

## 光学薄膜减散射特性研究

潘永强, 陈 佳

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘 要:** 为了降低光学薄膜的表面散射损耗, 依据微粗糙面的一阶微扰理论, 在不考虑多重散射效应的情况下, 利用电磁场边界条件给出的光学薄膜任一界面粗糙度引起的散射场在入射介质中的表达式, 重点讨论了单层光学薄膜实现零散射的条件以及实现减散射的条件, 理论研究结果表明: 当膜层的光学厚度为  $\lambda/4$  的偶数倍时, 单层薄膜要实现减散射就必须使单层膜的折射率大于基底的折射率, 且空气-薄膜界面的微粗糙度必须小于薄膜-基底界面之间的微粗糙度。当膜层的光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍时, 单层薄膜的折射率小于基底的折射率, 且膜层两个界面的粗糙度必须满足特定条件, 才能实现减散射的效果。

**关键词:** 光学薄膜; 表面粗糙度; 减散射

**中图分类号:** O484 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0118007

## Anti-scattering properties of optical thin film

Pan Yongqiang, Chen Jia

(School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to reduce the surface scattering loss of optical thin film, the expression of interface roughness scattering field in the incident medium was given by electromagnetic field boundary conditions, without considering the effect of multiple scattering. The conditions of zero scattering and anti-scattering of single layer optical thin film were discussed. The theoretical results show that when the optical thickness of the film is an even time of  $\lambda/4$ , the refractive ratio of the single layer thin film must be bigger than the substrate refractive ratio so as to realize anti-scattering, and the air-film micro-roughness must be smaller than the film-substrate interface micro-roughness, when the optical thickness of the thin film is  $\lambda/4$  an odd number of times, single layer optical thin film to realize anti-scattering must be single-layer thin film refractive index is less than the substrate refractive index, and the air-film micro-roughness must be satisfy certain conditions.

**Key words:** optical thin film; surface roughness; anti-scattering

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-06-03

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2014JM8333); 陕西省教育厅专项科研计划(2013JK1108)

作者简介: 潘永强(1974-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事薄膜工艺与薄膜检测技术方面的研究。Email: pyq\_867@163.com

## 0 引言

光学薄膜表面微粗糙度引起的光散射是关系到光学系统损耗及噪声的一个重要而复杂的问题,它的存在会使相干光学系统的信噪比下降,并严重影响了光学薄膜器件在许多重要场合的使用,同时它也是高功率激光系统中激光损伤的重要原因之一<sup>[1-3]</sup>。目前,国外对于光学薄膜散射的研究主要有美国、法国等国家<sup>[4-5]</sup>,法国 Amra.C 等人推导出了多层膜界面粗糙度在不同相关特性下的散射的表达式;Elson.J M 等人给出了薄膜粗糙界面及介电常数不均匀时薄膜的散射表达式。国内对于光学薄膜散射的理论研究报道甚少,主要是中国科学院上海光学精密机械研究所和西安工业大学<sup>[6-8]</sup>,且对光学薄膜减散射特性的研究还未见报道,而薄膜减散射特性的研究对于制备低散射损耗的光学薄膜就有重要的理论指导意义。

光学元件表面无论是否镀膜都会使一部分入射光能量以散射光的形式损耗掉,这种散射主要包括光学元件表面微粗糙度引起的表面光散射和薄膜结构本身的缺陷引起的体散射。在薄膜沉积中膜料微粒的喷溅、基底表面的清洗等都会使薄膜的表面或界面出现一定的缺陷和微粗糙度。薄膜中的这些微粗糙度和缺陷将会使一部分入射光发生光散射。由于表面散射损耗会通常远大于薄膜的体散射损耗<sup>[9]</sup>,因此文中仅对薄膜表面或界面粗糙度引起的光散射进行分析,而不考虑到薄膜的体散射。对于每个膜层界面引起的散射光而言,如果散射光是非相干的,则总的散射强度是每个界面引起的散射光强度之和;如果散射光具有相干性,则可以根据光的干涉原理寻求一种特殊的条件,使得在一定的条件下光散射的强度为零或最小。文中正是基于这特点来研究单层光学薄膜实现减散射效果的基本条件,从而为制备低散射损耗光学薄膜提供理论依据。

## 1 光学薄膜减散射基本原理

当一束波长为  $\lambda$  的单色平行光从折射率为  $n_0$  的空气介质入射到折射率为  $n_s$  的透明基底时,在两种介质的分界面上就会产生光的反射。为了减小或消除表面反射光,最简单的方法就是在基底表面镀上一层光学厚度为  $\lambda/4$  的低折射率的薄膜,当薄膜

