

文章编号 1004-924X(2002)06-0537-05

二维抗反射亚波长周期结构光栅的设计分析

曹召良¹, 卢振武¹, 李凤友¹, 张慧娟², 孙 强²

- (1. 中国科学院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, 吉林 长春 130022 ;
2. 南开大学 现代光学研究所 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要:利用严格耦合波理论(RCWA)和等效介质理论(EMT)研究了二维抗反射亚波长周期结构光栅的设计问题。以立方体和柱状单台阶网格光栅和金字塔形及圆锥形多台阶光栅为例,主要研究了占空比和表面面形对反射率的影响。通过计算发现,当光栅周期足够小的时候,光栅面形对反射率没有影响,同时占空比严重影响着光栅的特性,这对设计制造抗反射光栅非常有用。同时也研究了等效介质理论的适用性。

关键词:抗反射;亚波长;占空比;反射率;表面面形

中图分类号:O436.1 **文献标识码:**A

1 引言

亚波长光栅可以广泛用作抗反射元件、偏振器件和窄带滤波器等。关于它的理论分析^[1]、制作^[2]和设计^[3,4]已有多篇文献报道。由于光刻技术的发展,使得衍射光学元件重新引起人们的重视。为了获得光栅最好的光学特性,必须通过研究光栅结构对光栅衍射特性的影响,从而选择最优化的方法来制作光栅。Philippe Lalanne 分析了亚波长闪耀光栅的结构截止点^[5]。据了解,目前还没有文章研究光栅表面面形对反射率的影响。

亚波长光栅的一个非常重要的用途是用来做抗反射表面^[2-4,6],其要求光栅应具有非常低的反射率。在实际应用中,为了达到要求的反射率,选择光栅的表面面形、周期、占空比和沟槽深度等参数是非常重要的。本文应用严格耦合波理论(RCWA)和等效介质理论(EMT)进行以下两方面的分析:(a)二维单台阶和多台阶光栅结构占空比和反射率的关系;(b)当周期远远小于波长和其接近于波长时表面面形对反射率的影响。

2 占空比对反射率的影响

2.1 等效介质理论的有效性

为了研究占空比和反射率之间的关系,所采用的光栅面形见图1。整个空间被分成三个区域:区: $z < 0$, 区: $0 < z < h$ 和 区: $z > h$;其中和 都为均匀介质且折射率分别为 n_1 和 n_3 ;占空比 $f = (l_x \times l_y) / (T_x \times T_y)$, l_x 和 l_y 分别是沿 x 和 y 方向的凸出部分的宽度, T_x 和 T_y 分别是 x 和 y 方向的周期;光栅的沟槽深度为 h 。根据等效介质理论,等效折射率(N)是占空比的函数^[7],而反射率是等效折射率的函数,二维光栅反射率作为占空比函数的关系可由以下公式进行计算:

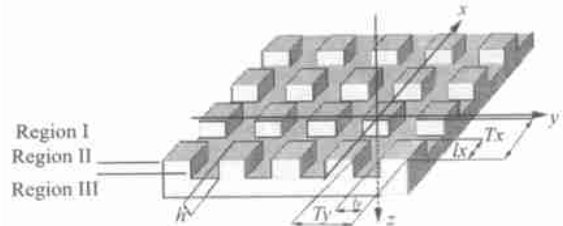


图1 二维浮雕结构图

Fig. 1 Geometry of the square-pillar binary grating.

收稿日期:2002-04-23;修订日期:2002-10-22

基金项目:国家自然科学基金(No. 60078006);科学院创新基金资助

$$R = \frac{(n_3 - N^2/n_1)^2}{(n_1 + N^2/n_3)^2}, \quad (1)$$

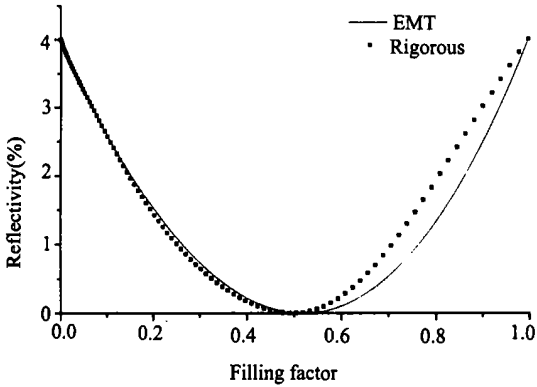
公式中 N 的求解^[7]:

$$N^4 = (f_x \times N_{TM}^2 + (1 - f_x) \times n_3^2) / (f_y \times N_{TE}^{-2} + (1 - f_y) \times n_3^{-2}), \quad (2)$$

