

# 光学薄膜界面互相关特性的确定

战元龄 王立\*  
(南开大学物理系)

## 提 要

本文实验测量了光学薄膜的散射波场分布,根据多层光学薄膜的矢量散射理论,确定了膜层界面的互相关特性。当空间频率较低时,对于膜层层数较少的膜系,膜堆内的各界面是完全相关的;若空间频率较高,则逐渐趋于部分相关模型。实验指出,膜层界面的互相关特性亦与所采用的蒸发技术有关。  
关键词: 散射; 界面; 互相关。

## 一、引 言

由于 Elson 等人的矢量散射理论的局限性,作者在文献[1]中采用薄膜光学的惯用概念,给出了多层介质膜堆散射波场的空间分布。文中运用统计学原理详细讨论了膜层界面具有完全相关、完全非相关,部分相关和单界面相关等四种互相关模型时,膜堆的微分散射特性,并得到了相应的简洁计算公式。结果表明,界面的互相关特性不同,多层介质膜堆的散射损耗可有相当大的差异。因此选择合适的互相关模型是正确计算多层介质薄膜的散射波场分布,设计低散射薄膜器件的前提。Arnon 和 Ebert 等人<sup>[2,3]</sup>在研究光学膜堆的界面散射损耗时,忽略了各膜层界面散射波场的相干作用。基于这种模型而提出的低散射损耗薄膜器件的设计方法也是不完备的。由文献[1]的有关公式亦可看出,膜堆的光学参数和各界面的微粗糙起伏共同决定其散射损耗(积分散射 TIS)的大小。不能简单地由 TIS 的大小来比较用不同膜料涂镀的单层薄膜散射特性的优劣,必须考虑光学参数的影响<sup>[4,5]</sup>。

在光学薄膜的制备过程中,由于基底表面会有不规则缺陷,更由于膜层厚度的随机起伏随工艺条件的不同而变化,因此膜层界面的互相关特性亦可具有各种不同的形式。Roche 等人<sup>[6]</sup>用积分球法测量了玻璃基底上单层 ZnS 薄膜的积分散射损耗。在与标量理论的计算结果比较之后,认为 ZnS 薄膜的上下界面是完全相关的。本文则基于光学薄膜的微分散射特性,由文献[1]的矢量散射理论,确定了单层薄膜和三层膜系膜层界面的互相关性质,及不规则缺陷的空间频率,对互相关特性的影响。初步为正确计算膜堆的散射波场分布,设计低散射损耗薄膜器件提供了实验基础。

## 二、实验装置

为了研究基底表面和多层光学薄膜的微分散射特性,我们建立了一套简易的实验装置,

收稿日期: 1988年5月23日; 收到修改稿日期: 1989年1月4日

\* 现在北京工业大学应用物理系任教。

如图 1 所示。利用此装置能够在入射面内测量薄膜样品的微分散射率 BRDF。由此便可确定膜层界面的互相关特性。光源是一输出功率为 10 mW 的外腔式 (s 偏振) He-Ne 激光器, 波长是 6328 Å。入射角和散射角均可由分光仪改装的测角仪读出, 入射角可为  $>10^\circ$  的任意角度, 散射角为  $\theta_0 + 1.5^\circ \sim 85^\circ$ 。样品上的光斑直径为 1 mm。分别采用低噪声的光电倍增管 PMT 和锁相放大器做为探测器和放大器。PMT 的散射角分辨率和立体角元分别是  $0.25^\circ$  和  $1.65 \times 10^{-4} \text{ Sr}$ 。整个系统的测量精度为 25%。这比 [7] 的约 20% 的精度略差些。

