

文章编号: 0258-7025(2009)11-3060-04

导模共振滤光片表面镀膜对其物理特性的影响

张大伟 袁丽萌 黄元申 倪争技 陈 麟 朱亦鸣 庄松林

(上海理工大学上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘要 为了研究亚波长光栅表面上薄膜的生长特性,以及镀膜对亚波长光栅物理特性的影响,对亚波长正弦槽形光栅表面上镀的 Au 膜进行了实验研究和理论分析。实验发现,当光栅槽深为 80 nm, Au 膜为 100 nm 时,薄膜的生长是仿形生长,光栅的正弦槽形特征和周期都基本没有发生变化,但镀膜后,出现光栅的正弦占空比增加、槽的深度减小以及槽深的均匀性变差等现象。对引起这种现象的原因进行了分析,提出了由于光栅微结构而给薄膜生长带来的阴影效应现象,并分析了正弦占空比增加对导模共振滤光片光谱特性的影响。

关键词 薄膜;亚波长光栅;薄膜生长;占空比;正弦槽形;导模共振

中图分类号 TB43;O484.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093611.3060

Influence of Film on the Characteristics of Sub-Wave Grating

Zhang Dawei Yuan Limeng Huang Yuanshen Ni Zhengji Chen Lin

Zhu Yiming Zhuang Songlin

(Shanghai Key Laboratory of Contemporary Optics System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract To study the influence of film on the characteristics of subwavelength grating, the growth of 100 nm Au film on the surface of subwavelength grating with sine groove shape and 80 nm groove depth was investigated. It was shown that the growth was profiling copy, the sine groove and periodic were keep unchanged almost. When sine duty cycle increased, the groove depth reduced and uniformity of groove depth got worse. The shadow effect generated by the microstructure of grating was proposed to explain these variations. The effect of sine duty cycle increasing on the spectrum of guided mode resonant filters was investigated too.

Key words thin films; subwavelength grating; film growth; duty cycle; sine groove shape; guided-mode resonance

1 引 言

光学元件制备过程中,经常需要在光学元件表面镀上薄膜,以改善光学器件的性能或实现某些特定的功能。薄膜有其特殊的生长方式,研究其生长特性可以更好地在制备过程中控制薄膜的生长,以达到所需要的效果。目前的研究大都是薄膜在平面上的生长,如王恩哥^[1,2]从理论上研究了薄膜生长过程中原子在表面上的各种动力学表现;齐红基等^[3]研究了离子束溅射工艺制备金属 Ti 的薄膜生长;杨晓东等^[4]利用激光分子束外延(L-MBE)技术在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001) 衬底上生长出了沿 c 轴高度择优取向的 ZnO 外延薄膜;宋 鹏等^[5]用有限元数学理

论模拟了金属 Pt 纳米催化剂薄膜的沉积;王彤彤等^[6]运用电子枪蒸发纯 Ge,考夫曼离子源辅助的方法在 Ge 基底上沉积了 $\text{Ge}_{1-x}\text{C}_x$ 薄膜;童杏林等^[7]以较低温度烧结获得的 PMN-PT 块材料为靶,采用脉冲激光沉积方法在石英衬底上制备了 PMN-PT 薄膜;刘耀东等^[8]通过脉冲激光沉积法在石英玻璃衬底上成功获得了具有(002)择优取向的 ZnO 薄膜;王艳敏等^[9]用脉冲激光沉积技术制备了钛酸锶钡($\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$)薄膜。这些研究都是关于在平面基底上的薄膜的生长,而关于微结构表面上薄膜的生长则鲜有报道。E. D. Walsby^[10]提出在硅基底的微结构表面镀上双折射薄膜会导致薄膜结构和光

