

# 正交二元位相光栅的减反射特性\*

张国平 明海 谢建平

叶嘉雄

(中国科技大学物理系 合肥 230026)

(华中理工大学光学系 武汉 430074)

**提要** 根据二维矢量耦合波衍射理论,分析了正交二元位相光栅的衍射特性,发现在适当选取光栅参数时,其反射率可以减小到几乎为零,并且这种减反射特性与入射光的偏振态无关。

**关键词** 光栅,减反射,偏振,耦合波

## 1 引言

在光学表面镀上减反膜(即增透膜)是现今人们常用的降低光学表面反射率的方法,经过不断的工艺改进和新的膜层材料的开发,以及新的膜系设计方法的研究,这种方法在很多应用场合中行之有效。然而减反膜仍存在一些缺点,例如在某些光谱区(特别是红外和紫外区)由于膜层材料的缺乏,反射率不能降低到满意的程度,而且还存在薄膜的机械性能、化学稳定性、膜层对高能辐射的承受能力以及对基片的附着力等问题<sup>[1]</sup>。

二元位相光栅,当其光栅周期小于入射光波长(即具有亚波长结构)时,表现出与减反膜类似的降低表面反射率的特性。实验证明,在适当选取光栅参数时,一维光栅的反射率可以降至几乎为零<sup>[2,3]</sup>。不过一维光栅的光学特性存在偏振效应<sup>[4]</sup>,其减反射特性只能分别单独针对 TE 偏振或者 TM 偏振,而不能同时针对这两种偏振情况,即一维减反射光栅不能用于任意偏振方式下。

这里,运用二维矢量耦合波衍射理论,我们分析了二维位相光栅的衍射特性,发现当适当选取光栅参数时,二维位相光栅不仅具有减反射作用,而且这种减反射特性与入射光的偏振态无关,即可适用于任意偏振方式下。

## 2 二维耦合波衍射理论

图 1 所示为一正交二元位相光栅,图中  $\Lambda_x, \Lambda_y$  分别为  $x, y$  方向的光栅周期,  $\tau_x, \tau_y$  为对应的占空系数,  $d$  为光栅深度,入射介质的折射率为  $n_1$ ,基片的折射率为  $n_3$ 。

对于亚波长结构的光栅,标量衍射理论是无效的,因此我们采用衍射的矢量耦合波理论来分析其衍射特性。关于二维耦合波矢量衍射理论的详细介绍参见文献[5,6],这里我们只作简要的概述。首先,沿光栅的上下边界将整个空间分成三个区域:入射介质区域( $z < 0$ )、光栅的位相调制区( $0 < z < d$ )和透射区( $z > d$ )。由于二元位相光栅具有矩形结构,沿深度方向的位

\* 国家教委高校博士点基金资助项目。

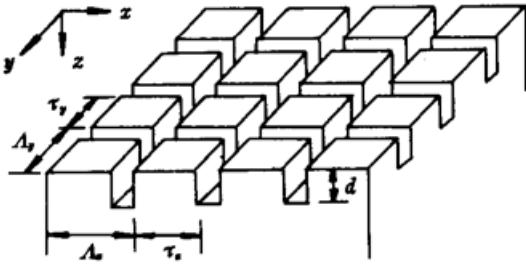


图1 正交二元位相光栅示意图

Fig. 1 Geometry of a crossed binary phase grating

相调制作用是一样的,故可以把它作为单层处理,这样可以使计算得到相对简化。然后将每一区域的光场分解成一系列平面波的叠加,在光栅区运用麦克斯韦方程组,并结合位相匹配和 Floquet 条件,得到二维矢量耦合波方程。最后在光栅的每一边界上运用电磁场的切向分量连续条件,通过适当的数值计算方法,求得各级次反射波和透射波

的振幅系数,从而确定各自的衍射效率。

通过对正交二元位相光栅的二维耦合波衍射分析,我们发现,当光栅在  $x, y$  两方向上具有相同结构时,即  $\Lambda_x = \Lambda_y = \Lambda, \tau_x = \tau_y = \tau$ , 正交光栅呈现出偏振简并性,此时光栅对于 TE 偏振和 TM 偏振具有相同的衍射特性。因此,正交二元位相光栅用作减反射时,可以适用于任意偏振方式下。