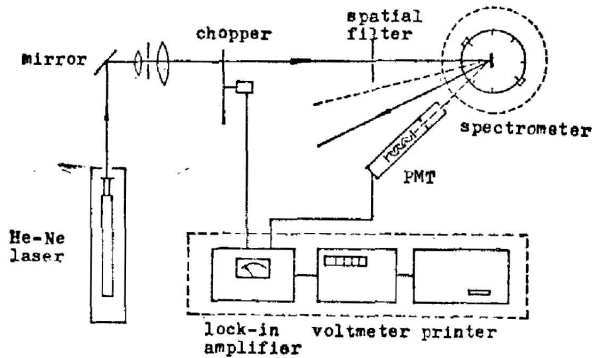


Fig. 1 Experimental set-up for measuring the differential scattering BRDF in the plane of incidence

为消除杂散光的影响, 首先测量了在不放置样品的情况下杂散光场的微分散射率, 并将其做为该装置的仪器函数。由于散射光场和杂散光场的相位关系是完全随机独立的, 测量曲线减去仪器函数与样品反射率的乘积, 即是薄膜样品的微分散射率。为避免玻璃基底第二表面的影响, 在涂镀待研究的膜堆之前, 先蒸镀一层不透明的铝膜 (约 400 Å 厚, 复折射率  $\hat{n}=1.11-i6.45$ ), 形成图 2 所示的测量结构, 由于铝膜的光学因子 ( $F=0.91$ ) 远大于玻璃基底的光学因子 ( $F=0.042$ ), 散射波场的信噪比亦会大大提高。

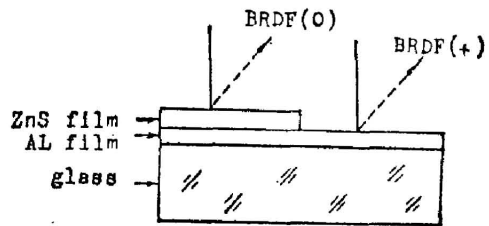


Fig. 2

### 三、实验结果及分析

由文献 [1] 可知, 膜层的光学参数, 观测条件和界面的互相关特性共同决定了多层介质薄膜的微分散射率。在完全相关, 部分相关和完全非相关等界面互相关特性的极限情况下, 微分散射率均可表示为一光学因子和界面功率谱密度函数乘积的形式。因此, 分别给出光学薄膜的微分散射率 BRDF 在几种极限情况的理论计算结果, 并与实际测量数值比较, 即可确定膜层界面的互相关特性。

图 3 是镀有铝膜的玻璃基片在镀上光学厚度为  $\frac{1}{4} \lambda$  的 ZnS 膜层后, 光学因子的理论计算曲线, 横轴坐标是空间频率  $k = (\sin \theta_s - \sin \theta_0) / \lambda = 1/d$ , 其中  $d$  是在  $\theta_0$  方向产生散射的微粗糙起伏的大小。由于纵轴采用对数坐标, 每一曲线相加一共同的功率谱密度函数, 则成为相应的微分散射率。若膜层的上下两个界面是完全相关的, 则镀膜前后的微分散射率基本不变; 若上下两界面是完全非相关的, 并具有相同的功率谱密度函数, 则镀膜后微分散射率增大近 17 倍。由于铝膜表面具有一定的不规则缺陷, 膜层界面不可能具有单界面相关模型。图 4 是由实验测量得到的铝膜表面和  $\frac{1}{4} \lambda$  ZnS 薄膜的微分散射率, 随空间频率 (即散射角) 的变化曲线。四组样品的铝膜均采用电阻加热蒸发技术制备在玻璃基片上。样品 A,

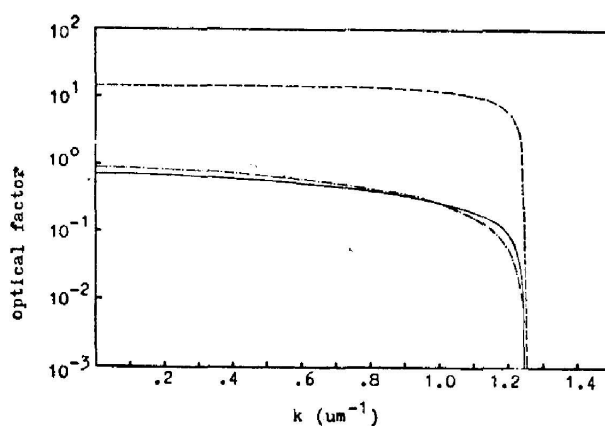


Fig. 3 Theoretical plots of optical factors versus spatial frequency for opaque aluminium film (dash-dot curves) and quarter-wave ZnS films with fully correlated (solid curves) and fully uncorrelated (dashed curves) interfaces