收稿日期: 2008-12-01; 收到修改稿日期: 2009-03-11

基金项目: 国家科技部支撑计划(2006BAK03A03)和上海市科委(07DZ22026,08ZR1415400,08DZ2272800) 资助课题。

作者简介: 张大伟(1977—),男,博士,副教授,主要从事薄膜及光栅等方面的研究。E-mail: dwzhang@siom.ac.cn

学特性的差异, Habib Ammari^[11] 研究了光栅结构上非线性薄膜的光学效应, 但都未就薄膜的具体生长特性进行讨论。我们在进行导模共振滤光片的研究中, 提出了导模共振滤光片共振峰位置调整的方法^[12,13], 该方法需要在亚波长光栅上表面镀膜。对于具有小于 500 nm 的微结构周期的亚波长光栅而言, 薄膜在其表面生长时, 是否具有与平面上生长不一样的特性, 并从而对镀膜后的光栅特性产生影响, 本文对此进行了研究。

2 实验与分析

为了结合文献^[12]中的导模共振滤光片共振峰位置调整工作, 实验中所用的亚波长光栅设计参数是: 周期 460 nm, 槽深 80 nm。具体制作工序是: 基片超声波清洗处理—旋涂光刻胶—曝光前烘干—全

息曝光(记录干涉条纹)—显影—曝光后烘干(得到掩模版)—离子束蚀刻。旋涂光刻胶用 BSE-1016 旋涂机(紫微浩阳科技有限公司), 全息曝光光源是波长 441.6 nm 的氦镉激光器, 离子束蚀刻在反应离子束蚀刻机里进行, 蚀刻气体是 CHF_3 。

镀膜在 JC500-3/D 型磁控溅射镀膜机里进行, 工作气体氩气的流量是 50 mL/min, 工作压强是 3×10^{-3} Pa, 不加烘烤温度, 样品所在夹具在镀膜过程中旋转, 转速为 20 r/min。使用原子力显微镜 (AFM) 测量亚波长光栅样品在镀 100 nm 厚的 Au 膜前后的表面形貌, 扫描面积为 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$, 扫描方式为轻敲模式, 图 1 给出了亚波长光栅样品镀膜前后的表面形貌立体图。图 2 是亚波长光栅样品镀膜前后的表面形貌平面图。对此平面图用 AFM 离线软件进行横截面分析处理, 得到图 3。