的折射率  $n=\sqrt{n_0n_s}$  时,在中心波长  $\lambda$  处可实现零反射,当  $n<n_s$  时,在中心波长处可实现最小的减反射。如果单层薄膜的上下表面均存在微粗糙度,如图 1 所示,界面 0 是入射介质空气和薄膜所组成的界面,其界面粗糙度为  $\sigma_0$ ;薄膜和基底构成的界面 1 的微粗糙度为  $\sigma_1$ ,且该两个界面微粗糙度所引起的光散射具有相干性。那么利用单层减反射薄膜的基本思想,就可以推导出单层膜的减散射条件。

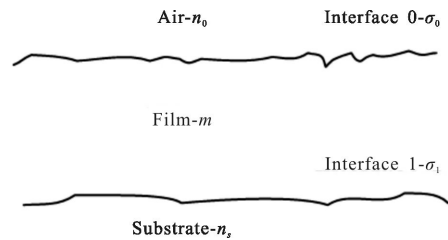


图 1 单层膜散射场计算示意图

Fig.1 Diagram of scattering field calculation of single layer thin film

## 2 光学薄膜减散射理论

依据微粗糙面的一阶微扰理论,将微粗糙度用表面电流层来表示,这样具有微粗糙度的表面就可以看作一个理想表面和其表面电流的叠加,面电流就代表了散射场的散射源。在不考虑多重散射效应的情况下,利用电磁场边界条件,可推导出单层膜任一界面粗糙度引起的散射场在入射介质中的表达式为:

$$E_i^{s-} = \frac{\delta H_i - Y_i \delta E_i}{Y_i' - Y_i} \prod_{m=1}^i \left( \cos \psi_m - i \frac{Y_{m-1}}{n_m} \sin \psi_m \right) \quad (1)$$

式中:给出了多层膜第  $i$  个边界所产生的散射场在折射率为  $n_0$  的入射介质中的散射振幅分量,其中,  $\delta H_i$  和  $\delta E_i$  是由于表面微粗糙度所引起的磁场和电场强度的非连续量;  $\psi_m = \frac{2\pi}{\lambda} d_m n_m$ , 是第  $m$  层的相位厚度。

将该式用于图 1 中的界面 0 和界面 1 可计算出这两个界面上电场的切向分量分别为:

$$E_0^{s-} = [\delta H_0 / (Y_0' - Y_0)] \cdot [\cos(2\pi nd/\lambda) - i(n_0/n) \sin(2\pi nd/\lambda)] \quad (2)$$

$$E_1^{s-} = \delta H_1 / (Y_1' - Y_1) \quad (3)$$

通过引入光学导纳  $Y$  和  $Y'$  以及磁场在微粗糙面处的切向不连续量  $\delta H$ ,则两个界面总散射场的切向分量为:

$$E_T^{s-} = E_0^{s-} + E_1^{s-} = E_1^{s-} \{ 1 + [E_0^{s-} / E_1^{s-}] \} = E_1^{(s)-} (1+X) \quad (4)$$

其中

$$X=(\sigma_0/\sigma_1)[(n^2-n_0^2)/(n_s^2-n^2)]\{\cos^2(2\pi nd/\lambda)-(n_s/n)^2 \cdot \sin^2(2\pi nd/\lambda)-i(2n_s/n)\sin(2\pi nd/\lambda)\cos(2\pi nd/\lambda)\}$$

式中： $\sigma_0$  和  $\sigma_1$  分别为单层光学薄膜界面 0 和界面 1 的表面均方根粗糙度。

### 2.1 单层光学薄膜散射为零的条件

散射损耗为零的条件就是  $X=-1$ ，但是由于  $X$  是一个虚数，因此散射场为零的唯一可能条件就是改变膜层的厚度，首先使  $X$  的虚部为零。要使  $X$  的虚部为零，就必须使膜层的厚度满足下式：

$$nd=k\lambda/4 \quad (k=1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

因此，使单层薄膜的散射为零的前提条件是膜层的厚度为  $\lambda/4$  的整数倍。其中，既是单层薄膜的中心波长，也是入射光的波长。下面按照光学薄膜的厚度的不同来进行具体的讨论。

