

红外 30 μm 亚波长抗反射光栅的制作

曹召良¹, 卢振武¹, 张平¹, 王淑荣¹, 赵晶丽², 李凤有^{1,3}

(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. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电传感技术研究室, 吉林 长春 130022

3. 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设计出亚波长抗反射光栅,并通过等离子体辅助刻蚀制作出了立方状抗反射光栅.测量结果发现该光栅具有良好的增透特性,并且测得光栅参数和理论设计参数基本一致,表明等离子体辅助刻蚀是制作深光栅的有效方法.对实验结果进行了分析和讨论,结果表明,临界周期点随折射率的变化规律在亚波长抗反射光栅的制作中有重要的作用.

关键词:严格耦合波理论;亚波长;抗反射;光栅

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A

FABRICATION OF ANTIREFLECTIVE SUBWAVELENGTH GRATING AT INFRARED 30 μm REGION

CAO Zhao-Liang¹, LU Zhen-Wu¹, ZHANG Ping¹, WANG Shu-Rong¹,
ZHAO Jing-Li², LI Feng-You^{1,3}

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

2. Department of Opto-electronic Sensors and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130022, China

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

Abstract: Antireflective subwavelength grating was designed by using rigorous coupled wave approach (RCWA). The square-pillar grating was fabricated by plasma assisted etching. Testing results show that the grating has a very good antireflective characteristic, and the values of testing parameters approximately equal to the designed data. It indicates that the plasma assisted etching method is valid to fabricate deep groove grating. The experimental results are analyzed and discussed. It is shown that the critical periodic point as a function of refractive index is very important to fabricate the antireflective subwavelength grating.

Key words: rigorous couple wave approach(RCWA); subwavelength; antireflection; grating

引言

由于衍射光学元件具有重量轻、体积小和消色差等特点,已被广泛用于经典的光学系统中^[1,2],以提高光学系统的成像质量同时减小光学系统的重量和体积.在衍射光学元件中,当元件的周期或特征尺

寸小于波长时,称之为亚波长光学元件.亚波长光学元件可以用作抗反射元件^[3,4]、偏振器件和窄带滤波器等.当用作抗反射元件时,由于其可以解决传统镀膜无法克服的一些困难,在某些应用方面它大有取代传统镀膜之势.由于其波长光栅可以通过调节光栅的周期、面形、占空比和沟槽深度等参数实现任

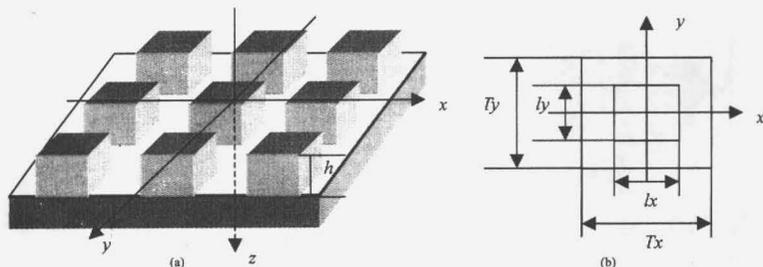


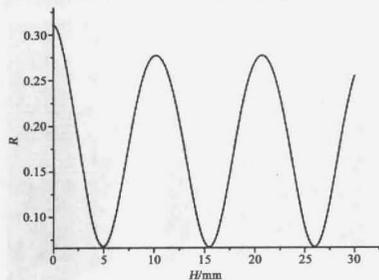
图1 (a)二维浮雕光栅结构图 (b)平面图

Fig.1 (a)Geometry of two-dimensional surface-relief grating's structure (b)Planeform

意等效折射率值,即相当于可以在元件表面镀任意折射率的材料;同时它还可以直接刻在元件的表面上,通过在元件的表面刻上一个一定形状的花纹,可以起到良好的增透作用。因此,它解决了传统镀膜中材料的限制和在强激光作用下薄膜脱落的问题,有重大的民用和军用价值。本文利用严格耦合波理论设计了红外30 μm 抗反射光栅,并利用等离子体辅助刻蚀制作了立方状抗反射光栅。通过测量发现,该光栅具有良好的增透效果。

