

文章编号: 0253-2239(2010)05-1451-04

用同步辐射光刻直接在有机玻璃板上制备 高深宽比亚微米光栅

李以贵¹ 杉山进^{1,2}

¹ 上海交通大学微纳米科学技术研究院, 薄膜与微细技术教育部重点实验室, 微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 上海 200240
² 日本立命馆大学微系统研究中心, 日本 滋贺 525-8577

摘要 为了将平面金属膜紧密耦合到纳米光栅形成的表面等离子体共振传感器, 以提高灵敏度, 以及利用亚微米光栅调整共振反射波长, 需要制备亚微米结构光栅。介绍了一种基于 X 光光刻的亚微米结构光栅的制造技术。该结构光栅是利用日本立命馆大学的同步辐射光源进行同步辐射光光刻, 在有机玻璃 (PMMA) 板上直接得到亚微米光栅。用此纳米加工技术获得的光栅线宽为 250 nm, 周期为 500 nm, 深宽比为 8 的 PMMA 亚微米结构光栅。还优化了曝光近接间隔、曝光剂量和显影时间等同步辐射光刻参数。

关键词 光栅; 同步辐射光刻; 亚微米光栅; 高深宽比; 纳米制造

中图分类号 TH741.6 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1451

Fabrication of High Aspect Ratio Sub-micron Gratings on PMMA Plate Based on Synchrony Radiation Lithography

Li Yigui¹ Sugiyama Susumu^{1,2}

¹ National Key Laboratory of Micro/Nano Fabrication Technology, Key Laboratory for Thin Film and Microfabrication Technology of Ministry of Education, Research Institute of Micro/Nano Science and Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
² Research Center of Microsystems, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

Abstract In order to increase the sensitivity of surface plasmon resonance sensors through planar metallic film closely coupled to nano-gratings and use grating period to adjust the wavelength of resonance reflection, sub-micron gratings is needed. The fabrication technique for sub-micro gratings structure is introduced. The sub-micron gratings are fabricated by synchrotron radiation (SR) lithography with SR source at Ritsumeikan University, Japan, and polymethylmethacrylate (PMMA) is used as X-ray resist. The 250 nm-width with 500 nm period pattern is successfully fabricated. The sub-micron grating with the aspect ratio of 8 is achieved. The lithography parameters such as proximity gap of exposure, the exposure dosage, and the development time influencing the structure are optimized to fabricate the gratings.

Key words gratings; synchrony radiation lithography; sub-micron gratings; high aspect ratio; nano fabrication

1 引言

光栅是一种非常重要的光学元件, 被广泛应用于光学测量、集成光学和光信息处理等领域中。高

密度光栅对于提高光学元件的分辨率、实现集成化等具有重要意义, 因此引起了人们的极度关注。刻划光栅和全息光栅在科学发展史上曾经起过重要作

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(60777016)、上海市浦江人才计划(09PJ1406200)、科技部国际合作项目(2009DFB10330)和航空重点实验室基金(20080857002)资助课题。

作者简介: 李以贵(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光 MEMS, LIGA 和微驱动器方面的研究。

E-mail: ygli@sjtu.edu.cn

用,虽然目前仍被广泛应用,但提供的功能已不能满足人们的需求^[1~6]。以德国为代表的 LIGA (LIGA 是德文 Lithographie-光刻、Galvanoformung-电铸和 Abformung-铸塑三个词的缩写)技术是利用 X 光光刻技术,通过电铸成型和铸塑形成深层微结构的方法,自 20 世纪 80 年代中期由德国开发出来以后得到了迅速发展^[7]。由于 LIGA 技术可以制作较大纵深比可达 1000 和较高精度的三维微细结构,侧壁垂直度可达 89.9° 以上,并且可以使用金属,无机非金属高分子等多种材料,在微机械,微系统集成等许多领域都显示出良好的应用前景。以前已用 LIGA 技术在曲面上制造出微米光栅^[8],用 X 光光刻技术在硅片上甩 PMMA 光刻胶制造出亚微米光栅^[9],用 X 光光刻法制备亚波长抗反射结构^[10],电子束光刻在硅片上制造出亚微米光栅^[11],并且在 DVD 读写头和生物工程等方面进行了应用探索。

亚微米光栅通常是指其周期小于可见光波长的周期性亚微米结构,利用亚微米光栅制作光导板^[12],利用纳米光栅形成光栅耦合器^[13],利用纳米光栅形成相位光栅偏振器^[14]等。PMMA 材料具有很多潜在的优点,比如成本低廉、工艺简单和具有优良的光学性能等,利用 PMMA 来制造纳米结构模具正在受到人们越来越多的重视。本文利用 X 光光刻工艺直接在 PMMA 板上制作亚微米结构光栅,研究了 X 光光刻来制作亚微米光栅的工艺,制造出周期为 500 nm,深宽比为 8 的 PMMA 亚微米光栅。