### 3 分析与讨论

为了保证入射光在透过光栅后其传播方向不发生改变(除折射外),则透射光中只能包括 0 级衍射波,其它衍射级次的光均应为倏逝波。因此,下列条件必须满足<sup>[5,6]</sup>

$$\Lambda < \lambda/n_3$$

通常情况下  $n_1 < n_3$ , 故当上式成立时,  $\Lambda < \lambda/n_1$  也成立,即反射波中也只包含 0 级反射光,其它级次的反射光也均为倏逝波。

通过改变光栅的几何参数( $\Lambda, \tau$  和  $d$ ) 来计算它们对光栅反射率  $R$  的影响,同时与一维减反射光栅的情况<sup>[2]</sup> 相类比,可以得出对于给定波长  $\lambda$ , 正交二元位相光栅具有减反射特性的理想条件应是:(1)  $\Lambda < \lambda/n_3$ ; (2)  $\tau^2 = 50\%$ ; (3)  $d = \lambda/4 \sqrt{n_1 n_3}$ 。条件(1)保证了只有 0 级光在传播,其它各级次的光场均为倏逝波而很快衰减消失掉。条件(2)使光栅对于 TE 和 TM 偏振是等效的,因而对任意偏振光均有效。条件(3)表明减反射光栅的深度与减反膜的  $\lambda/4n$  膜厚类似。

图 2~ 4 分别为反射率  $R$  与光栅周期  $\Lambda$ 、光栅深度  $d$  和占空系数  $\tau$  的关系曲线,这时假定  $n_1 = 1.0, n_3 = 1.5$ , 入射角  $\theta = 0$ 。图中当  $\Lambda, d$  和  $\tau$  其中之一改变时,另两个参数不变,其值满足上述条件( $\Lambda$  取  $0.4\lambda$ )。图 2 说明  $R$  随  $\Lambda$  的减小而减小,因此减小光栅周期有利于降低反射率,但光栅周期也不能太小,否则无法制作。图 3 和图 4 表明刻蚀深度  $d$  和占空系数  $\tau$  相对于各自的最小点有 10% 的偏离时,光栅的反射率  $R$  将上升到 0.1% 以上。这说明制作误差将会对光栅的减反射特性产生影响,因此,要想获得足够低的反射率,必须严格控制制作误差。

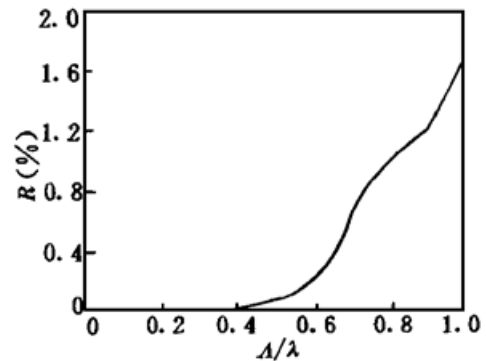


图2 反射率  $R$  与光栅周期  $\Lambda$  的关系曲线

Fig. 2 Reflectivity  $R$  versus the grating period  $\Lambda$

根据条件(1),光栅周期  $\Lambda$  应小于入射光波长  $\lambda$  与基片折射率  $n_3$  的比值。由于受目前光刻工艺分辨率的限制,为便于光栅的制作(即光栅周期不能太小),则波长  $\lambda$  应取得足够大,因此