#### 2.1.1 当膜层的厚度为 $\lambda/4$ 偶数倍时

当膜层的厚度为  $\lambda/4$  偶数倍时，单层膜两个界面的散射具有相同的振幅，且相位相反，此时，如果令：

$$X=(\sigma_0/\sigma_1) \cdot (n^2-n_0^2)/(n_s^2-n^2)=-1$$

则

$$(\sigma_0/\sigma_1)=(n^2-n_0^2)/(n_s^2-n^2) \quad (6)$$

式中：由于  $\sigma_0/\sigma_1 > 0$ ，并且  $n_0=1.0$ ，因此有  $n > n_s$ ，即光学厚度为  $\lambda/4$  的偶数倍的单层要实现减散射就必须使单层膜的折射率大于基底的折射率。又由于  $n_s > n_0$ ，从而使公式(6)小于 1，这又意味着  $\sigma_0/\sigma_1 < 1$ ，即空气-薄膜界面的微粗糙度必须小于薄膜-基底界面之间的微粗糙度。从而也可以看出，当膜层的厚度为  $\lambda/4$  的偶数倍时，只要单层膜两个界面的粗糙度满足公式(6)，就可以使单层膜的散射损耗为零。非常有意义的一点是，当膜层的厚度为  $nd=m\lambda/2$  时，这对于中心波长  $\lambda$  而言是虚设层，没有改变基底的反射率，但是如果两个界面的微粗糙度满足以上条件则可以实现减散射的效果。

#### 2.1.2 当膜层的厚度为 $\lambda/4$ 奇数倍时

当膜层的厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍时，如果令：

$$X=-(\sigma_0/\sigma_1)[(n^2-n_0^2)/(n_s^2-n^2)](n_s/n)^2=-1$$

则

$$\sigma_0/\sigma_1=(n/n_s)^2(n_s^2-n^2)/(n^2-n_0^2) \quad (7)$$

同样，由公式(7)可知，由于  $\sigma_0/\sigma_1 > 0$ ，并且  $n_0=1.0$ ，所以有  $n < n_s$ ，即当单层薄膜的光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍时，只有当单层薄膜的折射率小于基底的折射率，且薄膜的界面粗糙度满足公式(7)时才能使单层薄膜实现理想的减散射，即零散射。

由公式(7)可进一步推导出：

$$\sigma_0/\sigma_1=[(n/n_s)^2-1]/[(n_0/n)^2-1]$$

有

$$\sigma_0/\sigma_1 \leq 1 \Leftrightarrow n \geq \sqrt{n_0 n_s} \quad (8)$$

理想的单层减反射膜的条件是  $n=\sqrt{n_0 n_s}$ ，由公式(8)可知，该条件同样也是单层薄膜的理想减散射条件，即  $\sigma_0=\sigma_1$  时， $n=\sqrt{n_0 n_s}$ 。在可见光区，通常情况下  $n > \sqrt{n_0 n_s}$ ，此时减散射的微粗糙度条件变为  $\sigma_0 < \sigma_1$ ，即空气-薄膜界面的微粗糙度必须小于薄膜-基底界面之间的微粗糙度。

因此，无论单层光学薄膜的光学厚度是  $\lambda/4$  的偶数倍还是  $\lambda/4$  的奇数倍，要使单层膜的实现减散射的效果，首先要保证单层膜两个界面的粗糙度满足  $\sigma_0 < \sigma_1$ ，也就是空气-薄膜界面的微粗糙度必须小于薄膜-基底界面之间的微粗糙度。

### 2.2 单层光学薄膜减散射条件

通常，由于薄膜折射率以及薄膜上下界面的粗糙度无法满足理想减散射，即散射为零的效果。因此实际的问题就是如何依据基底、薄膜和入射介质(空气)的折射率散射关系，从而有效地控制薄膜的表面粗糙度范围，从而达到单层光学薄膜散射的最小化，即减散射的效果。

设  $E_s^{s-}$  为裸基底散射电场的切向分量，则有  $E_s^{s-} = \delta H/(Y' - Y)$ ，如果  $|[E_T^{s-}/E_s^{s-}]| < 1$ ，在垂直入射条件下将会出现一减散射效果。下面，文中从光学薄膜厚度的角度来进行讨论。

#### 2.2.1 当膜层的厚度为 $\lambda/4$ 偶数倍时

当膜层的厚度为  $\lambda/4$  偶数倍时，则有：

$$E_T^{s-}(\lambda/2)/E_s^{s-} = [1/(n_s^2 - n_0^2)][(n_s^2 - n^2) + (\sigma_0/\sigma_1)(n^2 - n_0^2)] \quad (9)$$

