

微纳金属光学结构制备技术及应用

谢常青^{1,2} 朱效立^{1,2} 牛洁斌^{1,2} 李海亮^{1,2} 刘 明^{1,2} 陈宝钦^{1,2} 胡 媛^{1,2} 史丽娜^{1,2}

(¹ 中国科学院微电子研究所纳米加工与新器件集成技术研究室, 北京 100029)
(² 中国科学院微电子研究所微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029)

摘要 微纳光学结构制备技术一直是微纳光子学器件发展的技术瓶颈。针对微纳光学结构制备技术向小尺寸、高精度和广泛应用发展的趋势,报道了基于电子束、X 射线和接近式光学的混合光刻制作微纳金属光学结构技术。针对微纳光子学器件复杂图形开发了微光刻数据处理体系,基于矢量扫描电子束光刻设备在自支撑薄膜上进行 $1\times$ 高分辨率图形形成,利用 X 射线光刻进行高宽比微纳图形复制,再利用低成本接近式光学光刻技术进行金属加强筋制作。还报道了自支撑 X 射线金光栅衍射效率和抗振测试结果。

关键词 光学制造;微纳光学结构;电子束光刻;X 射线光刻;自支撑薄膜

中图分类号 O436.1; TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900128

Micro- and Nano-Metal Structures Fabrication Technology and Applications

Xie Changqing^{1,2} Zhu Xiaoli^{1,2} Niu Jiebing^{1,2} Li Hailiang^{1,2}
Liu Ming^{1,2} Chen Baoqin^{1,2} Hu Yuan^{1,2} Shi Lina^{1,2}

¹Key Laboratory of Nano-Fabrication and Novel Devices Integrated Technology,
Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

²Key Laboratory of Microelectronics Devices and Integrated Technology, Institute of Microelectronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract Fabrication of micro- and nano-optical structures has been the technical bottlenecks in the development of micro- and nano-photonics devices. In order to meet the small size, high precision and wide applications requirements raised by micro- and nano-optical structure fabrication technologies, we report the electron beam/X-ray/optical mixed lithography technology for the fabrication of micro- and nano-optical structures. Home-made microlithography data processing technology is developed for the generation of complex patterns of micro- and nano-optical photonic devices, $1\times$ high-resolution patterning of the membrane-type masks is carried out by a vector-scanned electron beam lithography tool, high-aspect-ratio micro- and nano-optical patterns are replicated by X-ray lithography, and accurate overlay between X-ray lithography and low-cost optical proximity lithography is carried out for the generation of metal ribs. The results of diffraction efficiency test and seismic experiment for free-standing X-ray gold gratings are also reported.

Key words optical fabrication; micro- and nano-optical structures; electron beam lithography; X-ray lithography; free-standing membrane

OCIS codes 220.3740; 130.3990; 220.4241; 220.4000

1 引 言

微纳光学结构制备技术是指将现有的大规模集成电路设备、工艺加以改进和提高,在微米到纳米尺

度范围内进行尺寸可控、定位精确、一致性好的任意光学结构加工,其目标是实现设定的光学功能。在红外、可见光、紫外、极紫外(EUV)乃至 X 射线波

收稿日期: 2011-05-30; 收到修改稿日期: 2011-07-02

基金项目: 国家 973 计划(2007CB935302)资助课题。

作者简介: 谢常青(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事微纳光学结构制作及衍射元件、光学掩模应用等方面的研究。E-mail: xiechangqing@ime.ac.cn

段,借助微纳光学结构制备技术,人们可以在微米、纳米尺度上对光波的物理特性进行调控和利用,实现传统光学难以完成的任意波面变换光学功能,符合现代光学仪器集成化、智能化的发展趋势,具有重大的前沿科学意义与应用前景。

长期以来,由于缺乏高精度微纳光学结构加工装备、工艺集成难度大、缺乏核心专利和技术标准等诸多原因,我国微纳光学结构制备技术远落后于西方先进国家,导致我国的微纳光子学器件研究大多集中于理论基础和设计方法^[1],高精度微纳光子学器件加工制作、性能测试和系统应用的研究报道较少,批量化生产微纳光子学器件的研究报道更少。这不仅导致我国一些重大工程急需的一些微纳光子学器件不能自给,而且也影响了我国微纳光子学的学科发展。

