

# 亚波长周期结构与多层增透膜反射特性的比较

鱼卫星, 卢振武, 王 鹏, 翁志成

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为解决光学系统中普遍存在的菲涅耳反射问题, 利用严格耦合波法设计、分析了一种三维轮廓亚波长结构, 然后把计算结果同多层反射膜的增透特性进行了比较, 结果表明该结构在很宽的波段上尤其是远红外波段上的抗反射特性要远远好于多层膜, 其反射率基本上能控制在 0.2% 以内; 并且这种结构反射率的变化随入射光波入射角的偏离在 40° 以内能保持在 1% 以下, 而多层膜只能在 30° 以内勉强做到这一点。

**关键词:** 耦合波; 亚波长; 多层增透膜

**中图分类号:** O 484.4 **文献标识码:** A

## 1 引言

菲涅耳反射对许多光学系统来说都是一个非常不利的因素, 尤其是红外光学系统。在这些系统中通常使用的材料为硅片, 而硅片在不考虑吸收时对垂直入射平面波的反射率达到 30% 以上, 使得红外光学系统的光接收能力大大地降低, 从而影响了观测等功能的实现。一般来说, 对这种影响的消除是通过在光学元件的表面镀多层增透薄膜来实现的。然而镀膜所涉及工艺的复杂性和该过程中所发生的各种物理、化学效应的影响都会对多层膜带来各种不利因素。首先由于自然界中可供选择的材料是如此的有限, 以致于人们总不能实现完全消除反射这种理想情况。况且, 由于随着所镀多层膜膜厚的增加, 会使得膜系中出现较大的张应力或者压应力, 这样一来就会导致膜层中出现云片状的裂纹甚至有时使得膜从衬底上剥落<sup>[1]</sup>。另外, 薄膜有时在高温下或很低温度下应用, 或被暴露于温度突变的环境中应用, 而温度的变化造成膜的可逆变化与不可逆变化会导致介质膜及金属膜的折射率或电导率的改变。还有, 当薄膜工作在湿度大的环境如热带气候地区或海上时, 吸湿的膜料在潮湿条件下会迅速变质, 吸收水分膨胀的绝缘材料会造成物理强度减小和其他一些重要物理性质的变化。最后, SO<sub>2</sub> 或 H<sub>2</sub>S 等气体

对膜层的化学侵蚀以及高温时相邻薄膜材料之间的化学反应也是薄膜应用的一个不利因素<sup>[2]</sup>。所有这些不利条件都使得薄膜的应用受到了很大的限制。近来随着微光学技术的飞速发展, 使得人们可以得到微米级甚至是小于微米级的线宽, 这样就出现了所谓的亚波长结构元件。这种结构是通过激光直写、离子束刻蚀机等装置在光学系统的表面加工出位相具有二元变化的表面浮雕结构。这种结构具有同光学系统共形、轻便、且几乎不受外界环境因素的影响的诸多优点。对于这种元件来说由于其周期小于入射波长, 所以通常情况下的标量衍射理论已不能适用, 取而代之的是矢量衍射理论。一般来说对这种结构的计算方法分为积分法和微分法, 而耦合波法属于微分法。

本文设计了一种简单锥形轮廓的亚波长二维表面浮雕结构, 然后采用严格的耦合波法对其衍射特性进行了矢量分析, 最后同多层膜反射系统进行了比较, 结果表明这种结构在很宽的波段上基本上可以完全消除菲涅耳反射。

## 2 理论模型及计算结果同多层膜的比较

为计算方便起见, 本文建立的理论模型如图 1 所示。各变量意义分别为:  $T_x$  和  $T_y$  分别表示  $x$  和  $y$  方向上周期的长度,  $l_x(n)$  和  $l_y(n)$  分别表示第  $n$  层  $x$  和  $y$  方向上的归一化(用周期归一化)的

占空比,  $h$  为每层的高度,  $n_i$  和  $n_s$  分别为入射空间和基底的折射率。而关于耦合波的详细论述已有很多文章发表<sup>[6-7]</sup>, 本文不再赘述。如下给出模拟计算得出该种结构的矢量衍射特性曲线并同多反射膜系的反射特性加以比较。