2 高深宽比纳米光栅的制造工艺

采用 X 光光刻工艺制造高深宽比纳米光栅。X 光光刻设备是日本立命馆大学 575 MeV 存储环的同步辐射光源 AURORA 第五号束线,X 光波长范围是 0.15~0.95 nm,光刻主要工艺流程包括:1)制备 X 光掩模板;2)选择光刻胶和基板,这里就是 PMMA 板材;3)X 光曝光;4)显影。在掩模板支架上安装好 X 光掩模板,在基板支架上安装好 PMMA 板,用薄膜作为间隔物(Spacer)调整掩模板和基板之间的间隔。间隔物的作用是防止基板与 X 光掩模板接触而损坏价格昂贵的 X 光掩模板。图 1 所示为 X 光掩模板结构示意图。它主要由三个部分组成:吸收体钽(Ta),厚度为 $0.5 \mu\text{m}$;支撑膜 SiC,厚度为 $2.2 \mu\text{m}$;框架为 100 mm(4 inch)的硅片。采用钽作为 X 光掩模板的吸收材料,是因为钽

具有吸收率高、热膨胀率低、加工容易和加工精度高等优点。钽材料吸收 X 光,而 SiC 材料透过 X 光。

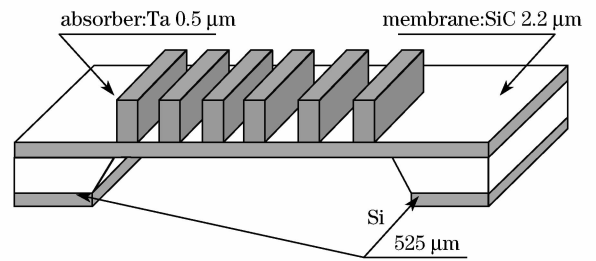


图 1 X 光掩模板的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of X-ray mask

图 2 所示为制备好的 X 光掩模板,吸收体包含要转写到 PMMA 板的亚微米图形。图 3 所示为掩模板—PMMA 板之间间距(单位: μm)与光刻分辨率极限(单位:nm)的关系曲线。从图中可看出:掩模板和基板之间的间隔为 $22.2 \mu\text{m}$ (大约是胶纸带的厚度)时,由 X 射线的衍射引起的光刻分辨率极限为 100 nm。

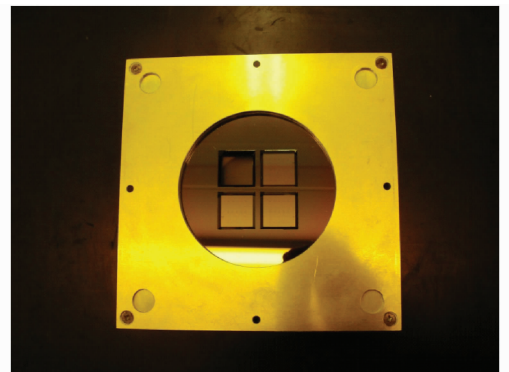


图 2 X 光掩模板实物图

Fig. 2 Physical picture of X-ray mask

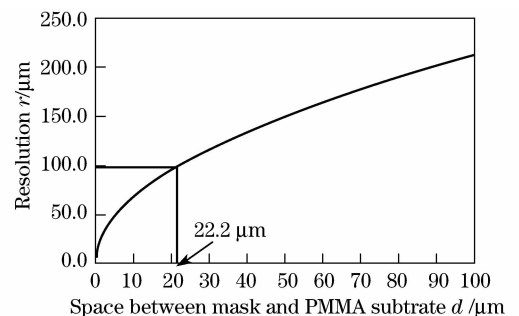


图 3 掩模板—PMMA 板之间间距与光刻分辨率极限的关系曲线

Fig. 3 Relationship between the resolution and the space between X-ray mask and PMMA substrate

掩模板框架与吸收体和支撑膜坚固的构成一体,以便作为一体来装配和拆卸。用 X 光曝光法将图案从 X 光掩模板上转移到 PMMA(日本日东树

脂工业公司)板上, X 光曝光量为 $0.0028 \text{ A} \cdot \text{h}$ 。PMMA 板的透射率为 93%, 折射率为 1.49, 热形变温度为 $110 \text{ }^\circ\text{C}$, 通常 PMMA 的分子量在 $10^5 \sim 10^6 \text{ g/mol}$ 之间。用 ALPHA STEP 500 台阶仪测得 PMMA 板材的平均表面粗糙度为 3.82 nm 。最大表面粗糙度为 4.52 nm , 而最小表面粗糙度为 3.04 nm 。用 GG 显影液显影在 $23 \text{ }^\circ\text{C}$, 10 min 显影, 用 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 纯净水清洗 10 min , 就得到了图 4 所示的结果, 加工深度为 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 。GG 显影液的成分(体积比)是: 20% 的 tetrahydro1,4-oxazine(六原子环化合物), 5% 的 2-aminoethanol-1(主要是胺), 60% 的 2-(2-butooxyethoxy) ethanol(乙二醇醚), 和 15% 水。显影后的干燥采用 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热板和常温干燥相比较, 发现常温干燥比较好。实验结果表明, 制造出周期为 500 nm , 深宽比为 8, 垂直度为 88.4° 的 PMMA 亚微米结构光栅。