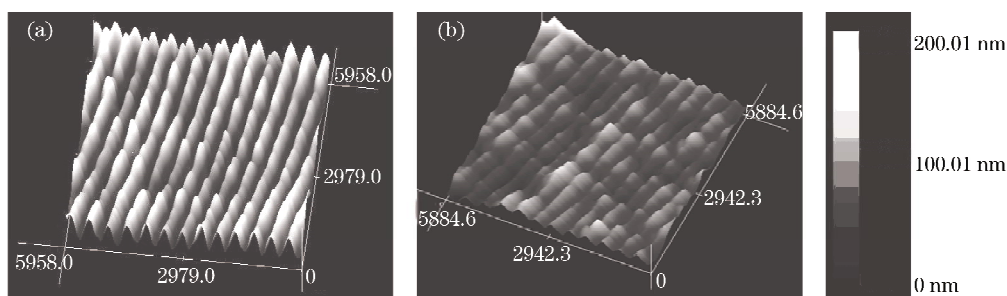


图 1 亚波长光栅样品表面形貌立体图。(a)镀膜前;(b)镀膜后

Fig. 1 3-D image of subwavelength grating. (a) Before coating; (b) after coating

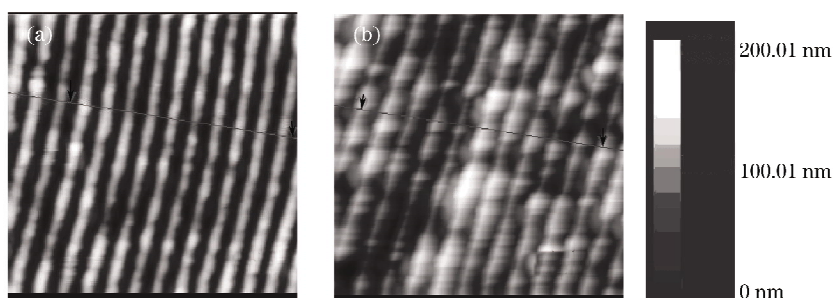


图 2 亚波长光栅样品表面形貌图。(a)镀膜前;(b)镀膜后

Fig. 2 AFM image of subwavelength grating. (a) Before coating; (b) after coating

2.1 结果与分析

2.1.1 槽形及周期

由图 1 可以看出在光栅镀膜前后, 光栅的基本槽形特征没有变化, 都是正弦型。这说明 100 nm 厚的 Au 薄膜覆盖在亚波长光栅上后, 并没有对光栅槽形有显著影响, 薄膜的生长是仿形生长, 在亚波长光栅正弦槽形表面镀膜, 在一定的厚度情况下, 仍会得到正弦槽形的微结构表面。

图 1 中横向尺寸都是 $6 \mu\text{m}$, 光栅槽脊数都在

12~13 之间。光栅槽脊数代表着光栅的周期数, 基本相同的光栅槽脊数说明在相同的长度内光栅的条纹数相同, 即光栅的周期在镀膜前后基本不变。这说明在一定的薄膜厚度范围内, 薄膜在亚波长光栅微结构表面的生长属于仿形生长, 在薄膜的生长过程中, 光栅的周期信息不会丢失。

2.1.2 正弦占空比及槽深

从图 2 给出的亚波长光栅样品镀膜前后的表面形貌平面图可以看出, 尽管镀膜前后正弦的槽型没

有变化,但槽脊和槽沟的宽度发生了变化。为了方便描述光栅镀膜前后的这种变化,定义一个与矩形光栅的占空比相类似的概念:正弦占空比。如图 4 所示,将光栅槽脊部分的高度定为 1,设槽脊 1/2 高度处对应的宽度为 a ,槽沟 1/2 高度处对应的宽度为 b , a/b 即为正弦占空比。从图 2 可以看出,镀膜后的光栅比镀膜前光栅槽脊部分增宽,即正弦占空比增加。利用 AFM 离线软件对样品进行截面分析的图 3 进行数据处理,得到镀膜前后正弦占空比分别为 1 和 1.8,光栅的平均槽深由镀膜前的 80 nm 变为 50 nm。

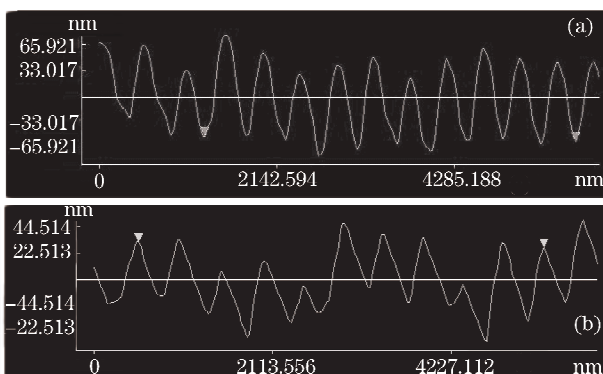


图 3 亚波长光栅样品表面形貌的一维横截面扫描图
(a)镀膜前;(b)镀膜后

Fig. 3 1-D cross section scan of subwavelength grating surface profile. (a) Before coating; (b) after coating

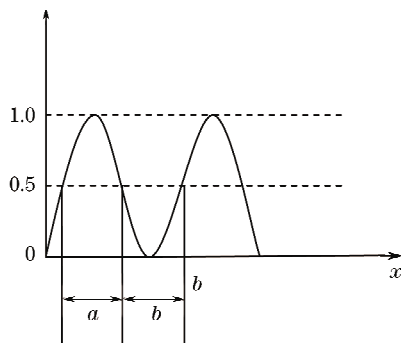


图 4 正弦光栅占空带宽比 a/b

Fig. 4 Duty ratio a/b of the sinusoidal grating

对亚波长正弦槽形光栅镀 100 nm 厚的 Au 膜后正弦占空比增加及光栅槽变浅的原因进行了分析,认为这是由光栅微结构本身的阴影效应以及磁控溅射特点所引起的。一方面,对于光栅结构,镀膜时除了薄膜自身的阴影效应,还受到光栅微结构所造成的阴影效应影响;另一方面,磁控溅射沉积方式的特点是薄膜分子动能大,晶粒尺寸大^[14]。如图 5 所示,在光栅槽脊 d 处,到达的薄膜分子数量多,动能大,因此该

