

文章编号 :0253-2239(2002)08-1008-03

基于一种新微细加工技术的亚波长光栅的研制

李以贵¹⁾ 陈 迪¹⁾ 朱 军¹⁾ 杨春生¹⁾ 金森义明²⁾

(1), 上海交通大学微纳米科学技术研究院, 上海 200030
(2), 日本东北大学机械电子系, 日本宫城县仙台市 980-7985)

摘要: 描述了一种新的亚波长光栅的微细加工技术,即电子束(EB)扫描曝光得到相应的亚微米级的线宽图形,再利用快速原子束刻蚀设备获得了高深宽比的立体结构。用此加工技术获得了 100 nm 以下的刻蚀精度,并研制成功亚波长光栅。该亚微米线宽微细加工技术可用于布拉格光栅、半导体激光器、无反射表面等需要亚微米结构的器件中。

关键词: 电子束扫描曝光;快速原子束刻蚀;亚波长光栅

中图分类号: TN205 文献标识码: A

1 引 言

目前,亚微米加工技术已受到世界发达国家的高度重视。日本已经开发出制作 100 nm 以下的精细量线结构的技术。美国在理论、系统设计到加工组装技术,及器件研制方面都已有出色的结果。亚波长光栅是一种光栅栅距周期小于光波长的光栅。当光照射到它的表面,它具有不发生高次衍射波的特点。制成不同的结构形状,可使其具有连续的折射率分布以及光学各向异性,可能改变光的波长、相位、偏振等。可用于防反射表面、偏光器件、光学滤波器、高效率衍射器件等光学器件中。利用此特性,可望在某些情况下代替多层膜,作为防反射表面器件。防反射表面器件可应用于太阳能电池、半导体激光二极管、发光二极管、光纤端面、光波导输入输出耦合器件等光通信中,以提高效率。由于多层膜结构受到涂层物理或化学性质的影响,会产生膜层不均匀、热失配、膜层不稳定等问题^[1-5]。而硅基片亚波长光栅作为无反射表面可克服这些问题。

本文主要提出了一种新的亚波长光栅的微细加工技术,即电子束(EB)扫描曝光和快速原子束刻蚀来获得高深宽比的立体结构。用此加工技术在硅基片上获得了 100 nm 以下的刻蚀精度,并研制成功亚波长光栅。我们对此硅基亚波长光栅的反射率进行了测试,发现它的反射率远远低于硅基片的反射率。

2 快速原子束刻蚀设备及样品制备

2.1 快速原子束刻蚀设备

图 1 为快速原子束刻蚀设备的工作原理图^[6]。它由两个平行圆板阴极和一个圆板阳极构成。每个电极中都有许多毛细管形成通道,使加速气体分子以同一方向从真空腔上部进入真空腔下部,最后轰击基板。两个平行圆板阴极和一个圆板阳极之间加高压直流电,以使气体分子加速,反应气体是从真空腔上部进入真空腔下部。生成的正离子被加速到阴极,并在毛细管中同残余气体分子进行能量交换变成电中性原子(或分子)。形成的中性原子由于毛细管作用可得到很好的方向性。因此,快速原子束刻

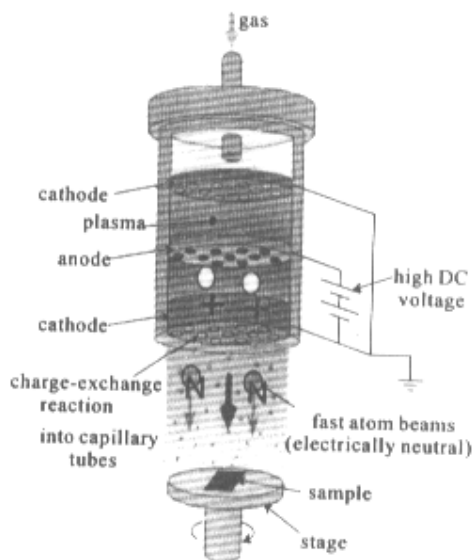


Fig.1 Schematic view of fast atom beam source

蚀的特点是具有良好的方向性和电中性。它可容易加工小于 10 nm 的图形。利用 SiO_2 作为掩膜,可得到很好的宽深比结构。快速原子束刻蚀是一种各向异性刻蚀。通常的反应离子刻蚀,由于受表面电荷积累的影响,不容易加工小于 10 nm 的图形,而快速原子束刻蚀可很好地控制刻蚀深度。