1 理论设计

理论设计的光栅面形如图1。图1(b)是(a)中的一个单元的俯视图, 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。严格耦合波法^[5,6]是将整个空间被分成3个区域:I区: $z < 0$, II区: $0 < z < h$ 和 III区: $z > h$;其中I区和III区都为均匀介质且折射率

图2 反射率随沟槽深度的变化关系,波长 $\lambda = 30\mu\text{m}$,周期 $T = 8\mu\text{m}$,折射率 $n = 3.52$ Fig.2 The reflectivity as a function of groove depth, here $\lambda = 30\mu\text{m}$, $T = 8\mu\text{m}$, $n = 3.52$

分别为 n_1 和 n_3 ,介电常数分别为 ϵ^I 和 ϵ^{III} 。首先,将光波按照平面波分量展开成一系列空间谐波的形式,每个平面波分量的振幅是光栅沟槽深度的函数。然后,将电磁场的展开式代入麦克斯韦方程组来求解光栅区平面波的耦合波微分方程组。再结合电磁场在 $z = 0$ 和 $z = h$ 处的边界条件,便可以求出这些空间谐波的表达式,进而求出光栅调制区的电磁场。这样,便得到了衍射波的复振幅 R_{mn} 和 T_{mn} ,然后根据光栅衍射效率求解公式:

$$\eta^I_{mn} = \text{Re}(\gamma^I_{mn}/\gamma^I_{00}) |R_{mn}|^2, \quad (1)$$

$$\eta^{\text{III}}_{mn} = \text{Re}(\gamma^{\text{III}}_{mn}/\gamma^I_{00}) |T_{mn}|^2, \quad (2)$$

便可以求出光栅的反射率和透射率。其中, η^I_{mn} 和 η^{III}_{mn} 分别为光栅的反射率和透射率,Re表示取实部。

亚波长光栅的一个非常重要的用途是用作抗反射面。为了实现红外波段的抗反射,选取中心波长30 μm 红外波段。为了便于制作光栅,选取 $T_x = T_y$, $l_x = l_y$,光栅周期 $T = 8\mu\text{m}$,基底材料选取对红外透过。

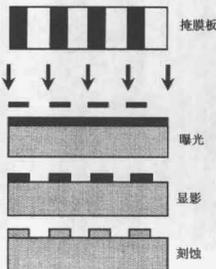


图3 光栅的制作方法

Fig.3 The way to fabricate grating

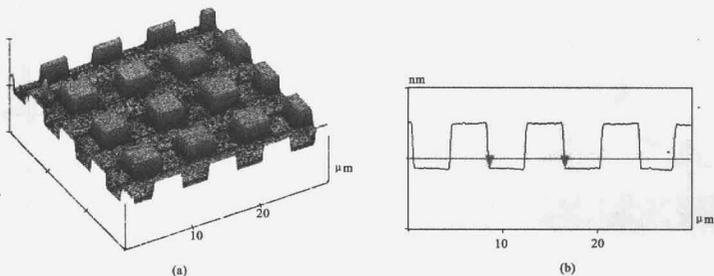


图4 (a)掩膜板的 AFM 三维照片 (b)掩膜板的 AFM 检测结果

Fig.4 (a) The AFM photograph of three-dimensional mask (b) the AFM testing result of mask

在正入射情形下,率较高的单晶硅利用严格耦合波理论计算出它的反射率随刻蚀深度的变化关系(如图2所示),由图可以看出在沟槽深度为 $4.95\mu\text{m}$ 、 $15.45\mu\text{m}$ 和 $26\mu\text{m}$ 时,都有最小的反射率.由于沟槽深度越小越容易刻蚀制作,因此选取沟槽深度 $h = 4.95\mu\text{m}$,它的最低反射率为 6.75% .