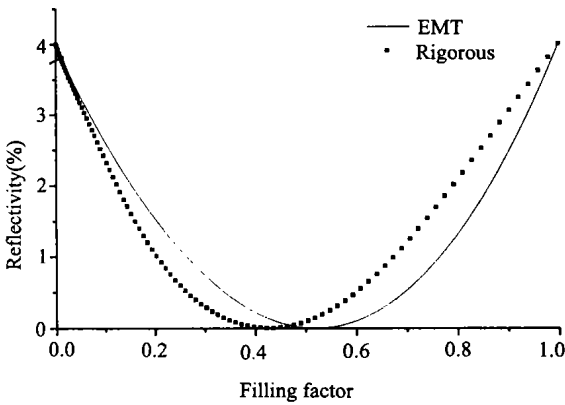
$$N_{TM}^{-2} = f_x \times n_1^{-2} + (1 - f_x) \times n_3^{-2}, \quad (3)$$

$$N_{TE}^2 = f_x \times n_1^2 + (1 - f_x) \times n_3^2. \quad (4)$$

其中, $f_x = l_x/T_x$ 和 $f_y = l_y/T_y$ 分别是 x 和 y 方向上的占空比。我们也用严格耦合波理论计算了它们之间的关系。图 2 是当 $T_x = T_y = 0.1$ 和 0.6 时, RCWA 和 EMT 计算出的占空比和反射率的关系, λ 是真空中波长。由图 2 可以看出, 图 2(a) 中两条曲线拟合的比较好, 而 (b) 中两条曲线差别较大; 因此, 当 $T_x = T_y = 0.1$ 时,



(a)



(b)

图 2 反射率随占空比的变化, $n_1 = 1, n_3 = 1.5, T = 0.1$ 和 $T = 0.6$ 分别对应 (a) 和 (b)

Fig. 2 The relationship between the reflectivity and filling factor, where $n_1 = 1, n_3 = 1.5, T = 0.1$ and $T = 0.6$ for (a) and (b).

EMT 和 RCWA 计算的结果比较接近, 当 $T_x = T_y = 0.6$ 时, 计算的结果相差较大。这说明, 当光栅周期足够小时, 等效介质理论是比较有效的。

2.2 反射率随占空比的变化

对单台阶光栅, 反射率随占空比和沟槽深度的变化关系如图 3 所示; 可以看出, 只有三个特殊的点有最低的反射率。图 4 是当占空比 $f = 0.04, 0.09, 0.16, 0.25, 0.36, 0.49$ 和 0.64 时, 单台阶光栅反射率随沟槽深度的变化。

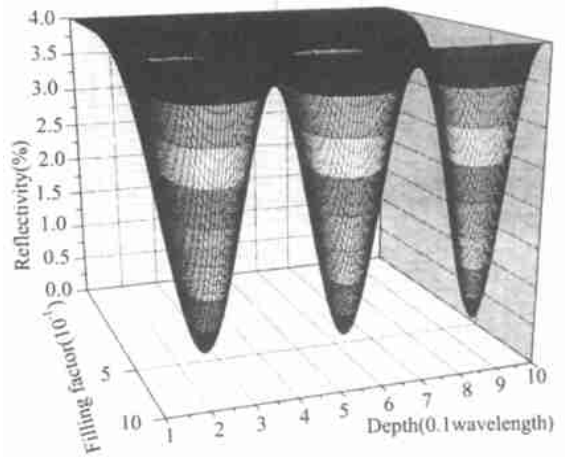


图 3 反射率随占空比的变化关系, $T = 0.1, \lambda = 1.533 \mu\text{m}, n_1 = 1, n_3 = 1.5$

Fig. 3 The reflectivity as a function of filling factor and depth, where $T = 0.1, \lambda = 1.533 \mu\text{m}, n_1 = 1$ and $n_3 = 1.5$.

