

文章编号: 0253-2239(2003)11-1359-3

亚波长消反射光栅*

陈四海¹ 程志军¹ 黄光² 何苗² 易新建²

(¹ 华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074
² 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了降低消反射光栅的偏振敏感性, 将等效介质理论推广到二维亚波长结构, 对一种特定的矩形柱状结构进行了分析。构造了一种分析方法, 然后利用光栅结构的有关表达式得到这种二维结构的近似等效系数。并设计了适用于 10.6 μm 红外波段的二维亚波长消反射光栅, 用二元光学的制作工艺在 Si 衬底上进行了实验制备。测试结果表明: 对中心波长为 10.6 μm 的红外光, 这种光栅象单层消反射膜一样, 具有很好的增透效果。

关键词: 物理光学; 二元光学; 等效介质理论; 二维光栅; 亚波长结构

中图分类号: O436 文献标识码: A

1 引言

为了避免光波的反射损失, 亚波长结构光栅可以作为传统的消反射膜层的替代元件^[1,2], 并且克服了消反射膜层附着力强, 稳定性差, 热膨胀失配和组分扩散、渗透等的缺点, 而且在单一波长和恶劣环境, 具有更好的消反射性能。

如激光内腔和太空中的太阳能电池采用等效介质理论设计的一维消反射光栅^[3,4] 显示出形式双折射的性质, 具有偏振敏感性, 使得这种消反射光栅的应用受到了限制, 对于能够降低光栅的偏振敏感性的二维亚波长消反射光栅则没有相应的等效介质理论支持, 如果用严格的矢量衍射理论, 如耦合波理论, 则需要大量复杂的数学计算。这里我们运用等效介质近似方法可以对二维亚波长结构的等效介电系数进行近似估算, 严格的电磁波理论可以用来证明估算的有效性^[5]。

2 理论分析

2.1 理论分析

等效介质理论^[6~8] 是研究亚波长结构表面比较直观的近似理论。它认为, 当入射光波长大于浮雕结构周期时, 只产生零级的透射和反射衍射。在光波由入射媒质通过亚波长结构区域时, 光波的性质类似于光波通过一等效媒质, 波阵面的形状不发生改变, 等

效媒质的光学参量由浮雕的结构特征来确定。

我们以图 1 为例, 对一维亚波长周期结构进行分析。单层厚度为 ω , 周期为 d , 如果满足 $d \ll \lambda$, 光波通过时将不能识别这种结构, 相当于通过一均匀介质, 而且光栅衍射仅有零级衍射。对于光波电矢量平行于光栅层和垂直于光栅层, 这种层状结构的零级等效折射率分别表达如下^[9]:

$$\epsilon_{\parallel}^{(0)} = (1-f)\epsilon_1 + f\epsilon_2, \quad (1)$$

$$1/\epsilon_{\perp}^{(0)} = (1-f)/\epsilon_1 + f/\epsilon_2, \quad (2)$$

其中 $f = \omega/d$ 指光栅的填充系数, ϵ_1, ϵ_2 分别指两种介质的介电系数。由(1)式、(2)式表明, 一维亚波长光栅对 TE 波(即光波电矢量平行于光栅层)和 TM 波(即光波电矢量垂直于光栅层)有不同的等效介电系数, 取决于光栅的填充系数 f 。这就是所谓的形式双折射现象。等效折射率与等效介电系数的关系可以简单表示为: $\epsilon_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^2$ 。

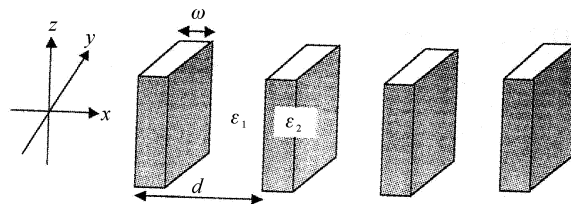


Fig. 1 One dimensional subwavelength structure

2.2 二维周期光栅的一维等效近似

为了分析上的简化, 我们选取对称的正方柱型的二维结构, 如图 2 所示。由于结构上的对称性, 等效介电系数与偏振状态无关, 二维光栅不再有形式双折射现象。对于某一偏振状态(如光波电场为 X 方