2.2 样品制备

用 200 μm 厚的(100)双面抛光 n 型硅基板作为样品。基板上涂覆电子束用光刻胶(Nippon Zeon Co. Ltd; ZEP520),胶厚大约 400nm。然后,由电子束扫描装置(ELIONIX Co. Ltd; ELS3700)进行电子曝光,写上所需的亚波长图形。在电子束扫描过程中,加速电压为 30 kV,电子束电流为 10 pA,相当于 $80 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 的电子曝光剂量。图 2 为快速原子束刻蚀示意图。曝光后,基板在 23 $^\circ\text{C}$ 的醋酸戊酯显影液中显影 5 min,再放入甲基异丁酮(MIBK)溶液中漂洗 30 s 即可。显影后,可放入 180 $^\circ\text{C}$ 炉中烘 10 min,再将此基板放入快速原子束(EBARA Co. Ltd; FAB-60ML)腔中,使用反应气体 SF_6 进行刻蚀。 SF_6 流量是 6.7 sccm,刻蚀时间约 17 min,放电电压为 2 kV,放电电流为 40 mA。刻蚀后,电子束用的正胶用浓硫酸和双氧水(体积比 1:1)溶液去除。到此即完成所需的亚波长光栅的制备。

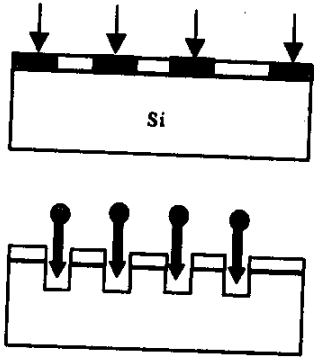


Fig. 2 Process steps in the fabrication of sub-wavelength gratings (SWG)

3 结果分析与讨论

图 3 为在 2 cm^2 硅基板上制备的亚波长格子光栅的电镜图。光栅的周期为 200 nm,深为 300 nm,深宽比为 2:1。在 1.2 mm^2 的正方形面积内,总曝光时间约 10 h。图 4(a)、图 4(b)为在硅基板上制备的周期分别为 500 nm、200 nm 线光栅的电镜图。它们的面积大小分别为 0.5 mm^2 和 0.2 mm^2 ,曝光时间约 4 h。

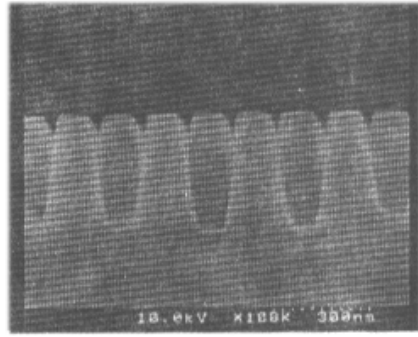


Fig. 3 Scanning electron microscope photography of sub-wavelength gratings

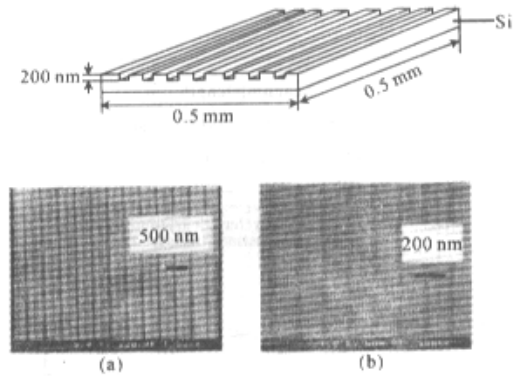


Fig. 4 Scanning electron microscope photography of 500 nm, 200 nm line gratings, respectively

图 5 是周期为 500 nm 线光栅的原子力显微镜 (AFM) 图及断面轮廓图。从图中看出深宽比约为 1:1。在 2 cm^2 硅基板上制备的亚波长格子光栅上射入一束可见光,由于 1.2 mm^2 的正方形区域内几乎是无反射表面,所以该区域看上去全黑。图 6 是在 200 nm ~ 1000 nm 波段中光栅的周期为 200 nm 的样品的反射率曲线。在此测量中,入射光为随机偏振光。图中虚线表示格子光栅的反射率曲线测量值,另一条线为理论计算值,实线表示抛光硅基板的反射率曲线。从图中看出在 200 nm ~ 1000 nm 波段中亚波长格子光栅的反射率大幅度降低,在 200 nm ~ 800 nm 波段中反射率小于 3%。例如,在 400 nm 波长上,反射率从 54.7% 降到 1.0%。而且,测量值与理论计算值非常一致。反射率还随光栅的深度/周期比的增加而减少。这种光栅可以得到低反射率是由于亚波长格子光栅只产生零次折射,故又叫零次光栅。在理论上求解它的反射率是通过电磁场理论与界面边界条件连续性求解反射率振幅来计算的。而粗糙表面的低反射率是由于漫反射。在存在漫反射时,原来理想界面的镜反射减少。低反射率使光能吸收率提高,也能达到高透射率,如玻璃基板在 400 nm ~ 900 nm 波段中透射率提高 1.5%。