2 光栅的制作

制作的亚波长抗反射光栅的工艺流程如图3.先制作出光栅的掩膜板,然后在硅片上涂一层光刻胶,把掩膜板放在光刻胶上边进行接触式曝光.把曝过光的硅片放在显影液中显影.显影完后,放在刻蚀机中进行刻蚀.最后清洗掉硅片表面的光刻胶,便制成了光栅.

2.1 掩膜板的制作

利用中国科学院微电子中心光掩膜制作技术实验室的GCA3600FPG和3696PR组成的光学制版系

统(光学图形发生器)制作了亚波长抗反射光栅的掩膜板.利用美国DI公司生产的DimensionTM3100原子力显微镜(AFM)对其进行了检测.图4是掩膜板的三维图和检测结果,测得周期为 $8\mu\text{m}$.从三维图和检测结果来看,掩膜板的突出部分是正方体,侧壁陡峭,突出部分和凹面部分的宽度基本一致且表面平滑,满足应用要求.

2.2 图案的转移

刻蚀光栅所选取的材料为直径为3英寸的型圆硅片,厚度为 $360\mu\text{m}$,晶向100,电阻率为 $1500\Omega/\text{cm} \sim 1600\Omega/\text{cm}$,双面抛光.利用德国Karlsuss公司生产的MA6/BA6光刻机在硅片上进行涂胶和曝光.把曝过光的硅片放在显影液中显影,便在硅基底上形成了光刻胶掩膜图案.

2.3 等离子体辅助刻蚀制作

利用法国ALCATEL公司生产的601E ICP(inductively coupled plasma)深等离子体刻蚀机,通入

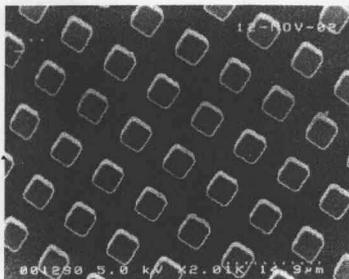


图5 光栅的 SEM 表面照片, $T = 8\mu\text{m}$, $l = 4.06\mu\text{m}$
Fig.5 The SEM photograph of the grating's surface, here $T = 8\mu\text{m}$, $l = 4.06\mu\text{m}$

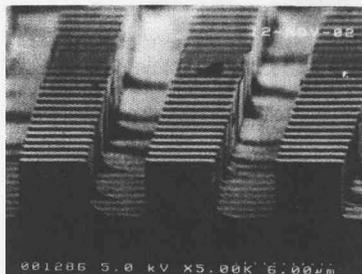


图6 光栅的 SEM 侧面照片,沟槽深度 $h = 3.85\mu\text{m}$
Fig.6 The SEM photograph of the grating's sidewall, here $h = 3.85\mu\text{m}$

SF_6 和 C_4F_8 气体进行刻蚀. 刻蚀过的硅片放在丙酮溶液中浸泡清洗, 最后便制成亚波长抗反射光栅. 利用日本日立公司生产的 S-4200 扫描电子显微镜 (SEM) 对制作出的光栅进行了检测. 图 5 是亚波长抗反射光栅的平面图, 和图 3(a) 进行比较可以看出, 光栅图案转移得非常好, 表面光滑且突出部分和凹面部分的宽度基本相同. 图 6 是光栅的侧面图, 测得光栅的沟槽深度为 $3.85\mu\text{m}$, 周期为 $8\mu\text{m}$, 突出部分的宽度为 $4.06\mu\text{m}$. 由图 5 可以看出, 光栅的侧壁非常陡峭. 因此, 利用该方法非常理想的制作出了亚波长抗反射光栅.