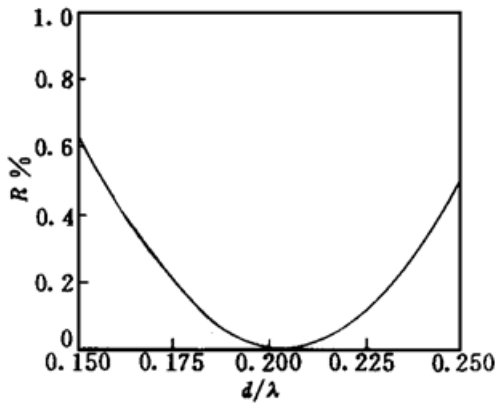


图 3 反射率  $R$  与光栅深度  $d$  的关系曲线

Fig. 3 Reflectivity  $R$  versus the grating depth  $d$

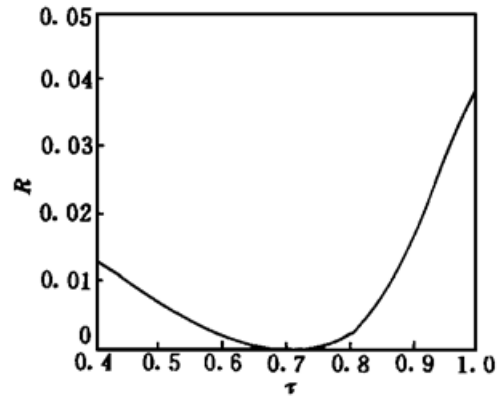


图 4 反射率  $R$  与占空系数  $\tau$  的关系曲线

Fig. 4 Reflectivity  $R$  versus the duty cycle  $\tau$

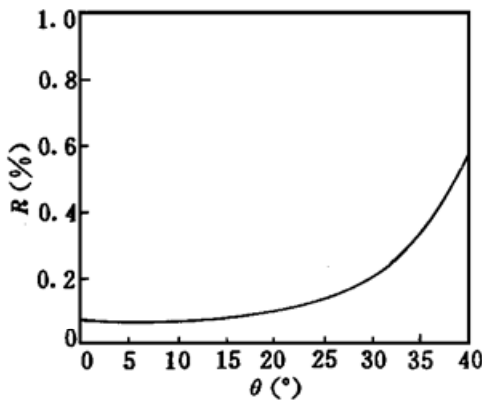


图 5 反射率  $R$  与入射角  $\theta$  的关系曲线

Fig. 5 Reflectivity  $R$  versus the incidence angle  $\theta$

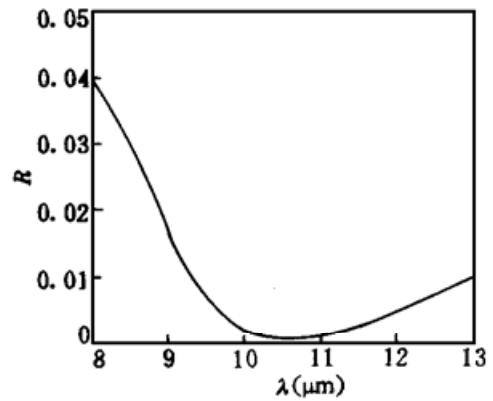


图 6 反射率  $R$  与波长  $\lambda$  的关系曲线

Fig. 6 Reflectivity  $R$  versus the wavelength  $\lambda$

我们取  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ , 光栅采用透红外的 Ge 基片, 其折射率为  $n_3 = 4.0$ 。

根据上述要求, 我们选取  $\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$ ,  $d = 1.33 \mu\text{m}$ ,  $\tau = 0.707$ , 计算出反射率  $R = 0.08\%$ , 这比镀单层 ZnS 红外减反膜所得到的反射率  $0.9\%$  要低得多。这时计算  $R$  与入射角  $\theta$  和波长  $\lambda$  的关系曲线分别如图 5, 图 6 所示。图 5 表明, 入射角在  $30^\circ$  以内时, 反射率曲线基本上是平坦的。从图 6 中可以看出, 对于中心波长 ( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ), 反射率可以减至接近于零, 偏离中心波长时, 由于条件 (3) 不满足, 因而引起表面反射率增加, 光谱反射率曲线呈 V 字形。

根据上述参数, 我们制作了一实际的正交二元位相光栅。同时为了便于与一维光栅的减反射特性进行比较, 这里也设计了一个一维减反射光栅, 其参数为  $\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$ ,  $\tau = 0.4$  (针对 TE 偏振),  $d = 1.33 \mu\text{m}$ 。由于制作误差的影响, 实际测得两种光栅的周期  $\Lambda = 2.8 \mu\text{m}$ , 深度  $d = 1.68 \mu\text{m}$ , 占空系数  $\tau$  误差很小。根据实际测得的参数, 计算出一维和二维光栅的反射率应为  $R_1(\text{TE}) = 0.27\%$ ,  $R_1(\text{TM}) = 1.8\%$ ,  $R_2 = 0.36\%$  (下标 1 和 2 分别对应于一维和二维光栅)。实验测得一维