处薄膜生长致密;而光栅沟槽 c 处,由于光栅槽脊的阻挡,只有少数分子入射到该区域。由于亚波长光栅沟槽 c 处区域空间较小(从最大 230 nm 逐渐减小到 0),而磁控溅射的晶粒尺寸又大,因此光栅沟槽 c 处薄膜疏松生长,从而随着镀膜过程的进行,光栅的槽沟处呈现出逐步被填充的趋势,导致了镀膜后正弦占空比增加及光栅槽深度变浅。

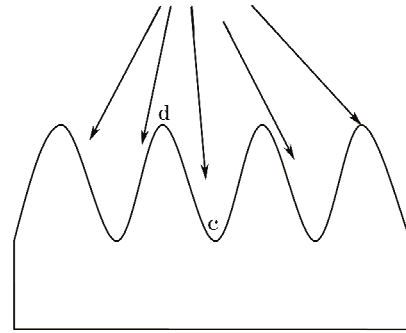


图 5 光栅阴影效应示意图

Fig. 5 Schematic diagram of grating shadow effect

2.2 正弦占空比增加对导模共振滤光片光谱的影响

导模共振滤光片在制备时,为了调整滤光片的制备误差,可采取在亚波长光栅表面镀膜的方法^[12]。为了研究亚波长光栅正弦占空比增加对导模共振滤光片光谱的影响,对不同正弦占空比下的某导模共振滤光片的光谱特性进行了模拟计算。导模共振滤光片结构为双层结构,具体如图 6 所示,图中 1 为石英基底;2 为 HfO_2 波导层,厚度 84 nm;3 为光栅层, HfO_2 为高折射率材料,空气为低折射率材料,槽深 93 nm。对占空比分别是 1:1,7:3,9:1 情况下的导模共振滤光片 0 级反射光谱进行计算,发现随着正弦占空比的增加,导模共振滤光片的共振峰向右漂移,带宽变窄,如图 7 所示。这是由于占空比反映了折射率调制强度,占空比增加使调制强度增加,从而共振耦合发生变化的原因。因此,在使用薄膜覆盖技术调整导模共振滤光片制备误差时,应充分考虑到正弦占空比变化这一因素,以得到准确的导模共振滤光片光谱特性。

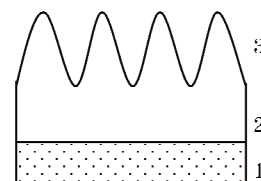


图 6 导模共振滤光片的结构

Fig. 6 Structure of guided mode resonant filters

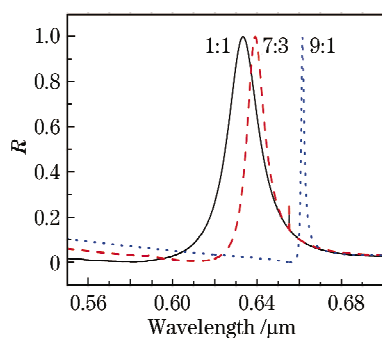


图 7 导模共振滤光片反射光谱与占空比的依赖关系
Fig. 7 Dependence relationship between guided mode resonant refractive spectrum and duty cycle

3 结 论

对亚波长光栅的槽形、周期、正弦占空比、槽深等特征在镀膜前后的变化进行了实验研究及理论分析,发现在 80 nm 槽深亚波长正弦光栅上镀 100 nm 厚的 Au 膜后,槽形的正弦特征及周期基本没有发生变化,但正弦占空比增加,槽深变浅。本文对此进行了分析,结合磁控溅射镀膜的特点,提出了薄膜生长中光栅微结构引起阴影效应的理论模型,并研究了导模共振滤光片反射光谱随正弦占空比增加的变化情况,发现随着正弦占空比增加,导模共振滤光片共振峰向右漂移,带宽变窄。指出在使用薄膜覆盖技术调整导模共振滤光片制备误差时,应充分考虑到正弦占空比变化这一因素。