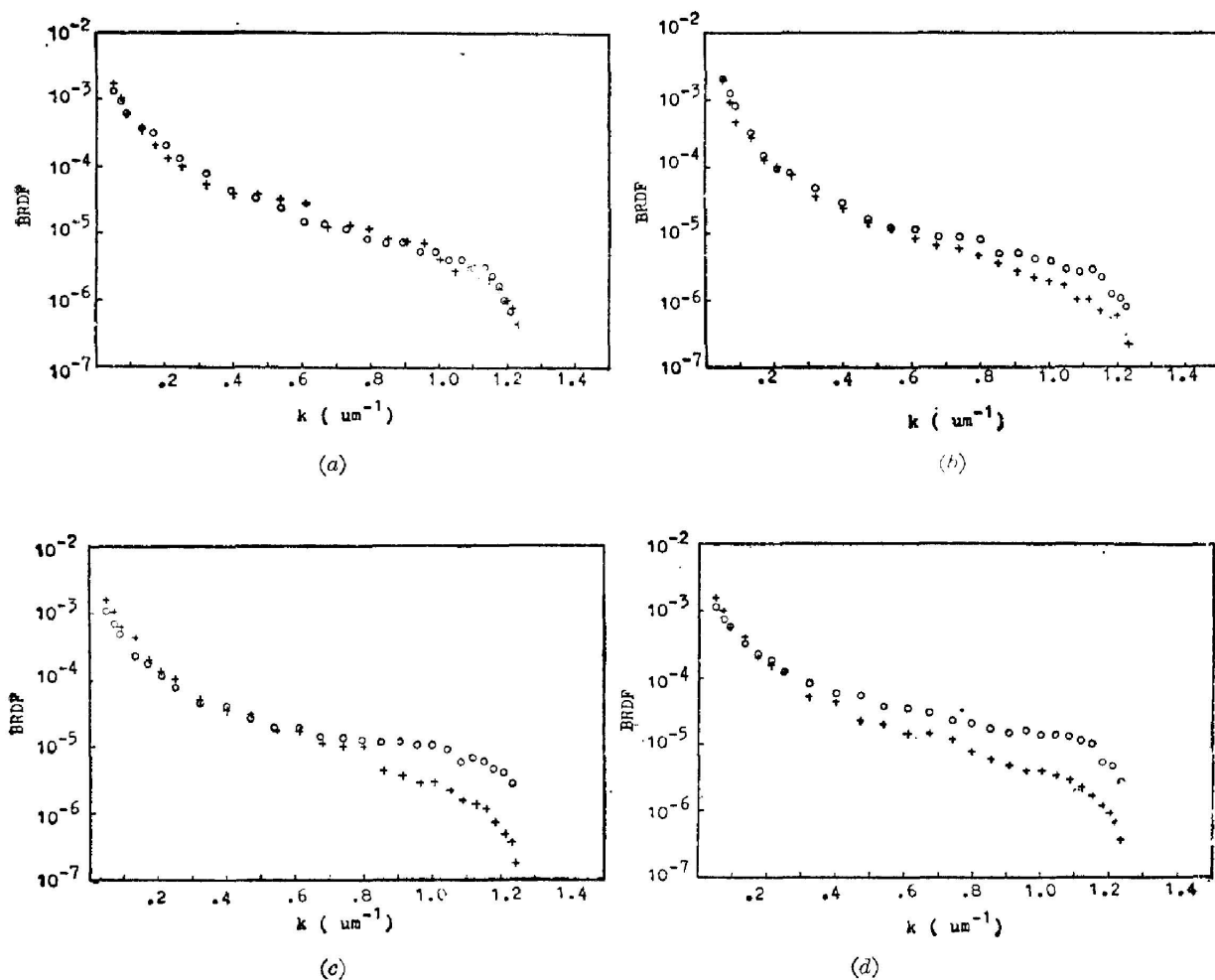


Fig. 4 Experimental plots of BRDF measurements versus spatial frequency for opaque aluminium film (+) and quarter-wave ZnS films (O). Films A, B and C, D are deposited by the electron-beam and heat vapouring techniques respectively. BRDF is taken with s-polarized light and incident angle of  $11^\circ$ .

*B* 和 *C*, *D* 的 ZnS 薄膜则是分别采用电子束蒸发技术和电阻加热蒸发技术镀制的。由这组曲线可知,当空间频率较低(微粗糙缺陷的尺寸较大)时,薄膜的微分散射率曲线与完全相关模型的结果是一致的。亦即空气-膜层界面很好地重复铝膜表面的形状。所采用的蒸发技术并不影响这种相关特性。