3 结果与讨论

利用美国 PERKIN-ELMER 公司生产的 683 红外分光光度计测量了没有刻蚀的硅片和制作出的光栅的透过率. 测量的结果如图 7, 由图知, 在 $21\mu\text{m} \sim 35\mu\text{m}$ 红外波段, 刻蚀过的硅片的透过率明显地超过了没有刻蚀的硅片, 在 $30\mu\text{m}$ 处, 空硅片的透过率为 50.8% , 光栅的透过率为 62.5% , 确实达到了增透的目的.

图 8 是利用严格耦合波理论计算出的沟槽深度为 $3.85\mu\text{m}$ 时, 光栅的总透射率和零级透射率随波长的变化关系, 由图可以看出, 当波长小于 $28.4\mu\text{m}$ 时, 光栅出现了非零级衍射波; 在波长为 $28\mu\text{m}$ 时, 光栅的零级透射率和总透射率曲线开始重合. 我们已经研究了出现一级透射衍射波时, 光栅的周期 T 和波长 λ 的比值 T/λ 随材料折射率的变化关系^[7], 我们称这个比值为临界周期点, 最后得到它们之间的变化关系是

$$y = 1/x. \quad (1)$$

其中 y 是临界周期点, x 是折射率. 对应于波长 $28\mu\text{m}$, 硅的折射率为 3.49 , 由式(1)得光栅的临界

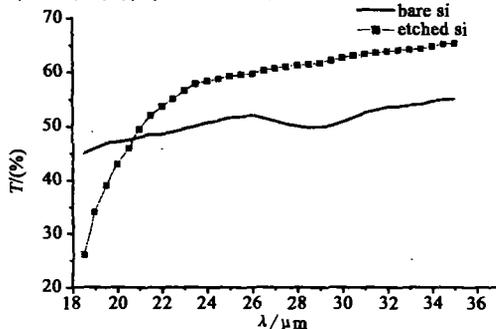


图 7 空硅片和刻蚀过的硅片的透过率随波长的变化曲线

Fig. 7 The transmittance as a function of wavelength for bare silicon and etched silicon

周期点为 0.288 , 所以出现一级衍射透射波的临界周期值为 $8.06\mu\text{m}$; 由于光栅的周期 $T = 8\mu\text{m}$, 小于出现一级衍射波的周期, 所以在波长为 $28\mu\text{m}$ 时, 光栅的零级透射率和总透射率曲线开始重合.

由测得的透射率曲线和理论计算的透射率曲线相比, 可以得到: (1) 测得的光栅透射率曲线和理论计算的零级透射率曲线趋势相近; 这是由于当入射波长较小时, 光栅出现一级以及其它衍射级次, 这些衍射光偏离入射光的传播方向, 在测量时分光光度计的探测器探测不到, 所以测得的只是零级衍射波; (2) 光栅在 $30\mu\text{m}$ 处的理论透过率为 90.6% , 测量值为 62.5% , 测量值小于理论计算值; 这是由于计算时认为材料没有吸收且光栅基底为无限厚, 在制作时由于材料有吸收, 再加上由于光栅具有一定厚度, 产生了基底下表面的反射, 使得光栅的透射率降低^[8].

由测得的透射率曲线可以看出, 在波长大约为 $21\mu\text{m}$ 以下时, 刻蚀过的硅片透射率反而没有空硅片的透射率高; 这是由于光栅周期比较接近于波长, 非零衍射级次太多, 使得零级衍射波的能量大大下降, 以至于小于空硅片的透射能量. 因此在制作亚波长抗反射光栅时, 必须避免非零级次衍射波的产生; 而根据式(1), 只要知道所用材料的折射率, 便可以方便求出不出现一级衍射的最大光栅周期, 制作时在最大周期以内取值便可以保证光栅只有零级衍射, 从而确保光栅的高增透特性. 因此, 式(1)在制作亚波长抗反射光栅时具有重要作用.