微纳光学的发展由大规模集成电路工艺水平的进步所推动^[2]。微纳光学结构制备技术,尤其是先进的光刻、刻蚀和薄膜沉积技术一直是微纳光子学器件发展的技术瓶颈。早在1964年科研人员就利用当时最先进的集成电路制版设备制作了世界上第一张计算机全息图^[3]。20世纪70年代,我国科学家在缺乏先进集成电路制版设备的情况下,利用大型刻绘图机研制成功用于1 k集成电路的光学光刻掩模版,金属光学结构分辨率达到 $10\ \mu\text{m}$ ^[4]。20世纪80年代,基于同步辐射装置,我国科学家开展了X射线光刻技术和X射线微纳光子学器件的研究^[5]。近年来,针对微纳光学结构制备技术向小尺寸、高精度和广泛应用发展的趋势,为满足我国激光惯性约束

聚变等离子体诊断系统、先进同步辐射装置、极紫外光刻装置和天文探测装置等多项国家重大工程对微纳光子学器件的迫切需求,借鉴微电子器件光刻技术的发展经验,本课题组提出了基于电子束、X射线和接近式光学混合光刻的微纳金属光学结构制备技术,研制成功10多种类型的微纳光子学器件,所研制的器件成功应用于多项国家重大工程。本文报道了近年来本课题组在这方面的研究工作情况。

2 X射线微纳光子学器件结构及制备技术

在X射线波段,没有任何一种材料在比较厚时能对X射线完全透明,也没有任何一种材料在比较薄时能完全吸收X射线,因此X射线波段的微纳光子学器件的结构是在低原子序数的自支撑薄膜(如氮化硅、碳化硅和氮化硼等)上形成微纳米尺度的高高宽比高原子序数金属(如Au、Ta和W等)结构,如图1所示。为了提高反差,要求吸收体厚度尽可能厚(对于高能X射线,其厚度通常要求大于 $1\ \mu\text{m}$),而自支撑薄膜尽可能薄(对于EUV,通常要求小于 $50\ \text{nm}$ 甚至镂空)。为了提高分辨率,要求吸收体线周期尽可能小;为了提高衍射效率,要求吸收体线空比控制尽可能精确,吸收体剖面尽可能陡直。毫无疑问,在极薄或镂空的自支撑薄膜上制作微纳尺度、高高宽比、陡直、占空比接近1:1的高原子序数金属结构,极大地挑战微纳光学结构制备技术的极限。

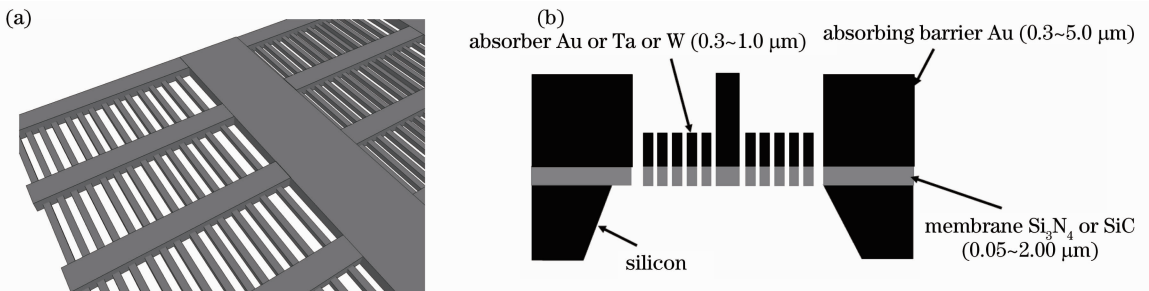


图1 X射线微纳光子学器件示意图。(a)俯视图;(b)剖面图

Fig. 1 Schemes of the X-ray micro- and nano-photonic devices. (a) Top view; (b) side view

微纳光学结构制备技术可以分为以刻蚀为主的减法工艺和以电镀为主的加法工艺两种。对于微纳金属光学结构,考虑到线宽控制、选择比、聚合物和微负载效应等诸多技术难题,目前的高密度电感耦合等离子体刻蚀技术水平很难满足需求,因此国际上微纳金属光学结构制作大部分是基于加法工艺进

行的,其关键是高分辨率的光刻技术,包括电子束光刻、激光全息光刻、纳米压印、聚焦离子束、机械刻划、X射线光刻、激光直写^[6]和表面波等离子体光刻等。其中电子束光刻法可以获得最高的分辨率,采用氢硅倍半氧烷(HSQ)工艺,当前分辨率可以达到 $4.5\ \text{nm}$ ^[7],但是其胶厚仅为 $10\ \text{nm}$,并没有研制出相

应的器件。采用两次电子束叠加光刻研制的波带片最外环宽度可以达到 12 nm^[8],但是金厚度仅为 30 nm,而且工艺复杂。采用电子束光刻和三层胶工艺,Ni-Ge 两层复合金属光学结构的分辨率可以达到 16 nm,总厚度为 100 nm^[9],而对于最外环宽度达 100 nm 的金波带片^[10],金吸收体厚度为 1 μm,高高宽比达到10:1,但是相应的器件性能没有报道。基于 X 射线光刻技术研制的波带片最外环宽度达到 450 nm,金厚度高达 4.6 μm^[11]。