3 实验结果与讨论

图 4 所示为 PMMA 板上制备的亚微米光栅实物图。图 5 所示为经 X 光光刻工艺后得到的亚微米结构光栅。图 5(a)为光栅的 SEM 照片, 图 5(b)为光栅的剖面 SEM 图。X 光曝光量为 $0.0028 \text{ A} \cdot \text{h}$, 加工深度为 $2.0 \text{ }\mu\text{m}$, 亚微米结构光栅的表面粗糙度为 7.55 nm 。图 6 为显影时间, 曝光量与 PMMA 刻蚀深度的关系。从图中看出加工的深度随着 X 光曝光量以及显影时间的增加而增加。

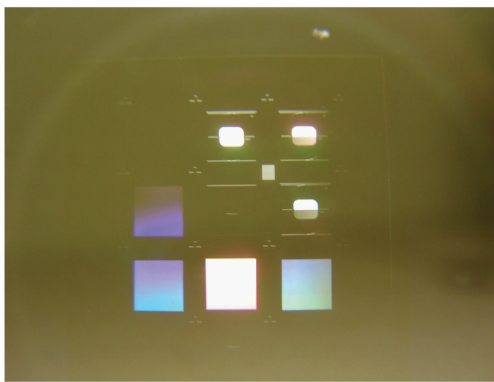


图 4 制备的亚微米光栅实物图

Fig. 4 Physical picture of fabricated sub-micrometer gratings

4 结 论

制备高密度光栅的方法很多, 传统的方法包括机械刻划和化学刻蚀等, 这些方法一般精度较低且难以制备亚微米高密度光栅。本文研究是在板材 PMMA 上制备亚微米高密度光栅, 解决了用纳米压

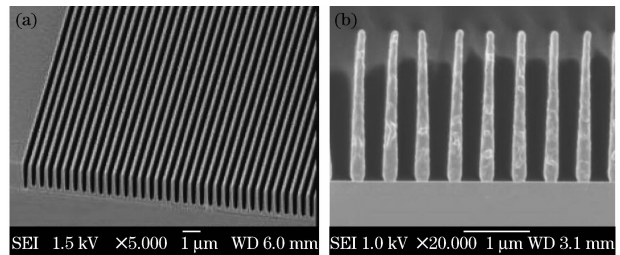


图 5 (a)光栅的 SEM 照片; (b)光栅的剖面 SEM 图

Fig. 5 (a) SEM photo of gratings; (b) cross-section SEM photo section of gratings

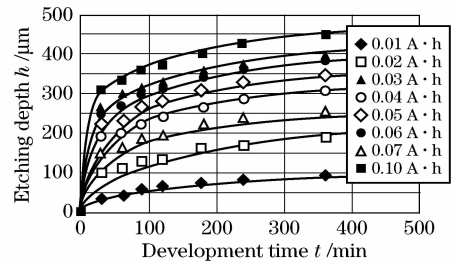


图 6 显影时间、曝光量与 PMMA 刻蚀深度的关系

Fig. 6 Relationship between development time, exposure dose and PMMA etching depth

印法(nano-imprint lithography)和软式刻印法(soft lithography)等, 在 PMMA 板上制备亚微米光栅在脱模过程中造成图形的变形和失真问题。此外, 还讨论了制备过程中, 显影时间不同对 PMMA 亚微米光栅的加工深度的影响。

参 考 文 献

- 1 J. Zhao, A. Wang, Abbaspour-Sani E. *et al.*. Improved efficiency silicon solar cell module[J]. *IEEE Electr. Device L.*, 1997, **18**(2): 48~50
- 2 J. Zhao, M. A. Green. Optimized antireflection coatings for high-efficiency silicon solar cells[J]. *IEEE T. Electron Dev.*, 1991, **38**(8): 1925~1934
- 3 P. Nubile, Analytical design of antireflection coatings for silicon photovoltaic devices[J]. *Thin Solid Films*, 1999, **342**(1,2): 257~261
- 4 P. Lalanne, G. M. Morris. Design, fabrication, and characterization of subwavelength periodic structures for semiconductor antireflection coating in the visible domain[C]. *SPIE*, 1996, **2776**: 300~309
- 5 M. A. Green, A. W. Blakers, J. Zhao. *et al.*. Characterization of 23-percent efficient silicon solar cells[J]. *IEEE T. Electron Dev.*, 1990, **37**(2): 331~336
- 6 Y. Toma, M. Hatakeyama, K Ichiki. *et al.*. Fast atom beam etching of glass materials with contact and non-contact masks [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(12B): 7655~7659
- 7 W. Ehrfeld, H. Lehr. Deep X-ray lithography for the production of 3D microstructures [J]. *Radiat. Phys. Chem.*, 1995, **45**(3): 349~365
- 8 Li Yigui, Sugiyama Susumu. Fabrication of microgratings on PMMA plate and curved surface by using copper mesh as X-ray lithography mask[J]. *Microsystem Technologies*, 2007, **13**(3-4): 227~230