4 结论

利用严格耦合波理论设计出二维抗反射亚波长

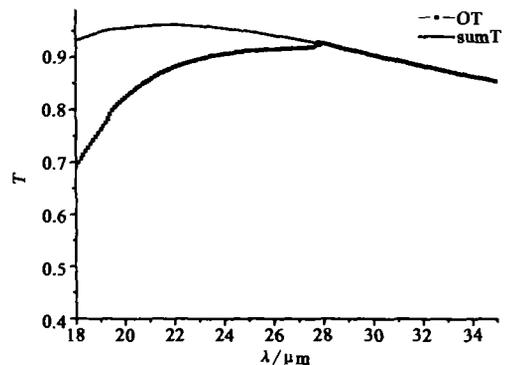


图 8 利用 RCWA 计算出的光栅的零级透射率和总的透射率随波长的变化关系, 沟槽深度 $h = 3.85\mu\text{m}$

Fig. 8 The transmittance calculated by RCWA as a function of wavelength for the zero order and the summary order, here $h = 3.85\mu\text{m}$

周期结构硅光栅. 并根据设计的参数进行亚波长抗反射光栅的制作. 并利用红外分光光度计进行了测量, 测量结果发现光栅具有良好的增透效果. 同时和理论计算的结果进行比较分析, 通过分析得出: (1) 测量值小于理论值是由于光栅的材料有吸收且产生基底表面的反射; (2) 当入射波长较小时, 由于光栅出现一级以及其它衍射级次, 使得光栅的实际透射率下降, 降低了增透效果. 因此在应用亚波长光栅作为抗反射表面时, 应避免非零级次衍射波的出现, 以得到良好的增透效果; 而利用式(1)则可以方便地计算出出现其他衍射级次的周期值, 从而避免非零级衍射波的出现; (3) 波长小于 $21\mu\text{m}$ 时, 光栅的透射率没有空硅片的透射率高是由于非零级次的衍射波太多, 以至于零级透射波的能量低于空硅片的透射能量. 分析结果说明, 当光栅的周期小于由式(1)所求得的周期值, 光栅只有零级衍射波, 具有良好的透射特性. 因此, 亚波长光栅确实能够实现抗反射效果, 公式 $y = 1/x$ 在亚波长抗反射光栅的制作中有重要的作用.

本文只是对红外 $30\mu\text{m}$ 抗反射光栅进行了设计和制作, 实际上, 根据严格耦合波理论计算结果得知, 亚波长光栅的抗反射效果不受波长限制, 即在可见波段 ($400 \sim 700\text{nm}$) 和近红外波段如 $1.06\mu\text{m}$ 同样可以制作出抗反射光栅, 只不过光栅的周期随之

减小, 制作难度相应的增加.

REFERENCES

- [1] Wood A P. Design of infrared hybrid refractive-diffractive lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(13): 2253—2258
- [2] Faklis D, Morris G M. Spectral properties of multiorder diffractive lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(4): 2462—2465
- [3] Grann Eric B, Moharam M G, Pommet Drew A. Optimal design for antireflective tapered two-dimensional subwavelength grating structures[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(2): 333—339
- [4] Grann Eric B, Moharam M G, Pomment Drew A. Artificial uniaxial and biaxial dielectrics with use of two-dimensional subwavelength binary gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2695—2703
- [5] Gaylord T K, Moharam M G. Planar dielectric crating diffraction theories[J]. *Appl. Phys.*, 1982, **B28**: 1—14
- [6] Ralf Brä uer, Olof Bryngdahl. Electromagnetic diffraction analysis of two-dimensional gratings [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **100**: 1—5
- [7] CAO Zhao-Liang, LU Zhen-Wu, LI Feng-You. *et al.* Diffractive characteristics analysis of antireflective periodic dielectric subwavelength gratings[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (曹召良, 卢振武, 李凤有, 等. 亚波长周期结构抗反射介质光栅的衍射特性分析. *光电子·激光*), 2003, **14**(7): 694—697
- [8] Motamedi M E, Southwell W H, Gunning W J. Antireflection surfaces in silicon using binary optics tedhnology [J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(22): 4371—4376