依据减散射的条件，就必须使  $|E_T^{s-}(\lambda/2)/E_s^{s-}| \leq 1$ ，那么就可以推出：

$$(\sigma_0/\sigma_1) \in [(n^2 + n_0^2 - 2n_s^2)/(n^2 - n_0^2), 1] \quad (10)$$

结合实际情况，仅考虑该区间的正值部分，而且

在考虑到  $n_0=1$  和  $n_s>1$  的实际情况下,要使公式(10)有解,就必须首先使  $n>n_s$ 。也就是说,在膜层的厚度为  $nd=m\lambda/2$  时,当膜层的折射率大于基底的折射率且膜层的两个界面粗糙度满足公式(10)时,就可以实现减散射的效果。同时,该区域也包含了前面在计算零散射时得到的  $\sigma_0/\sigma_1=(n^2-n_s^2)/(n^2-n_0^2)$ 。

2.2.2 当膜层的光学厚度为  $\lambda/4$  奇数倍时

当膜层的光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍,则有:

$$E_T^{(s)-}(\lambda/4)/E_S^{(s)-} = A \{ (n^2 - n_s^2) + (\sigma_0/\sigma_1) \cdot [n_s^2 - (n_0 n_s/n)^2] \} \quad (11)$$

式中:  $A = -n^2(n_0 + n_s) / [(n_s - n_0)(n_0 n_s + n^2)] < 0$ 。

同样,要实现减散射,则  $|E_T^{(s)-}(\lambda/4)/E_S^{(s)-}| \leq 1$ , 此时,可推导出:

$$\sigma_0/\sigma_1 \in \left[ \left( \frac{n}{n_s} \right)^2 \frac{n_s^2 - n^2 + (1/A)}{n^2 - n_0^2}, \left( \frac{n}{n_s} \right)^2 \frac{n_s^2 - n^2 - (1/A)}{n^2 - n_0^2} \right] \quad (12)$$

同样,仍然只考虑区间的正值部分。也就是说,对于光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍的单层光学薄膜,要实现减散射的效果,首先膜层的折射率必须满足  $n < n_s$ , 其次,但该层膜两个界面的粗糙度必须满足公式(12)的要求。该区域同时也包含了前面在计算零散射时得到的  $\sigma_0/\sigma_1 = (n/n_s)^2(n_s^2 - n^2)/(n^2 - n_0^2)$ 。

### 3 理论结果分析

依据上述的理论分析,对于折射率为 1.52 的 K9 玻璃基底而言,如果入射介质为空气,即  $n_0=1.0$ , 那么当单层光学薄膜的光学厚度为  $\lambda/4$  的偶数倍时,单层光学薄膜实现减散射的首要条件是膜层的折射率大于基底的折射率,其次是空气-薄膜界面的微粗糙度  $\sigma_0$  必须小于薄膜-基底界面之间的微粗糙度  $\sigma_1$ , 并且两界面的粗糙度之比  $\sigma_0/\sigma_1$  的范围还与膜层的折射率有关。图 2 所示为 K9 玻璃基底上膜层光学厚度为  $\lambda/4$  的偶数倍时,不同折射率的高折射率膜层实现减散射时两界面粗糙度比值范围。从图中可以看出,光学厚度为  $\lambda/4$  的偶数倍的高折射率膜层,要实现减散射,空气-薄膜界面的微粗糙度与薄膜-基底界面之间的微粗糙度的比值  $\sigma_0/\sigma_1$  必须小于 1, 即单层膜上表面的粗糙度  $\sigma_0$  必须小于下表面的粗糙度  $\sigma_1$ , 且随着膜层折射率的增加, 的上限始终为 1.0, 而下限则会逐渐增大, 即随着膜层折射率的增加, 实现减散射的  $\sigma_0/\sigma_1$  比值范围会逐渐缩小。此外,

图中折射率所对应的  $\sigma_0/\sigma_1$  比值范围标出的点和对应的数值表示该单层膜实现零散射时  $\sigma_0/\sigma_1$  的值。

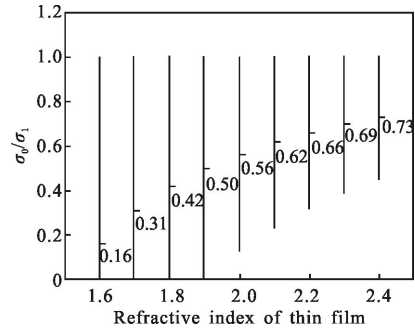


图 2 光学厚度为  $\lambda/4$  的偶数倍的高折射率膜层的折射率所对应的减散射范围

Fig.2 Refractive index vs the anti-scattering range, high index single layer film of optical thickness is an even times of  $\lambda/4$