- 9 Li Yigui, Sugiyama Susumu. Sub-wavelength gratings base on X-ray lithography [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, **5**(4): 249~252
李以贵, 杉山进. 用 X 光光刻亚波长光栅[J]. *纳米技术与精密工程*, 2007, **5**(4): 249~252
- 10 Li Yigui, Sugiyama Susumu. Sub-wavelength anti-reflection gratings base on X-ray lithography [J]. *Microfabrication Technology*, 2008, (1): 14~16
李以贵, 杉山进. 用 X 光光刻法制备亚波长抗反射结构[J]. *微细加工技术*, 2008, (1): 14~16
- 11 Li Yigui, Chen Di, Zhu Jun *et al.*. Sub-wavelength gratings based on a new microfabrication technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 1008~1010
李以贵, 陈迪, 朱军等. 基于一种新微细加工技术的亚波长光栅的研制[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 1008~1010
- 12 Ye yan, Pu Donglin, Zhou Yun *et al.*. Research on transmission diffraction characteristics of sub-micron gratings for light guide plate [J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(5): 55~56
叶燕, 浦东林, 周云等. 用于光导板的亚微米光栅透射衍射特性分析[J]. *激光杂志*, 2007, **28**(5): 55~56
- 13 Liu Qiuping, He Xingdao, Zhang Aiyun *et al.*. Linear solution for coupled-wave equation of onlinear recording grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 977~980
刘秋平, 何兴道, 张霭云等. 线性化求解非线性记录光栅耦合波方程[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 977~980
- 14 Zhang Guoping, Ye Jiaxiong, Li Zaiguang. Coupled-wave analysis of polarization properties of phase gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(12): 1819~1823
张国平, 叶嘉雄, 李再光. 相位光栅偏振特性的耦合波分析[J]. *光学学报*, 1996, **16**(12): 1819~1823

光 学 界 百 科 全 书

——《光学手册》(新版)面世在即

五十年前,随着第一台红宝石激光器的问世,光学进入到一个全新的领域和崭新的发展时代。五十年间,光学界发生了史无前例、翻天覆地的变化,毫不夸张地说,光学已经深入到我们社会生活的每一个角落,影响着所有人的生活。

如今,从事光学研究的学者越来越多,光学专业的学生越来越多,应用光学的行业也越来越多。此时,一本内容丰富全面、涵盖光学领域所有学科的光学百科全书成为相关人士日益迫切的需求。在这种需求下,新版《光学手册》应运而生,经历六年反复酝酿,四年悉心编撰,该书将于近期与广大读者见面。

新版《光学手册》是原《光学手册》(25章,230万字)的修订版。原书出版于1986年,出版后得到了严济慈、王大珩、龚祖同等老一辈科学家的高度评价,称之为填补国内空白,“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”,手册迄今仍是许多光学技术人员案头必备的权威参考书。

但是,在原《光学手册》出版后的25年间,光学理论和技术飞速发展,发生了质的飞跃,完成了从传统光学向现代光学的转变。现代光学包涵传统光学、光电子学和光子学。原书中全部章节内容需要更新,新发展起来的涉及光学的边缘学科需要增添。因此,新版《光学手册》绝非传统意义上的修订,而是一个创新的版本。

“一本有国际影响力的能反映时代脉搏的观念创新的学术性工具书”——这是编者对新版《光学手册》的定位。

新版《光学手册》包含38章、49个光学学科、460万余字,其内容精深到位,基本涵盖了目前光学领域所涉及的所有学科,为光学工作者和非光学科技人员提供了几乎所有光学分科的基本概念、基本原理、基本方法、基本公式和基本数据,翔实而新颖,实用而方便,可谓内容丰富,近乎光学百科全书而更为精深之,实属又一部高水平学术专著。在本书中,诸如电磁光学、纳米光子学、生物光子学、瞬态光学、同步辐射光学、太赫兹波光学、中子光学、非成像光学及自由曲面光学、近场光学和金属表面等离子体光学之类新兴光学学科也将与大家见面。