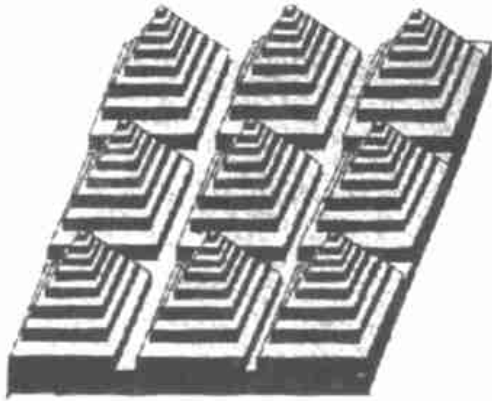


Fig 1 Diagram of multi-step structure

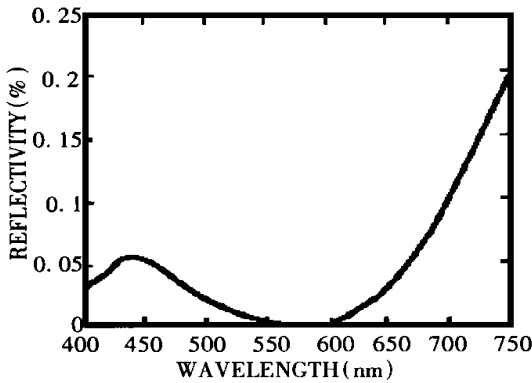


Fig 2 Relation between reflectivity and incident wave of fifteen-step two-dimensional surface-relief structure. Each parameter:  $n_i = 1.0, n_s = 1.5, T_x = T_y = 0.396 \mu\text{m}, h = 0.02 \mu\text{m}, l_x(n) = l_y(n) = n/15$ .

图 2 和图 3 分别为两种系统在可见光波段上的反射率变化曲线。其中图 3 为由 Shadbolt 制出的冕牌玻璃上的四层减反射镀层<sup>[6]</sup>。从图 2 的曲线可见对于亚波长锥形结构来说在整个 400-700nm 波段上其反射率都低于 0.2%, 而从图 3 可知这种四层减反射镀层只是在 450nm 和 720nm 两个波长附近很小的波段上低于 0.2%。两者相比较, 可以明显地看出这种亚波长结构的优势是特别明显的。

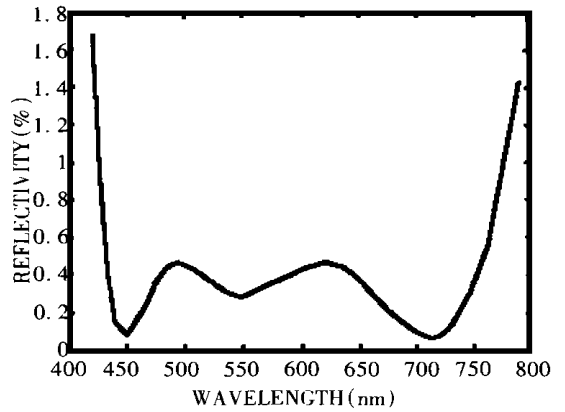


Fig 3 Relation between reflectivity and incident wave of four-layer film.  $n_0 = 1, n_1 = 1.38, h_1 = 101.9 \text{ nm}, n_2 = 2.3, h_2 = 119.6 \text{ nm}, n_3 = 1.63, h_3 = 84.4 \text{ nm}, n_4 = 1.38, h_4 = 101.9 \text{ nm}, n_g = 1.52$