图 3 所示为 K9 玻璃基底上膜层光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍时,不同折射率的低折射率膜层实现减散射时两界面粗糙度比值范围。从图中可以看出,光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍的低折射率膜层,实现减散射时,空气-薄膜界面的微粗糙度与薄膜-基底界面之间的微粗糙度的比值  $\sigma_0/\sigma_1$  的下限为 0, 上限随着膜层折射率的增加会逐渐降低。值得注意的是,对于折射率小于基底的单层光学薄膜而言,当空气-薄膜界面的微粗糙度  $\sigma_0$  大于薄膜-基底界面之间的微粗糙度  $\sigma_1$  时也可以实现减散射的效果。图中折射率所对应的  $\sigma_0/\sigma_1$  比值范围内标出的点和对应的数值表示该单层膜实现零散射时  $\sigma_0/\sigma_1$  的值。有趣的是,对于折射率小于基底的单层膜,当光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍时还可以实现减反射的效果。

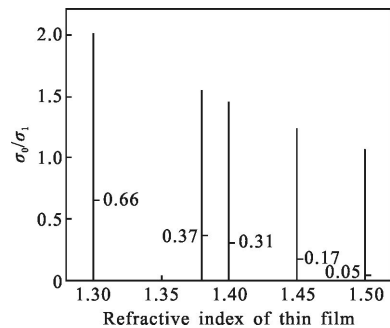


图 3 光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍的高折射率膜层的折射率所对应的减散射范围

Fig.3 Refractive index vs the anti-scattering range, low index single layer film of optical thickness is an odd times of  $\lambda/4$

## 4 结 论

单层光学薄膜为了实现减散射的效果,当膜层的光学厚度为  $\lambda/4$  的偶数倍时,单层薄膜的折射率必须大于基底的折射率,且空气-薄膜界面的微粗糙度必须小于薄膜-基底界面之间的微粗糙度,但是,空气-薄膜界面的微粗糙度与薄膜-基底界面之间的微粗糙度之比并不是越小越好,而是与入射介质、膜层以及基底的折射率有关;当空气-薄膜界面的微粗糙度与薄膜-基底界面之间的微粗糙度的比值为某特定值时,可实现背向散射为零的效果。当膜层的光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍时,为了实现减散射的效果,单层薄膜的折射率小于基底的折射率,且膜层两个界面的粗糙度必须满足特定的条件,对于折射率为 1.52 的玻璃基底而言,允许空气-薄膜界面的微粗糙度略大于薄膜-基底界面之间的微粗糙度。

## 参考文献:

- [1] Sun Tengfei, Zhang Jun, Lv Haibing, et al. Influence of optical mirror surface contaminants on laser transmission characteristics[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1444-1448. (in Chinese)  
孙腾飞, 张骏, 吕海兵, 等. 光学镜面污染对激光传输特性的影响[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1444-1448.
- [2] Bu Yikun, Zhao Li, Zheng Quan, et al. Design method of high damage threshold laser mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 183-186. (in Chinese)  
卜轶坤, 赵丽, 郑权, 等. 高损伤阈值激光反射镜的设计方法[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 183-186.
- [3] Zhang Guiyan, Yuan Hongtao, Miao Tongqun. Total integrated scatterometer for the application in optical surface roughness measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 265-269. (in Chinese)  
张贵彦, 袁宏韬, 缪同群. 一种测量光学表面粗糙度的全积分散射仪[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 265-269.
- [4] Amra C. Light scattering from multilayer optics. I. tools of investigation [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(1): 197-210.
- [5] Elson J M. Theory of light scattering from a rough surfaces with an inhomogeneous dielectric permittivity [J]. *Physical Review B*, 1984, 30(10): 5460-5480.
- [6] Hou Haihong, Shen Jian, Shen Zicai, et al. Stratified-interface scattering model for multilayer optical coatings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 1102-1106. (in Chinese)  
侯海虹, 沈健, 沈自才, 等. 光学薄膜的分层界面散射模型[J]. 光学学报, 2006, 26(7): 1102-1106.
- [7] Hou Haihong, Hong Ruijin, Zhang Dongping, et al. Total integrated scattermeter for measuring the micro-roughness of optical thin films [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(9): 1258-1261. (in Chinese)  
侯海虹, 洪瑞金, 张东平, 等. 测量薄膜微粗糙度的总积分散射仪[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1258-1261.
- [8] Pan Yongqiang, Wu Zhensen, Hang Lingxia, et al. Interface roughness of multilayer dielectric optical thin film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 433-436. (in Chinese)  
潘永强, 吴振森, 杭凌侠, 等. 多层介质薄膜膜层间界面粗糙度及光散射[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 433-436.
- [9] Pan Yongqiang, Wu Zhensen, Hang Lingxia. Polarized bidirectional reflectance distribution function by subsurface defects of optical component [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(1): 139-142. (in Chinese)  
潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 光学元件亚表面缺陷偏振双向反射分布函数[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(1): 139-142.