尽管电子束光刻技术,尤其是当今最先进的 100 keV 电子束光刻技术在微纳光学结构制备方面取得了诸多重要进展,但是难题仍然存在,主要包括:1) 由于邻近效应影响,电子束光刻分辨率随着光刻胶厚度增加而呈指数下降,导致高高宽比的纳米光刻胶图形难于制作;2) 很多微纳光学结构图形呈非周期性变化,也不是直线,图形尺寸分布范围从微米到纳米,邻近效应很难补偿,微光刻数据量也急速上升,影响了定位精度;3) 电子束光刻分辨率受灯丝状况影响,当灯丝运行时间超过 1000 h,电子束聚焦束斑形状会逐步恶化;4) 电子束光刻采用串行直写方式,效率很低,成本很高。当然,无论对于光学光刻、纳米压印还是 X 射线光刻,电子束光刻技术都是生成掩模版的主要手段。

3 基于电子束、X 射线和接近式光学混合光刻的微纳金属光学结构制备

X 射线光刻从 2000 年开始投入化合物半导体生产线^[12]。其原理非常简单,入射 X 射线经过 1:1 X 射线掩模后直接入射到光刻胶表面,除具有无像差、分辨率高、焦深大、衬底无反射和生产效率高外,固有优点外,X 射线固有的高穿透性使 X 射线光刻特别适合于制作高高宽比光刻胶图形,而这正是微纳金属光学结构制作所需要的。基于电子束、X 射线和接近式光学光刻各自的优越性,提出了基于电子束、X 射线和接近式光学混合光刻的微纳金属光学结构制备方法,其原理如图 2 所示。首先利用电子束光刻技术在自支撑薄膜上制备低高宽比 X 射线掩模,然后利用 X 射线光刻进行高高宽比微纳图形复制,最后再利用低成本接近式光学光刻技术^[13]套刻微米级、厚度大于 2 μm 的吸收阻挡层。该方法充分利用了电子束光刻高分辨任意图形发生能力、X 射线光刻陡直的高高宽比光刻能力和接近式光学光刻的低成本等优点,详细工艺步骤可参考相关文献^[14~19]。

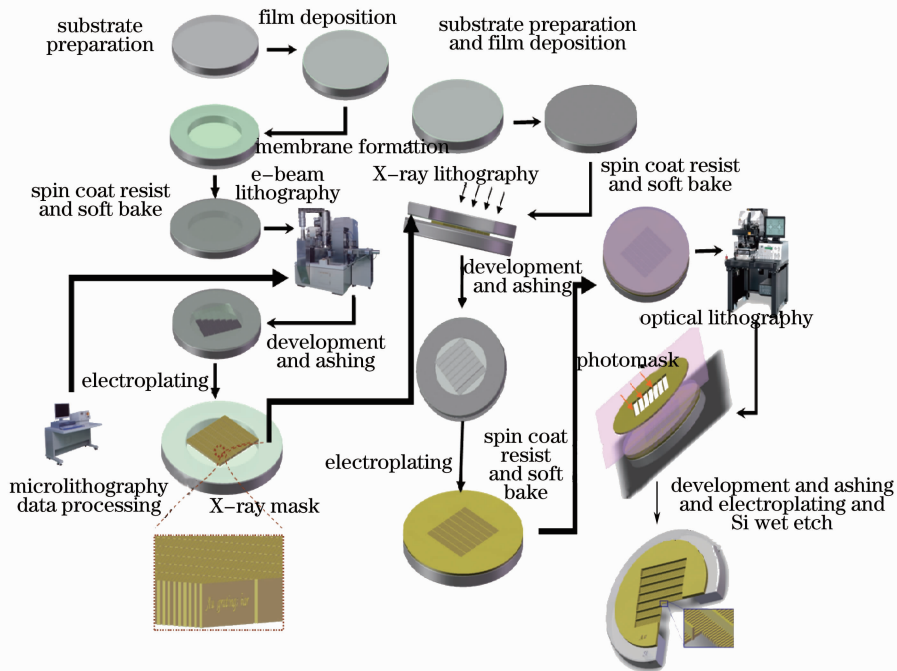


图 2 微纳金属光学结构制备工艺基本流程

Fig. 2 Basic process flow chart for the fabrication of micro- and nano-metal structures