参 考 文 献

- 1 Wang Enge. Atomic-scale study of kinetics in film growth (I) [J]. *Progress in Physics*, 2003, 23(1): 1~61
王恩哥. 薄膜生长中的表面动力学(I) [J]. *物理学进展*, 2003, 23(1): 1~61
- 2 Wang Enge. Atomic-scale study of kinetics in film growth(II) [J]. *Progress in Physics*, 2003, 23(2): 145~191
王恩哥. 薄膜生长中的表面动力学(II) [J]. *物理学进展*, 2003, 23(2): 145~191
- 3 Qi Hongji, Cheng Chuanfu, Yuan Jingmei *et al.*. Morphology analysis of titanic thin film prepared by ion beam sputtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(4): 480~484

- 齐红基,程传福,袁景梅等. 用离子束溅射方法制备的钛薄膜表面形貌分析[J]. *光学学报*, 2003, 23(4): 480~484
- 4 Yang Xiaodong, Zhang Jingwen, Bi Zhen *et al.*. XRD analysis ZnO [rown by laser molecular beam epitaxy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(3): 485~489
杨晓东,张景文,毕 臻等. ZnO 的激光分子束外延法制备及 X 射线研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(3): 485~489
- 5 Song Peng, Lu Jiansheng, Zhang Defeng *et al.*. Finite element method simulation of defects and growth model during metal thin film deposition [J]. *Materials Science & Technology*, 2007, 15(6): 827~830
宋 鹏,陆建生,张德丰等. 金属薄膜缺陷及生长模式的有限元模拟[J]. *材料科学与工艺*, 2007, 15(6): 827~830
- 6 Wang Tongtong, Gao Jinsong, Wang Xiaoyi *et al.*. Preparation of Ge_{1-x}C_x thin film by e-gun evaporation assisted with ion source [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(4): 715~718
王彤彤,高劲松,王笑夷等. 离子源辅助电子枪蒸发制备 Ge_{1-x}C_x 薄膜[J]. *光子学报*, 2007, 36(4): 715~718
- 7 Tong Xinglin, Jiang Desheng, Liu Lian *et al.*. Characterization of PMN-PT thin film formed by femtosecond pulsed laser deposition [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(3): 494~497
童杏林,姜德生,刘 恋等. 脉冲激光沉积 PMN-PT 薄膜及其性能研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(3): 494~497
- 8 Liu Yaodong, Zhao Lei. Preparation of ZnO thin films by pulsed laser deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(4): 534~537
刘耀东,赵 磊. 脉冲激光沉积法制备氧化锌薄膜[J]. *中国激光*, 2007, 34(4): 534~537
- 9 Wang Yanmin, Meng Haiwei, Wang Yan *et al.*. Dielectric and optical properties of Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ thin films fabricated by pulsed-laser deposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 804~808
王艳敏,孟海卫,王 燕等. 脉冲激光沉积法制备钛酸锶钡薄膜及其光电性质[J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 804~808
- 10 E. D. Walsby. Growth and characterisation of birefringent films on textured silicon substrates[J]. *Microelectronic Engineering*, 2005, 78~79: 436~441
- 11 Habib Ammari. Analysis of thin coatings of nonlinear diffraction gratings [J]. *Nonlinear Analysis*, 2002, 3(4): 487~502
- 12 Qi Wang, Dawei Zhang, Hongbo He *et al.*. Compensation of reflectance response deviations of guided-mode resonant filters induced by over-etched fabrication [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(1): 70~72
- 13 Dawei Zhang, Limeng Yuan, Jiabi Chen *et al.*. Design of guided mode resonant filters for authentication applications through azimuthal angles varying[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, 6(10): 776~778
- 14 Chen Rongfa. Analysis and study on the capability of aluminium films prepared by electron beam vapour deposition and magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2003, (2): 11~15
陈荣发. 电子束蒸发与磁控溅射镀铝的性能分析研究[J]. *真空*, 2003, (2): 11~15