随着空间频率的增大,样品 *A*、*B* 的 BRDF 曲线仍然基本符合完全相关模型,而样品 *C*、*D* 的 BRDF 曲线则逐渐偏离这种模型而趋于部分相关模型。显然,造成这种差异的原因是采用了不同的蒸发技术。在薄膜的生长过程中,真空-膜层界面除重复铝膜表面的形状外,由于蒸发的分子或原子在膜层表面具有有限的迁移率,因而形成的膜层厚度亦具有一随机起伏。当采用电子束蒸发技术时,膜料温度较高,被蒸发的分子或原子具有较大的动能。与基底表面的不规则缺陷相比,生长出的膜层厚度的随机起伏很小,并不破坏上下界面的一致相关特性。但是当采用热蒸发技术后,膜厚的随机起伏变大。在空间频率较高的区域,膜厚的随机起伏可与基底表面的不规则缺陷相比拟或更大,两界面的互相关特性逐渐趋于部分相关模型,致使 ZnS 薄膜的大角散射增强。

为进一步证实上述的实验结论,又采用电阻加热蒸发技术在铝膜表面涂镀了 ZnS-MgF<sub>2</sub>-ZnS 三层膜系,各层的光学厚度均为  $\frac{1}{4}\lambda$ 。该膜系光学因子的理论计算曲线如图 5 所示。若膜堆内的各个界面是完全相关的,则膜堆的与铝膜表面的 BRDF 近乎相等;若各