3.1 微纳光子学器件的微光刻数据处理体系

微纳光学结构制备的第一步是要把设计的器件图形进行数据处理与格式转换,把设计者意图转换

为电子束曝光系统所能识别的数据,这种转换通常是基于主流集成电路版图设计软件(如 Tanner L-Edit 等)进行的。这类主流设计软件支持基于标准

单元的掩模版图自动生成,但是对于圆弧和任意函数曲线等复杂图形必须采用手工绘图方法进行图形编辑,而这通常是一些微纳光子学器件所需要的,并且目前图形生成器所产生的任意一个多边形的顶点数不得超过 200 个,既影响数据精度和效率,也增加了微光刻数据量和电子束光刻成本。为此以 Tanner L-Edit 为架构,二次开发了可处理任意角度、任意曲线及复杂图形的光学掩模与纳米器件版

图设计软件,开发了通用的微纳光子学器件图形类库,对波带片、光子筛、复杂光栅等各种函数曲线图形以及任意椭圆或圆形组成的图形数据进行输入优化,弥补了主流集成电路版图设计软件无法自动处理复杂、任意图形的缺陷,提高了复杂图形的数据处理精度和效率。图 3 给出了一个典型的采用该软件自动生成的聚焦光子筛光学器件^[20,21]图形数据。

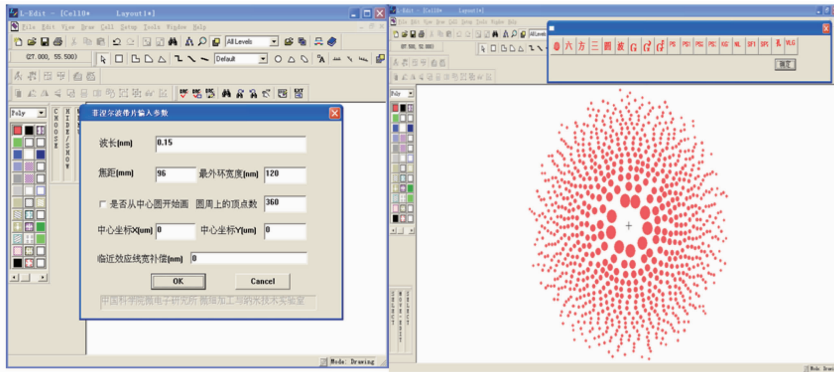


图 3 光子学器件复杂图形微光刻数据处理系统

Fig. 3 Microlithography data processing system for the generation of complex patterns of micro- and nano-photonics devices

3.2 基于自支撑薄膜的电子束光刻技术

如上所述,制作的 X 射线掩模所采用的电子束光刻技术是在自支撑薄膜上进行的。基于自支撑薄膜的具有实际图形转移功能的纳米电子束光刻技术,可以较常规电子束光刻技术大大提高分辨率。其原因是在石英或硅片衬底上进行电子束光刻时,入射高能电子束经过光刻胶后会在衬底中发生散射,不仅使光刻胶中有图形的区域受到曝光,同时也使其邻近区域的光刻胶曝光,从而导致显影后光刻

胶图形发生变形,边缘模糊,陡度下降,图形的形状向邻近区域扩展。而基于自支撑薄膜进行电子束光刻,入射高能电子束透过光刻胶和自支撑薄膜后大部分会消失,只有极少数入射电子会发生背散射。采用蒙特卡罗方法分别模拟了 50 和 100 keV 的高能入射电子束在硅片衬底和自支撑薄膜上的散射情况,结果如图 4(a), (b) 所示,证实了上述分析。图 4(c), (d) 给出了电子束极限分辨率光刻的实验结果,其中图 4(c) 的网格线宽为 5 nm,图 4(d) 的点阵分辨率为 20 nm。

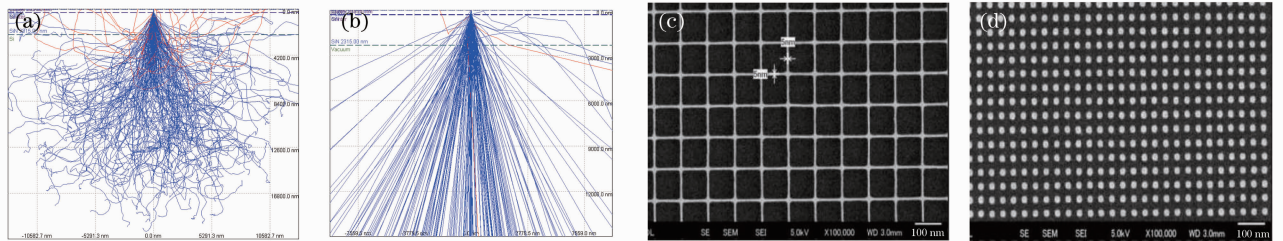


图 4 电子束光刻模拟与实验结果。(a) 50 keV; (b) 100 keV; (c) 5 nm 图形; (d) 20 nm 图形

Fig. 4 Simulated and experimental results of electron beam lithography. (a) 50 keV; (b) 100 keV; (c) 5 nm lattices; (d) 20 nm dot arrays