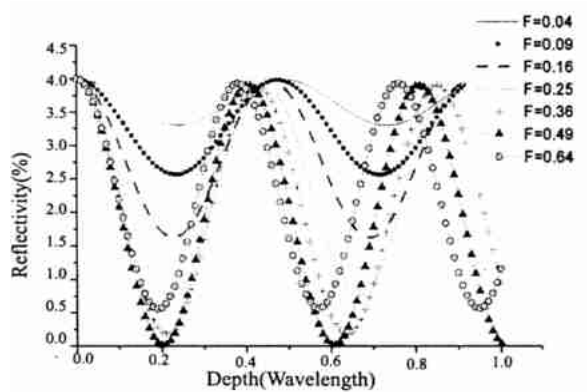


图 4 当 $f = 0.04, 0.09, 0.16, 0.25, 0.36, 0.49$ 和 0.64 时, 反射率随沟槽深度的变化关系, $\lambda = 1.533 \mu\text{m}, n_1 = 1$ 和 $n_3 = 1.5$

Fig. 4 The reflectivity as functions of depth for $f = 0.04, 0.09, 0.16, 0.25, 0.36, 0.49$ and 0.64 , where $\lambda = 1.533 \mu\text{m}, n_1 = 1$ and $n_3 = 1.5$.

可以看出,在沟槽深度为 0.2 附近,当占空比变化时最小反射率点也在变化。因此,要想得到最小反射率,必须合理的选择占空比。例如根据图 4,应选择占空比的值在 0.36 ~ 0.64 之间。占空比的精确值可根据图 3 的计算结果得到。

对多台阶光栅,占空比同样影响光栅的反射率。当选择如文献[3]中图 10 的金字塔形结构的多台阶光栅时,分别取 $Lx_0 = \frac{t}{t+1} \times Tx$, $Lx_0 = \frac{1}{2} \times Tx$, 和 $Lx_0 = Tx$, 其中 Lx_0 是金字塔底面正方形的边长, t 是台阶数, 每个台阶的高度为 h/t , 取 $t = 8$; 由于 Lx_0 的取值不同, 所以占空比也不相同; 图 5 是占空比不同时反射率随沟槽深度的变化, 可以看出, 当占空比不同时, 光栅的反射率特性也不一样。

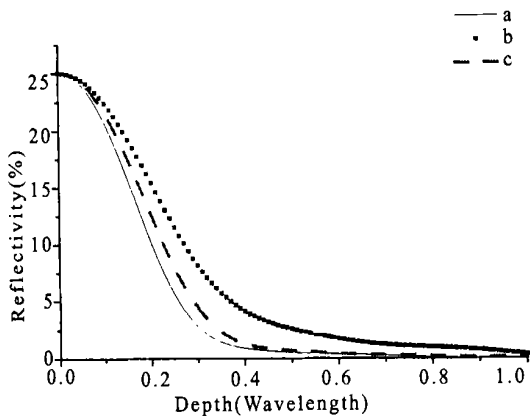


图 5 多台阶金字塔光栅的反射率随沟槽深度的变化关系: (a) $Lx_0 = \frac{t}{t+1} \times Tx$, (b) $Lx_0 = \frac{1}{2} \times Tx$, 和 (c) $Lx_0 = Tx$, 这里 $t = 8$, $= 10\mu\text{m}$, $n_1 = 1$, $n_3 = 3$

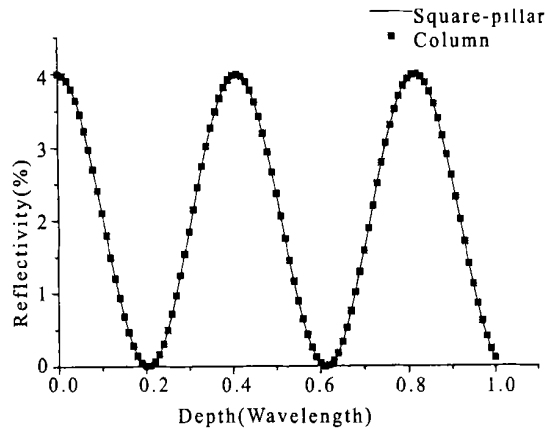
Fig. 5 The reflectivity as functions of depth for multi-level pyramidal profile: (a) $Lx_0 = \frac{t}{t+1} \times Tx$, (b) $Lx_0 = \frac{1}{2} \times Tx$, and (c) $Lx_0 = Tx$, where $t = 8$, $= 10\mu\text{m}$, $n_1 = 1$ and $n_3 = 3$.