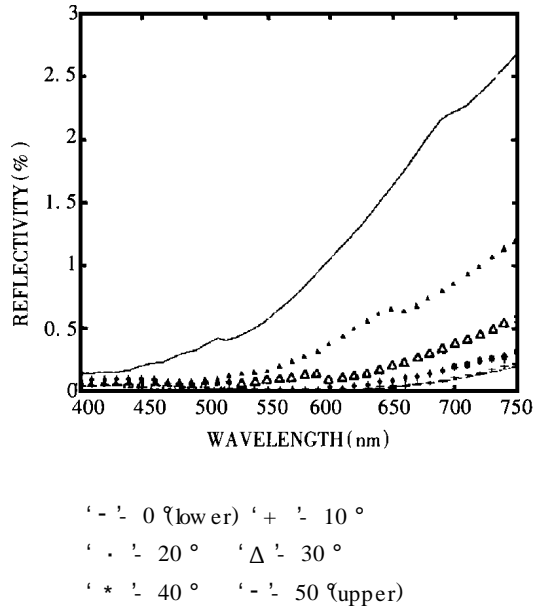


Fig 4 Dependence of reflectivity on tilted incident plane wavelength for subwavelength structure

图 4 和图 5 分别为两种结构在光束斜入射时的反射率变化曲线。由图 4 和图 5 的比较可知, 当入射角度增大时, 对亚波长结构来说入射角在 40° 以内反射率基本上都控制在 1% 以内, 而多层膜系在 30° 度以内才能保证反射率不致过多地超出 1%。由此可见, 亚波长结构在光束斜入射时在较大的角度范围内(如 40° 内)能作到反射率不致变化很多(如 1%)。

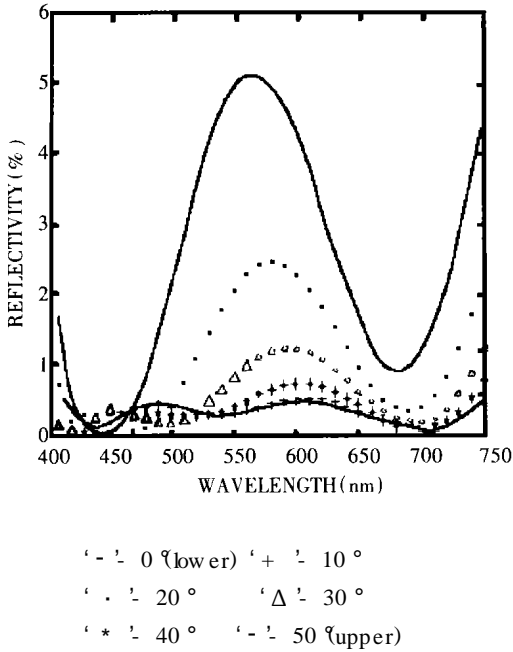


Fig 5 Dependence of reflectivity on tilted incident plane wavelength for multilayer-thin-film system

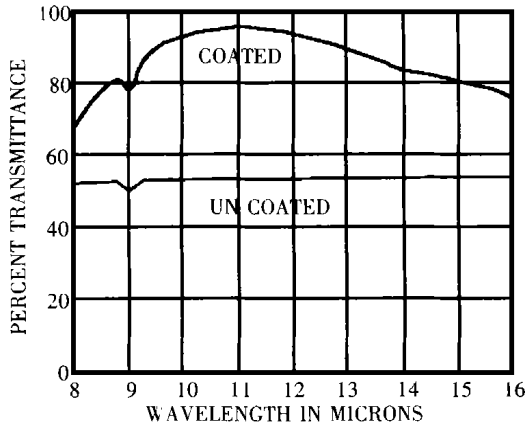


Fig 6 Transmittance of a silicon plate with antireflection coating of MgF<sub>2</sub> ( $nt = \lambda/4$  at  $3\mu$ ) + ZnS ( $nt = \lambda/4$  at  $6\mu$ ).