3.3 用于高宽比金属微纳结构的 X 射线光刻复制

X 射线光刻在制作具有陡直剖面的纳米级图形方面具有独一无二的优势^[22]。本文的 X 射线光刻复制工作是基于北京同步辐射装置和国家同步辐射实验室同步辐射装置^[23]进行的,使用的 X 射线波长范围为 0.5~2.0 nm。为了进一步提高 X 射线光刻

复制质量,采用了三种技术改进措施:将 X 射线掩模进行相应的图形校正以抵消 X 射线光刻过程中直边菲涅耳衍射引起的图形邻近区域扩展;采用先进行图形复制再进行体硅腐蚀的方案以有效减小掩模和基底之间的间隙;采用一个环形的高强度钕铁硼永磁体将掩模和衬底紧压在一起,使得曝光间隙

大幅减小。由永磁体产生的磁力是恒定的,每次曝光的间隙可以很好地保持一致,从而保证了 X 射线光刻复制的重复性。

采用 X 射线光刻复制方法制备了系列微纳光学元件^[24~26],复制采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)光刻胶或 ZEP520A 光刻胶,之后以显影后的光刻胶为模子进行脉冲电镀,从而将光刻胶的图形转换成金结构。部分实验结果如图 5 所示。在

北京同步辐射装置和国家同步辐射实验室同步辐射装置上都得到了同样的曝光结果。

X 射线强大的穿透能力使 X 射线光刻成为一种优异的深度光刻工具。图 6 表示的是研制的部分硬 X 射线波带片^[27]和金微柱阵列结构^[28]。其中硬 X 射线波带片的最外环宽度为 200 nm,高度为 2.8 μm ,高宽比达到 14:1。金微柱阵列结构的高度为 4 μm ,侧壁陡直光滑。

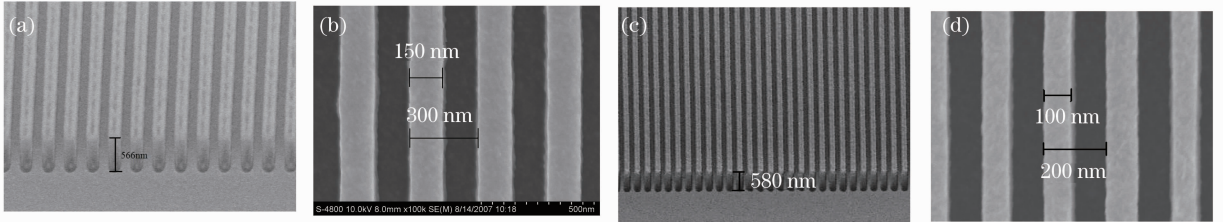


图 5 X 射线光刻实验结果。(a) 3333 line/mm 光栅胶结构;(b) 300 nm 周期金属光栅结构;(c) 5000 line/mm 光栅光刻胶结构;(d) 200 nm 周期金属光栅结构

Fig. 5 Experimental results of X-ray lithography. (a) Cross-sectional SEM image of 3333 line/mm resist structure; (b) SEM image of 150-nm-half-pitch metal grating structure; (c) SEM image of 5000 line/mm resist structure; (d) SEM image of 100-nm-half-pitch metal grating structure

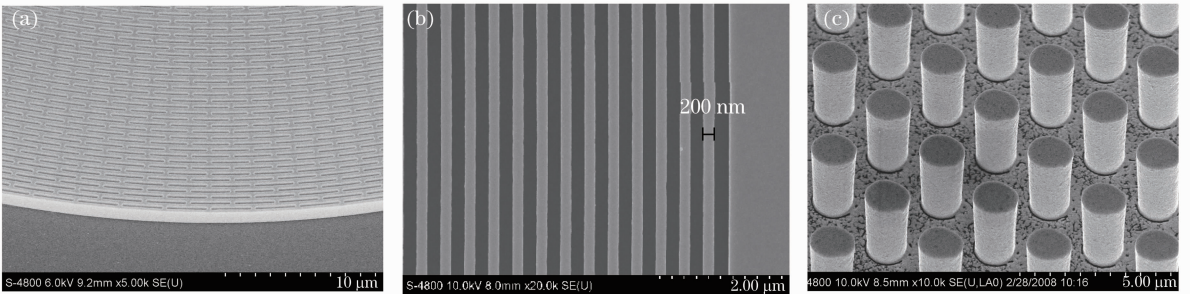


图 6 高高宽比结构。(a)硬 X 射线波带片截面;(b)硬 X 射线波带片最外环;(c)金属微米柱阵列

Fig. 6 Structures with high aspect ratio. (a) Cross-sectional SEM image of hard X-ray zone plate with 200 nm outermost zone; (b) top-down SEM image of hard X-ray zone plate with 200 nm outermost zone; (c) cross-sectional SEM image of metal micro-column array