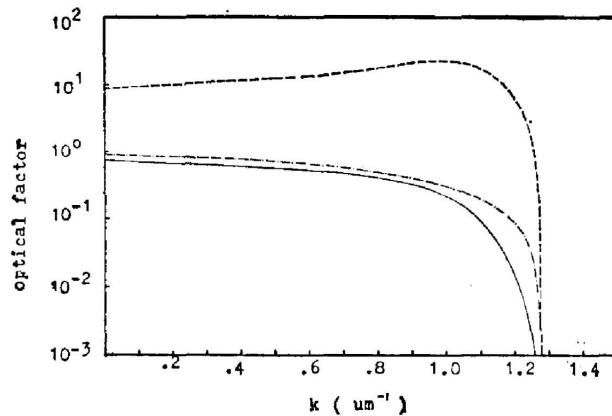


Fig. 5 Same as fig. 3 except the film stack of ZnS-MgF<sub>2</sub>-ZnS design

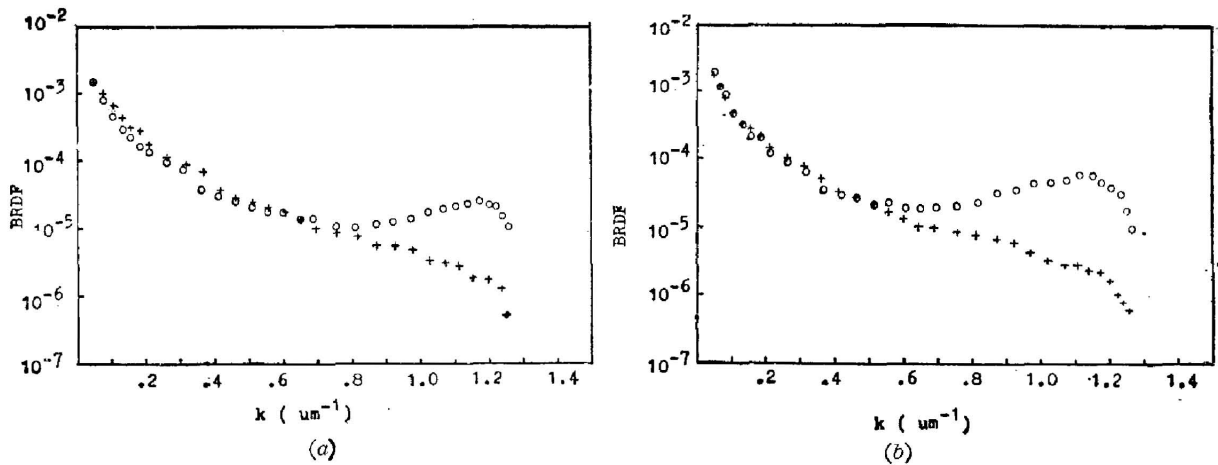


Fig. 6 Same as fig. 4 except the ZnS-MgF<sub>2</sub>-ZnS films deposited by the heat vapouring technique.

个界面是完全非相关的,并具有相同的功率谱密度函数,则 BRDF 增大近 10 倍。由实验测量得到的此种膜系的 BRDF 曲线如图 6 所示。显然,当空间频率较低时,膜系的 BRDF 与铝膜表面的基本一致,膜堆内的各个界面是完全相关的。但是随着空间频率的增大,膜层界面的互相关特性逐渐趋于部分相关模型。这主要是由各膜层厚度的随机起伏造成的。

由以上的 BRDF 测量曲线还可看出,随着空间频率的增大或散射角的增加,其微分散射率都迅速衰减,散射能量主要集中在空间频率较小的范围,亦即反射光束附近。而在此范围内,膜堆内的各膜层界面是完全相关的。因此,当膜层层数较少时,用完全相关模型计算光学薄膜的微分散射特性及积分散射更加符合实际情况。

作者在实验中得到了张铁群老师的帮助,特致谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 王立;“多层光学薄膜的矢量散射理论及实验研究”(硕士研究生论文,南开大学物理系,1987年)。
- [2] O. Arnon; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 8 (Aug), 2147~2151.
- [3] J. Ebert *et al.*; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 6 (Mar), 818~822.
- [4] 苏锴隆等;《光学学报》,1983, **3**, No. 2 (Mar), 163~168.
- [5] J. R. McNei; *et al.*; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 4 (Feb), 480~485.
- [6] P. Roche *et al.*; *J. Opt. Soc. Am.: A*, 1984, **1**, No. 10 (Oct), 1028~1031.
- [7] Y. J. Wang and W. L. Wolfe; *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**, No. 11 (Nov), 1596~1602.

## Determination of interface cross-correlation properties of optical coatings

ZHAN YUANLING AND WANG LI

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin)

(Received 23 May 1988; revised 4 January 1989)

### Abstract

Measurements have been made of the scattered field distribution of optical films. The interface cross-correlation properties have been determined according to the vector scattering theory for multilayer optical coatings. In the case of a few layer number, the interfaces in optical films are fully correlated and partially correlated respectively at the lower and higher spatial frequencies of the interface irregularity. It is shown that the interface cross-correlation properties also depend on the vapouring techniques used.

**Key words** scattering; interface; cross-correlation.