图 6 为由 J. T. Cox 设计的用于远红外波段的镀有抗反射膜的硅片<sup>[7]</sup>。由图可知该膜系只是

在  $11\mu\text{m}$  处透射率可以达到 90% 多, 而当偏离  $11\mu\text{m}$  时透射率下降地很快。图 7 为刻有亚波长锥形轮廓周期结构硅片的反射率在远红外波段的变化曲线。由图可见在整个远红外波段透射率都在 99% 以上, 几乎完全消除了菲涅耳衍射的影响。由此可见, 在远红外波段这种结构的抗反射特性是多层抗反射膜系所无法比拟的。

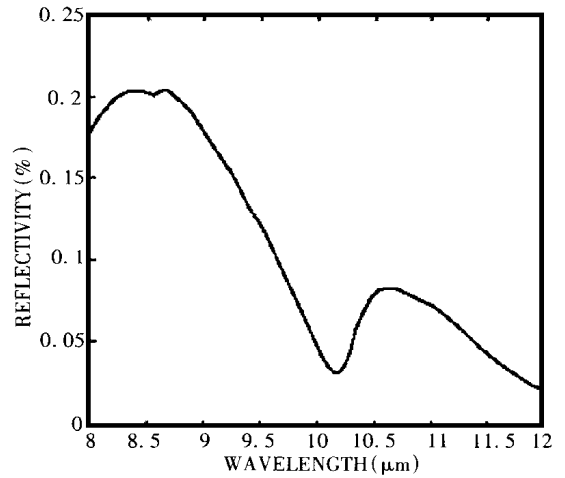


Fig 7 Transmittance of silicon plate with subwavelength structure in infrared wave band Each parameter:  $n_i = 1.0, n_s = 3.0, T_x = T_y = 3.4\mu\text{m}, h = 0.025\mu\text{m}, l_x(n) = l_y(n) = n/21$ .

同样, 在远红外波段反射率随入射波入射角的偏离情况与可见光波段类似。

### 3 结 论

利用严格耦合波法对锥形轮廓亚波长结构的衍射特性进行了计算分析, 并同多层增透膜系的反射特性进行了比较。结果表明, 亚波长结构无论是在可见光还是在红外波段其抗反射特性都是多层膜系所无法比拟的。

#### 参考文献:

[1] 普尔克尔 H K 著 仲永安, 等, 译 玻璃镀膜(第一版) [M] 北京: 科学出版社, 1988 339

[2] 普尔克尔 H K 著 仲永安, 等, 译 玻璃镀膜(第一版) [M], 北京: 科学出版社, 1988 350

[3] Moharam M G, Gaylord T K Three-dimensional vector coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. J. Opt Soc Am, 1983, 73(9): 1105- 1112

[4] Abe Masahiro, Koshida Masanori Three-dimensional diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings[J]. J. Opt Soc Am, 1994, 11(7): 2038- 2044

[5] Li Lifeng New formulation of the Fourier model method for crossed surface-relief gratings[J]. J. Opt Soc Am, 1997, 14(10): 2758- 2767.

[6] 普尔克尔 H K 著 仲永安, 等, 译 玻璃镀膜(第一版) [M] 北京: 科学出版社, 391

- [7] Cox J T. Special type of double-layer antireflection coating for infrared optical materials with high reflective indices[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1961, 51(12): 1406- 1408

## Comparison of periodic subwavelength structure and multilayer antireflection coatings

YU Wei-xing, LU Zhen-wu, WANG Peng, WENG Zhi-cheng

*(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)*

**Abstract:** To solve the Fresnel reflection which exists generally in optical systems, we designed and analyzed one kind of structures, subwavelength surface-relief periodic structures, which have three-dimension profile, using the coupled wave method. Then comparing the calculated results with the characteristics of multilayer antireflection coatings, it was found that this subwavelength periodic structure is far more efficient than multilayer antireflection coating in a wide wave band, particularly in infrared wave band, and the reflection ratio can be controlled in 0.2% in general. Besides this, the variety of reflection of this subwavelength periodic structure can be maintained in 1% when incident angle of incident wave has a 40° deflection, while for multilayer antireflection coatings, it just can do this in 30°.

**Key words:** coupled wave method; subwavelength structure; multilayer antireflection coatings

**作者简介:** 鱼卫星(1975-), 男, 陕西省西安市人, 1998年毕业于西北工业大学应用物理系应用物理专业, 获学士学位, 现在长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室攻读硕士学位, 研究方向为衍射光学元件的设计、分析与制作。