3.4 基于接近式光学光刻的厚吸收体阻挡层形成及器件集成

部分 X 射线微纳光子学器件所应用的波段要求覆盖 0.2~10 keV,低能 X 射线波段为了提高效率和避免污染要求实现全镂空,高能 X 射线波段为了抑制噪声则要求将金属图形以外的区域制作更厚的金吸收体。为此采用低成本的接近式光学套刻和电镀的方法制备厚金加强筋结构,并结合高密度等离子体刻蚀的方法去除 X 射线微纳光子学器件图形之间的底衬,获得完全镂空的结构。一个典型的结果,3333 line/mm 的全镂空 X 射线金属透射光栅如图 7 所示。

4 微纳 X 射线光学器件的测试及应用

对微纳 X 射线光学器件进行衍射模式测试和衍射效率标定是验证其性能的必要步骤。本课题组的测试工作是在国家同步辐射实验室光谱辐射标准和计量实验站^[29~32]进行的。图 8 是研制的 3333 line/mm 全镂空 X 射线透射光栅对波长 5 nm X 射线的测试结果。各级衍射峰、甚至第 9 级次衍射峰都能清晰分辨,表明该光栅具有很好的色散特性。由测量结果拟合得到光栅占空比数值为 0.48,接近理想值 0.5。

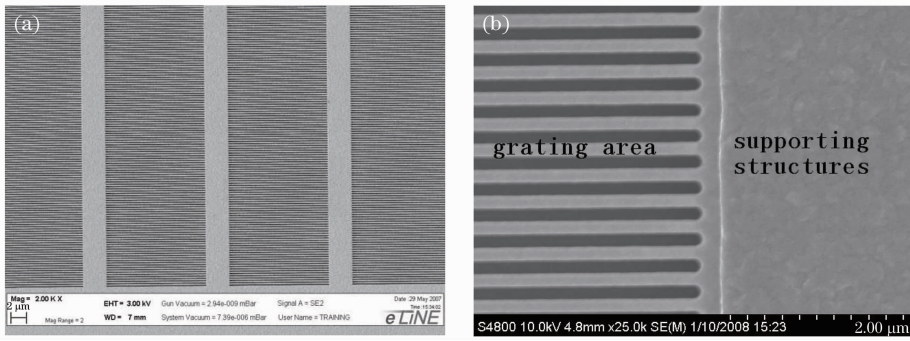


图 7 3333 line/mm 全镂空 X 射线金属透射光栅。(a)低倍率 SEM 照片;(b)镂空结构

Fig. 7 3333 line /mm free-standing X-ray metal transmission grating. (a) SEM photo with low magnification; (b) free-standing structures

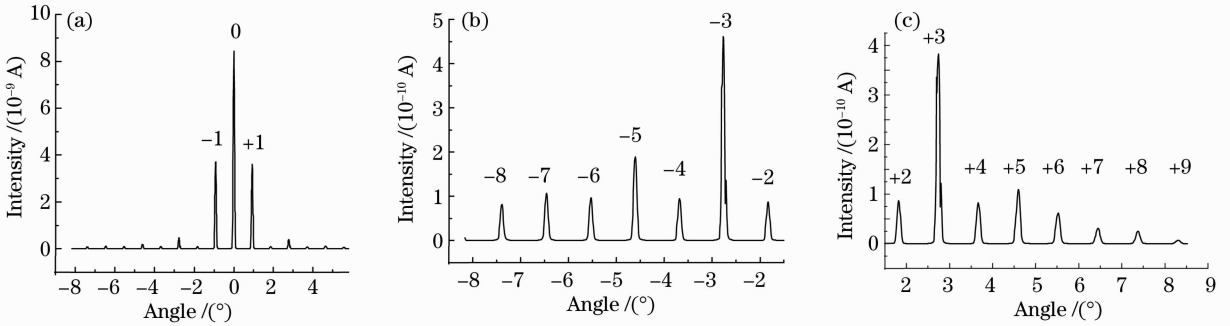


图 8 自支撑金属光栅 5 nm 波长处的测试结果。(a)全谱;(b)负高级次;(c)正高级次

Fig. 8 Transmission measurements of free-standing metal gratings at 5 nm wavelength. (a) Full spectrum; (b) high negative orders; (c) high positive orders