3 表面面形对反射率的影响

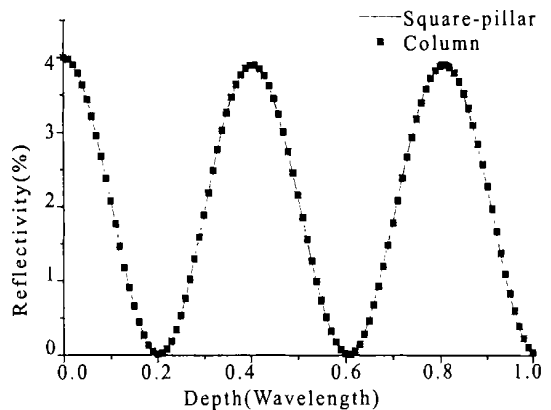
对于确定的表面面形的亚波长光栅的分析已在许多文献中报道^[3,8]。他们只分析了给定表面面形的光栅的衍射特性。但是根据等效介

质理论, 等效折射率 N 只是占空比的函数, 所以光栅的反射率只与占空比有关, 与表面面形无关。因此, 需要研究一下表面面形是否影响反射率。

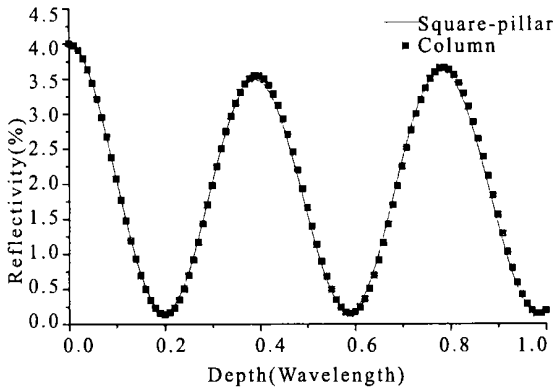
我们选择如文献[9]所示的圆柱状单台阶光栅和图 1 所示的立方状单台阶光栅。图 6 是当占空比 $f = 0.49$ 和 $T = 0.1$ (图(a)), 0.4 (图(b)), 0.65 (图(c)) 和 0.7 (图(d)) 时, 圆柱状光栅和立方光栅的沟槽深度随反射率的变化关系; 可以看出, 在图 6(a) 和 (b) 中, 两条曲线拟合的非常好, 而在图 (c) 和 (d) 中, 两条曲线有所分离且 (d) 比 (c) 分的更开。因此可以得出, 当光栅的周期小于 0.4 时, 柱状光栅和立方光栅的反射率曲线完全重合, 所以表面面形对光栅的反射率无影响; 当周期再继续增大时, 两条曲线分得越来越开, 即表面面形对光栅的反射率影响越来越大。因此, 当光栅的周期和波长相比足够小时, 表面面形对反射率没有影响。这对制作光栅非常有用。



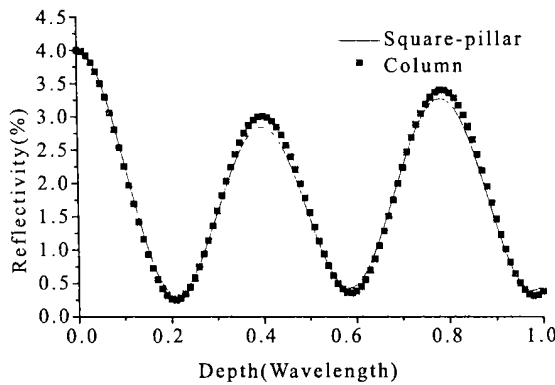
6(a)



6(b)



6(c)



6(d)

图 6 柱状光栅和立方状光栅的反射率随沟槽深度变化关系, $T = 0.1, 0.4, 0.65$ 和 0.7 分别对应(a), (b), (c) 和 (d), 这里 $f = 0.49, \lambda = 1.533\mu\text{m}, n_1 = 1, n_3 = 1.5$

Fig. 6 The reflectivity as functions of groove depth for square-pillar and columned gratings, where $f = 0.49, \lambda = 1.533\mu\text{m}, n_1 = 1, n_3 = 1.5, T = 0.1, 0.4, 0.65$ and 0.7 for (a), (b), (c) and (d), respectively.

对于多台阶结构,由于它被看作是多个单台阶的叠加,所以当周期足够小时它的面形也应该对反射率没有影响;以多台阶圆锥状结构和多台阶金字塔结构为例,当占空比 $f = 0.8$ 、台阶数 $t = 5$ 时,圆锥状光栅(见文献[10])和金字塔状光栅的反射率随沟槽深度的变化如图 7;可以看出,对多台阶光栅同样有上边的结论。