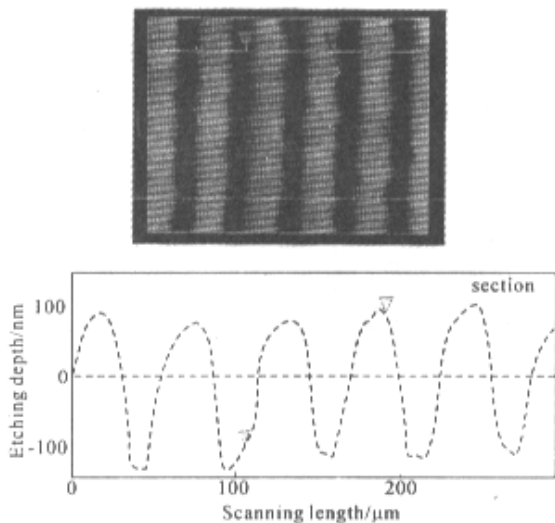


Fig.5 AFM photography and cross-section view of 500 nm line gratings

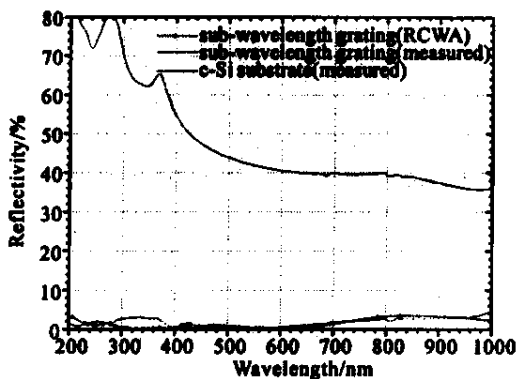


Fig.6 Reflectivity of a 150 nm grating period sample

结论 本工作用电子束扫描曝光结合快速原子束刻蚀工艺来加工硅基板亚波长格子光栅和线光栅。该工艺也适用于其它材料如玻璃、石英等非硅材料基

板的纳米结构的加工。利用该工艺,我们制作出了亚波长格子光栅和线光栅,并用扫描电子显微镜和原子力显微镜对亚波长光栅的形状进行了测量。还用反射率测量仪对硅基板亚波长格子光栅的反射率进行了测量,并与无结构抛光硅表面的反射率进行了比较。结果表明在 200 nm ~ 1000 nm 波段中亚波长格子光栅的反射率大幅度降低,此特性可应用于太阳能电池及光电器件的表面改性中,以提高太阳能电池及光电器件效率。

本研究工作大部分在日本东北大学风险事业实验室(Venture Business Laboratory)实验室完成,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Zhao J, Wang A, Abbaspour-Sani E *et al.*. Improved efficiency silicon solar cell module. *IEEE Electron Device Lett.*, 1997, **18**(2): 48 ~ 50
- [2] Zhao J, Green M A. Optimized antireflection coatings for high-efficiency silicon solar cells. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1991, **38**(8): 1925 ~ 1934
- [3] Nubile P. Analytical design of antireflection coatings for silicon photovoltaic devices. *Thin Solid Films*, 1999, **342**(1-2): 257 ~ 261
- [4] Lalanne P, Morris G M. Design, fabrication, and characterization of subwavelength periodic structures for semiconductor antireflection coating in the visible domain. *Proc. SPIE*, 1996, **2776**: 300 ~ 309
- [5] Green M A, Blakers A W, Zhao J *et al.*. Characterization of 23-percent efficient silicon solar cells. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1990, **37**(2): 331 ~ 336
- [6] Toma Y, Hatakeyama M, Ichiki K *et al.*. Fast atom beam etching of glass materials with contact and non-contact masks. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(12B): 7655 ~ 7659

Sub-Wavelength Gratings Based on a New Microfabrication Technology

Li Yigui¹⁾ Chen Di¹⁾ Zhu Jun¹⁾ Yang Chunsheng Kanamori Y²⁾

(1), Research Institute of Micro/Nanometer Science and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030

(2), Department of Mechanical-Electronic, Tohoku University, 980-7985, Japan

(Received 2 July 2001; revised 14 September 2001)

Abstract: A new microfabrication method—electron beam scanning exposure and fast atom beam etching—to fabricate sub-wavelength gratings is described. 100 nm line width period structures and gratings can be obtained by this process. It can be applied in the devices with sub-microns structures such as Bragg gratings, semiconductor laser and anti-reflection surfaces.

Key words: electron beam scanning exposure; fast atom beam etching; sub-wavelength gratings