X 射线天文学是当代全电磁波段天文的重要组成部分。针对太阳观测光谱仪中的应用^[33], 在 30.4 nm 波长处进行了全镂空 X 射线透射光栅倾转衍射效率测试, 以期获得太空中对准出现偏差时的实验数据。测试结果如图 9 所示, 充分表明了透射光栅光谱仪的优势, 即使在入射光偏离 $\pm 6^\circ$ 的情况下, 衍射效率依然能够基本保持不变。这一点在航天探测应用中尤为重要, 在卫星姿态调整不够准确的情况下仍然可以保证载荷有效工作。

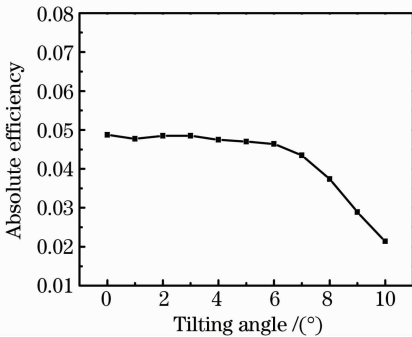


图 9 绝对效率随光栅倾斜角度变化情况

Fig. 9 Absolute diffraction efficiency versus tilting angle of free-standing metal gratings

同时在中国科学院空间科学与应用研究中心对全镂空 X 射线透射光栅进行了振动测试, 模拟火箭发射时振动的情况, 判断全镂空 X 射线透射光栅是否可以保持完整性。将待测的全镂空透射光栅固定在振动仪测试台上, 对光栅进行了 X, Y 和 Z 3 个方向的随机振动测试, 振动加速度为 6 g, 振动频率为 2000 Hz, 振动时间为每方向 4 min。之后在国家同步辐射实验室对振动后的光栅重新标定, 绝对衍射效率测试结果与之前测得的数据完全一致。实测结果表明, 该全镂空透射光栅可以承受航天器发射和运行环境。

5 结 论

微纳光学结构制备技术是实现微纳光子学器件应用的核心环节。针对在空间天文探测、激光惯性约束聚变激光等离子体诊断、同步辐射和先进光刻设备等领域的需求, 基于实验室现有的集成电路设备和工艺基础, 提出了基于电子束、X 射线和接近式光学混合光刻的微纳金属光学结构制备技术。充分利用电子束光刻高分辨任意图形发生能力、X 射线光刻陡直的高高宽比光刻能力和接近式光学光刻的

低成本等优点,研制成功 10 多种类型的 X 射线微纳光子学器件,器件总数量超过 600 块,其中大部分器件成功应用于国家重大工程。

致谢 作者感谢长期以来支持本文工作的合作者,他们包括:国家同步辐射实验室田扬超教授、刘刚副教授;北京同步辐射装置的伊福廷研究员;中国工程物理研究院激光聚变中心刘慎业研究员、江少恩研究员、曹磊峰研究员、况龙钰工程师;中国科学院空间科学与应用研究中心韦飞副研究员;上海光源的邵仁忠研究员;清华大学李群庆教授;南京理工大学高志山教授;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所金春水研究员;中国科学院光电技术研究所胡松研究员;北京工业大学陈涛研究员等。谨以本文献给中国微细加工技术的开拓者之一,已故的原中国科学院微电子研究所陈梦真研究员。