* 国家自然科学基金(60177011)资助课题。

E-mail: cshai99@163.com

收稿日期: 2002-04-25; 收到修改稿日期: 2002-11-18

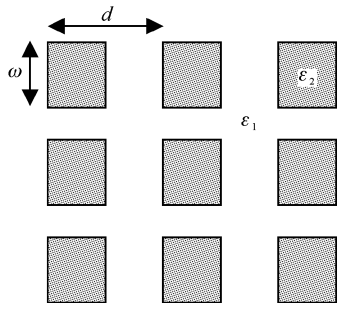


Fig. 2 Two dimensional subwavelength structure with square cylinder

向), 二维结构可以看作由平行于电场方向的带状组

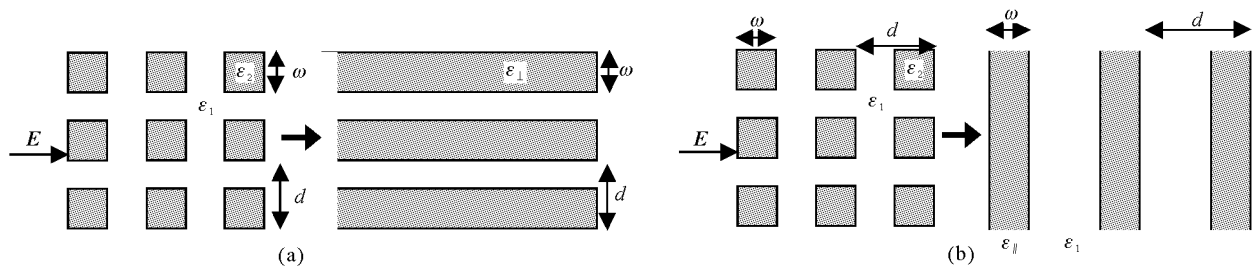


Fig. 3 Approximation of two dimensional subwavelength structure (a) the effective index was determined by effective medium theory (EMT) for the TM mode forming a homogeneous distribution in (b) by EMT for the TE mode

对于任意偏振状态, 等效折射率有很多近似求法, 我们选取的求法如下:

$$n_{2-D}^{(0)} = [\bar{n} + 2\tilde{n}_{2-D}^{(0)} + 2\tilde{\tilde{n}}_{2-D}^{(0)}]/5, \quad (5)$$

式中
$$\bar{n} = (1 - f)^2 n_1 + f^2 n_2, \quad (6)$$

3 二维消反射光栅的结构设计

3.1 等效折射率与刻蚀高度的确定

如图 4 所示, 光波从折射率为 n_1 的介质通过光栅射向折射率为 n_2 的介质, 二维光栅的浮雕高度为 h , 周期为 d , 光栅脊宽 ω 。根据等效介质理论, 当光栅周期 d 与光波波长 λ 相比足够小时, 光波将不能识别光栅, 光栅区域相当于折射率为 n_{eff} 的薄层。而根据薄膜理论, 对于折射率为 n_f , 厚度为 h 的单层消反射薄膜, 它的零反射条件是

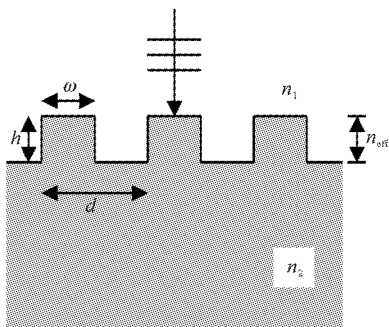


Fig. 4 Diffraction geometry and the grating parameters

成的一维光栅结构, 每个带状可以看成是一维光栅的光栅脊[见图 3(a)]。光栅脊的等效系数由(1)式可以得到。因此, 二维光栅的等效介电系数可以写为

$$\epsilon_{2-D}^{(0)} = (1 - f)\epsilon_1 + f\epsilon_{\perp}^{(0)}, \quad (3)$$

式中 $\epsilon_{\perp}^{(0)}$ 由(2)式可以得到。二维结构也可以看作是垂直于电场的带状排列组成的一维光栅结构, 每个带状也是一维光栅的光栅脊[见图 3(b)]。二维光栅的等效介电系数可以写为

$$1/\epsilon_{2-D}^{(0)} = (1 - f)/\epsilon_1 + f/\epsilon_{\parallel}^{(0)}, \quad (4)$$

式中 $\epsilon_{\parallel}^{(0)}$ 由(2)式可以得到。

$$n_f = (n_1 n_2)^{1/2}, \quad h = \lambda/4n_f, \quad (7)$$

如上所述, 如果取二维消反射光栅的等效折射率 $n_{\text{eff}} = n_f$, 就能使二维消反射光栅达到零反射。

3.2 二维消反射光栅的周期界定

对于浮雕结构周期的定量描述, 可以通过光栅的衍射方程来导出。周期光栅的衍射方程为

$$n_1 \sin \theta_m + n_2 \sin \theta_i = m\lambda/d, \quad (8)$$

式中 θ_m 为第 m 级衍射的衍射角, θ_i 为入射角, d 为光栅周期, λ 为光波波长。根据等效介质理论的假设, 光栅的衍射仅有零级存在, 而 $m = 1$ 的一级衍射角应达到 $\pi/2$ 的临界条件, 即光栅方程对于任意入射角都没有实解, 因此可以确定浮雕结构周期的上限值