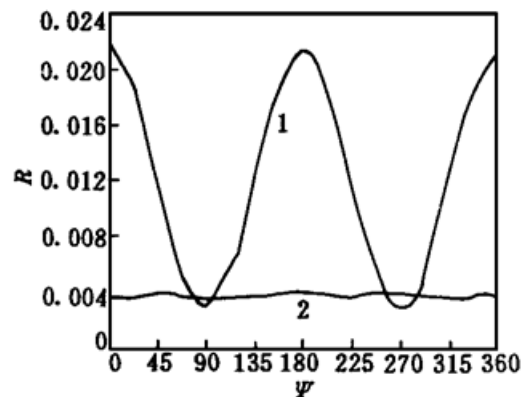


图 7 实测的反射率  $R$  与入射光偏振角  $\psi$  的关系曲线 (1: 一维光栅; 2: 二维光栅)

Fig. 7 Reflectivity  $R$  versus the polarized angle  $\psi$  of incident light (curve 1 for one dimension and 2 for two dimensions)

和二维光栅反射率分别为  $R_1(\text{TE}) = 0.3\%$ ,  $R_1(\text{TM}) = 2.2\%$ ,  $R_2 = 0.39\%$ 。由于存在测量误差,使得测量值与理论计算结果有一定的误差。改变入射光的偏振模式(通过绕光轴旋转光栅),测得一维和二维光栅的反射率  $R$  与入射光的偏振角  $\psi$  之间的关系分别如图 7 中曲线 1 和 2 所示,可见一维光栅的减反射特性与入射光的偏振态有关,而二维光栅的反射率与偏振态无关(图中的波动是由测量误差引起的)。

## 4 结 论

在适当选取光栅参数的情况下,正交二元位相光栅能够有效地降低表面反射率,而且这种减反射特性还与入射光的偏振态无关。这种减反射光栅与传统的减反膜相比,还具有如下优点:(1) 在红外区其反射率远小于目前单层红外减反膜所能达到的反射率;(2) 由于光栅的几何参数可随基片折射率的不同而改变,因而它不受材料的限制;(3) 由于光栅直接刻在基片上,故其抗高能辐射能力远比减反膜强,同时它还没有减反膜中所存在的机械强度、化学稳定性、对基片的附着力等方面的问题。

由于受现有工艺水平的限制,目前这种减反射光栅还只能用在红外光谱区,如用于太阳能电池、彩色滤波、在航天器中作为减反射窗等。将来随着工艺水平的提高,这种减反射光栅也将能用于可见光甚至紫外光谱区。值得说明的是,在实际应用时,必须严格控制其制作误差。

## 参 考 文 献

- 1 唐晋发,顾培夫. 薄膜光学与技术. 北京:机械工业出版社,1989,64~78
- 2 T. K. Gaylord, W. E. Baird, M. G. Moharam. Zero-reflectivity high spatial-frequency rectangular-groove dielectric surface-relief grating. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(24): 4562
- 3 Yuzo Ono, Yasuo Kimura, Yoshinori Ohta *et al.*. Antireflection effect in ultrahigh spatial-frequency holographic gratings. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(6): 1142
- 4 张国平,叶嘉雄,李再光. 二元光学元件的偏振效应. 光子学报,1996, **25**(Z1): 166
- 5 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Analysis and applications of gratings diffraction. *Proc. IEEE*, 1985, **73**: 894
- 6 Zhang Guoping, Ye Jiexiong, Li Zaiguang. Vector coupled-wave theory of diffractive optics in the resonance domain. *Acta Physica Sinica (Oversea Edition)*, 1996, **5**(11):

## Antireflection Properties of Crossed Binary Phase Gratings

Zhang Guoping Ming Hai Xie Jiaping

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Ye Jiaping

(Department of Optical Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** In this paper, according to the two-dimensional vector coupled-wave diffraction theory, we analyze diffraction properties of crossed binary phase gratings, and find that when the grating parameters are chosen properly, the gratings can have nearly zero reflectivities, and the antireflection properties have nothing to do with the polarization states of the incident lights.

**Key words** gratings, antireflection, polarization, coupled-wave