根据上边的分析,当等效介质理论有效时

($T \ll \lambda$),光栅面形对反射率没有影响,当周期接近于波长时(EMT 无效),表面面形影响光栅的反射率,这时必须采用严格耦合波理论来计算。

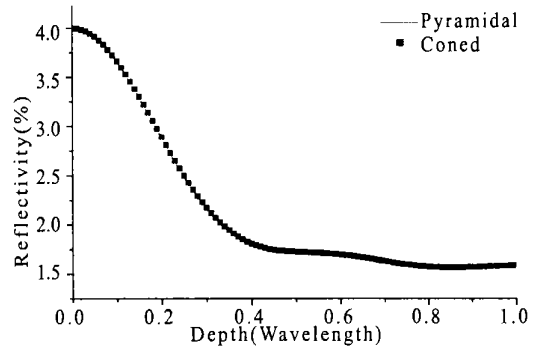


图 7 多台阶锥状和金字塔光栅的反射率随沟槽深度的变化关系,这里 $\lambda = 1.533\mu\text{m}, t = 5, T = 0.4, n_1 = 1, n_3 = 1.5$

Fig. 7 Relationship between reflectivity and depth for multi-level pyramidal and coned profile, where $\lambda = 1.533\mu\text{m}, \text{level} = 5, T = 0.4, n_1 = 1$ and $n_3 = 1.5$.

4 结论

本文利用严格耦合波理论和等效介质理论分析了二维亚波长周期结构光栅的衍射特性。主要分析了:(a) 占空比对多台阶和单台阶光栅的反射率的影响,通过分析发现:占空比对光栅的反射率有较大的影响,因此,为了设计最好的抗反射光栅,当周期选定后,应当计算反射率随占空比和沟槽深度的变化关系,并选出最佳的占空比。(b) 表面面形对光栅反射率的影响,通过比较单台阶柱状和立方状光栅的沟槽深度和反射率的变化关系以及多台阶圆锥状和金字塔光栅的反射率随沟槽深度变化关系,可以得出结论:当光栅的周期 $T < 0.4\lambda$ 时,表面面形对反射率没有影响。(c) 等效介质理论的有效性,通过比较在相同条件下利用严格耦合波理论和等效介质理论的计算结果得出:当光栅周期和波长相比足够小时,等效介质理论有效;当周期逐渐接近波长时,等效介质理论不再适用。

参考文献:

- [1] 樊叔维. 任意槽形光栅衍射特性的矢量理论分析与计算[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(1): 5-10.
- [2] Motamedi M E, Southwell W H, Gunning W L. Antireflection surfaces in silicon using binary optics technology[J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(22): 4371-4376.
- [3] Grann E B, Moharam M G, Pommet D A. Optimal design for antireflective tapered two-dimensional subwavelength grating structures[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, 12(2): 333-339.
- [4] Bräuer R, Bryngdahl O. Design of antireflection gratings with approximate and rigorous methods[J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(34): 7875-7882.
- [5] Lalanne P, Astilean S, Chavel P. Blazed binary subwavelength gratings with efficiencies larger than those of conventional echelette gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23(14): 1081-1083.
- [6] 鱼卫星, 卢振武, 王鹏, 等. 亚波长周期结构与多层增透膜反射特性的比较[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(1): 10-14.
- [7] Turunen I, Wyrowski F. *Diffraction Optics for Industrial and Commercial Applications* [M], AkademieVerlag GmbH, Berlin, 1997, Chap. 1997, 11: 305-307.
- [8] Raguin D H, Mchael M G. Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region[J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(7): 1154-1167.
- [9] Zhang D W, Lu Z W, Yu W X, et al. Electromagnetic diffraction analysis of columned grid gratings[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2002, 4: 180-186.
- [10] Zhang D W, Lu Z W, Yu W X, et al. Electromagnetic diffraction analysis of 2-D antireflective subwavelength grating with coned profile[J]. *Chinese Journal of laser B*, 2002, 11(4): 273-280.

Design consideration of two-dimensional anti-reflective subwavelength periodic gratings

CAO Zhao-liang¹, LU Zhen-wu¹, LI Feng-you¹, ZHANG Hui-juan², SUN Qiang²

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China

2. Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract : This paper investigates the design of a two-dimensional anti-reflective subwavelength grating, by means of RCWA and EMT, take for example, the square-pillar and columned binary gratings, and pyramidal and coned multi-level gratings, the impact of filling factor and surface profile on the reflectance of a grating are mainly considered. It is shown that surface profile has no effect on the reflectivity when the period is sufficiently small, but the wavelength and the filling factor have an important impact on the diffraction characteristics of the grating. So it is very important to design an anti-reflective grating. The validity of EMT is also investigated in the paper.

Key words : anti-reflection; subwavelength; filling factor; reflectivity; surface profile; period

作者简介:曹召良(1974-),男,河南济源市人,1998年毕业于河南师范大学物理系,获理学学士学位,现在长春光机所攻读硕士学位,主要从事二元光学的理论分析、亚波长光学元件的设计和制作、以及离子束刻蚀技术。