$$d/\lambda < 1/(n_1 + n_2), \quad (9)$$

4 实验制备与测试结构

我们设计了对 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 红外消反射的二维正方柱型浮雕光栅, 用二元光学方法在硅基底上进行了实验制备, 设计参量为光栅周期 $d = 2 \mu\text{m}$, 填充系数 $f = 0.8$, 刻蚀深度 $h = 1.4 \mu\text{m}$ 。图 5 是实验样品的扫描电子显微镜照片, 由于刻蚀深度要求偏大, 刻蚀时间要求相对较长, 所以有一定的侧向刻蚀, 使得图形有所变形。图 6 是实验样品的透过率测试曲线, 可以看出, 相对于硅基底 50%左右的透过率, 在加上二维

消反射浮雕光栅后,对 $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ 的红外光有了明显的增透效果,透过率接近 70%。但也可以看到透过率峰值在 $10.6 \mu\text{m}$ 处偏低,这是因为我们现有的工艺刻蚀深度不易达到设计值,稍小于 $1.4 \mu\text{m}$ 而引起。

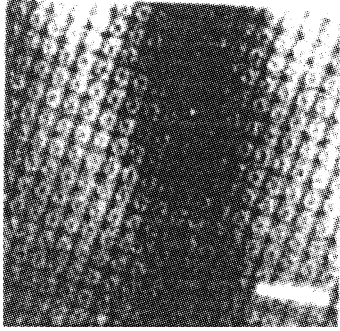


Fig. 5 Scanning electronic microscope photograph of the relief grating sample

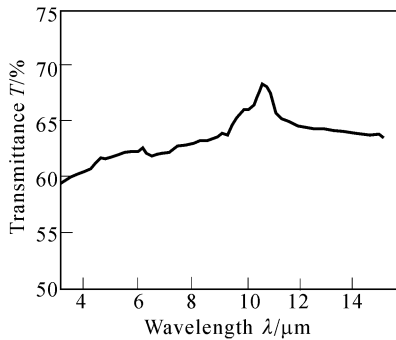


Fig. 6 Measured transmittance of the relief grating sample

结语 为了消除一维消反射光栅的偏振敏感性,将等效介质理论推广到二维,设计并且制作了二维正方柱型消反射浮雕光栅。测试结果表明:1)这种亚

波长结构可以作为传统的消反射薄膜的替代,有良好的增透效果;2)由于结构上的对称性,二维正方柱型浮雕光栅对光波的偏振状态不敏感,可以得到更加广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 Li L. Multilayer modal method for diffraction gratings of arbitrary profile, depth, and permittivity. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1993, **10**(12):2581~2591
- 2 Miller J M, Turunen J, Nojonen E. Rigorous modal theory for multiply grooved lamellar gratings. *Opt. Commun.*, 1994, **111**(5,6):526~535
- 3 Glytsis E N, Gaylord T K. High-spatial-frequency binary and multilevel stairstep gratings: polarization-selective mirror and broadband antireflection surfaces. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(22):4459~4470
- 4 Raguin D H, Morris G M. Analysis of antireflection-structured surfaces with continuous one-dimensional surface profiles. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14):2582~2598
- 5 Brauer R, Bryngdahl O. Electromagnetic diffraction analysis of two-dimensional gratings. *Opt. Commun.*, 1993, **100**(1~4):1~5
- 6 Lalanne P. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures. *J. Modern Optics*, 1996, **43**(10):2063~2085
- 7 Raguin D H, Morris G M. Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(7):1154~1167
- 8 Mait J N, Prather D W, Mirotznik M A. Design of binary subwavelength diffractive lenses by use of zeroth order effective-medium theory. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1999, **16**(5):1157~1167
- 9 Raguin D. Subwavelength structure surfaces: theory and experiments. Ph. D. dissertation (University of Rochester, Rochester, N. Y. 1998)

Design and Fabrication of Subwavelength Antireflection Gratings

Chen Sihai¹ Cheng Zhijun¹ Huang Guang² He Miao² Yi Xinjian²

¹ Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074
² The State Key Laboratory for Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

(Received 25 April 2002; revised 11 November 2002)

Abstract: To reduce the polarization sensitivity of antireflection gratings, a particular rectangular structure was analyzed by generating equivalent medium theory (EMT) to two-dimensional subwavelength structure. An approximate equivalent coefficient for two-dimensional subwavelength was obtained with the related expressions of grating structure. A two-dimensional subwavelength antireflection grating designed for $10.6 \mu\text{m}$ was fabricated on a Si substrate by using binary optical processing. The results show that this grating structure was similar to a single antireflection film at $10.6 \mu\text{m}$.

Key words: binary optics; equivalent medium theory; two-dimensional grating; subwavelength structure