 (λ 射角为 5°)	4#	99.90%	0.028%	0.07%
	53#	99.92%	0.020%	0.06%
K_9 玻璃 (λ 射角为 7.5° , 厚度 3 mm)	99.89%		0.026%	0.08%

本文是关于最佳激光增透膜系的一个理论分析。从这个分析得到这样的结论：加镀一层膜组成三层膜系，其中最底层膜的折射率要尽量接近基片的折射率，这是改进两层非 $\lambda_0/4$ 增透膜系，提高激光增透膜质量和成品率的关键问题。

参 考 文 献

- [1] L. A. Catalan; *J. O. S. A.*, 1962, **52**, No. 4 (Apr), 437.
- [2] G. Hass, R. E. Thun; *Physics of Thin Films*, Vol. 2, (Academic Press, New York and London, 1964), 439.
- [3] E. Wolf; *Progress in Optics*, Vol. 8, (North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1970), 201.
- [4] 谭暑生, 董淑贞; *工学报*, 1978, No. 4, 25.
- [5] H. A. 麦克劳德; *光学薄膜技术*, (国防工业出版社, 1974), 39.
- [6] 高伯龙等; *国防科技大学学报*, 1981, No. 3, 47.

Analysis of optimum laser anti-reflection coatings using vector diagram method

TAN SHUSHENG

(National Defence University of Science and Technology, Changsha)

(Received 8 June, 1983; revised 21 October 1983)

Abstract

The essential problem in producing two-layer non-quarterwave laser anti-reflection coating with minimum reflectance is pointed out in the paper. The difficulty is that the thicknesses of the lowest layers on different substrates can't be well controlled with the same accuracy because of the difference of surface states in substrate. It is demonstrated with vector diagram method that the important way to solve the difficulty mentioned above is to add a layer so as to compose three-layer anti-reflection coating, of which the lowest layer has refractive index as approximate to the index of the substrate as possible.