参 考 文 献

- Li Chunfei. Strategic thinking on development of micro- and nano-photonics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(10): 15~21
李淳飞. 对微纳光子学发展的一些战略思考[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(10): 15~21
- Zhou Changhe. Micro- and nano- optical structures and applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(10): 22~27
周常河. 微纳光学结构及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(10): 22~27
- A. W. Lohmann. A pre-history of computer generated holography[J]. *Optics & Photonics News*, 2008, **19**(2): 36~47
- Chen Baoqin. Development review and present situation for Chinese photomask fabrication and micro- and nano-fabrication technology[J]. *Microfabrication Technology*, 2006, (1): 1~2
陈宝钦. 中国制版光刻与微/纳米加工技术的发展历程回顾与现状[J]. 微细加工技术, 2006, (1): 1~2
- Chen Mengzhen. Synchrotron radiation X-ray lithography[J]. *Progress in Physics*, 1992, **12**(3): 359~374
陈梦真. 同步辐射 X 线光刻[J]. 物理学进展, 1992, **12**(3): 359~374
- Tian Feng, Yang Guoguang, Bai Jian *et al.*. Direct writing of submicron lines using the micro- and nanofiber pens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 206~209
田丰, 杨国光, 白剑等. 亚微米线条的微纳光纤笔直写技术研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 206~209
- Joel K. W. Yang, Bryan Cord, Huigao Duan *et al.*. Understanding of hydrogen silsesquioxane electron resist for sub-5-nm-half-pitch lithography[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2009, **27**(6): 2622~2627
- Weilun Chao, Jihoon Kim, Senajith Rekawa *et al.*. Demonstration of 12 nm resolution Fresnel zone plate lens based soft X-ray microscopy [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 17669~17677
- J. Reinspach, M. Lindblom, O. v. Hofsten *et al.*. Process development for improved soft X-ray zone plates [J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, **87**(5-8): 1583~1586
- K. Jefimovs, O. Bunk, F. Pfeiffer *et al.*. Fabrication of Fresnel zone plates for hard X-rays [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, **84**(5-8): 1467~1470
- Matteo Altissimo, Filippo Romanato, Lisa Vaccari *et al.*. X-ray lithography fabrication of a zone plate for X-ray in the range from 15 to 30 keV[J]. *Microelectronic Engineering*, 2002, **61-62**(1-3): 173~177
- Robert (Bob) Selzer, John Heaton. Using X-ray lithography to make sub 100 nm MMICs [J]. *Microelectronic Engineering*, 2000, **53**(1-4): 591~594
- Li Mujun, Shen Lianguan, Zhao Wei *et al.*. Analysis of effective wave-front affecting diffraction field in proximity lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 525~530
李木军, 沈连娟, 赵玮等. 接近式光刻衍射光场的有效波前作用规律分析[J]. 光学学报, 2010, **30**(2): 525~530
- Deqiang Wang, Leifeng Cao, Changqing Xie *et al.*. Micro zone plates with high aspect ratio fabricated by e-beam and X-ray lithography[J]. *J. Microlithography, Microfabrication, and Microsystem*, 2006, **5**(1): 013002
- Zhu Xiaoli, Ma Jie, Cao Leifeng *et al.*. Fabrication of high-density transmission gratings for X-ray diffraction [J]. *Journal of Semiconductors*, 2007, **28**(12): 2006~2009
朱效立, 马杰, 曹磊峰等. 高线密度 X 射线透射光栅的制作工艺[J]. 半导体学报, 2007, **28**(12): 2006~2009
- Zhu Xiaoli, Ma Jie, Xie Changqing *et al.*. Fabrication of 3333 lp/mm Soft X-ray transmission gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1026~1030
朱效立, 马杰, 谢常青等. 3333 lp/mm X 射线透射光栅的研制[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1026~1030
- Ma Jie, Xie Changqing, Ye Tianchun *et al.*. Design, fabrication and test of X-ray freestanding transmission gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2564~2567
马杰, 谢常青, 叶甜春等. 自支撑透射光栅的设计、制作和测试[J]. 物理学报, 2010, **59**(4): 2564~2567
- Jin Feifei, Zhu Xiaoli, Li Hailiang *et al.*. Study on properties of 2000 lp/mm X-ray transmission varied line-space gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1857~1860
靳飞飞, 朱效立, 李海亮等. 2000 lp/mm X 射线透射变栅距光栅的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1857~1860
- Li Hailiang, Wu Jian, Zhu Xiaoli *et al.*. Fabrication and study of 2000 l/mm X-ray self-standing transmission gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2650~2655
李海亮, 吴坚, 朱效立等. 2000 l/mm X 射线镂空透射光栅的制备研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2650~2655
- Changqing Xie, Xiaoli Zhu, Jia Jia. Focusing properties of hard X-ray photon sieves: three-parameter apodization window and waveguide effect[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 3038~3040
- Changqing Xie, Xiaoli Zhu, Lina Shi *et al.*. Spiral photon sieves apodized by digital prolate spheroidal window for the generation of hard-X-ray vortex[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(11): 1765~1767
- Liu Longhua, Liu Gang, Xiong Ying *et al.*. Fabrication of high-aspect-ratio and high-density X-ray transmission grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(1): 72~77
柳龙华, 刘刚, 熊瑛等. 大高宽比、高线密度 X 射线透射光栅的制作[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(1): 72~77
- Zhou Hongjun, Zhong Pengfei, Huo Tonglin *et al.*. Cleaning of carbon contamination on Si wafer with activated oxygen by synchrotron radiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 907~910
周洪军, 钟鹏飞, 霍同林等. 同步辐射活化氧清洗碳污染的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 907~910
- Chuanke Wang, Longyu Kuang, Zhebin Wang *et al.*. Phase-type quantum-dot-array diffraction grating [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, **79**(12): 123502
- Dong Jianjun, Cao Leifeng, Chen Ming *et al.*. Study on the focus performance of micro-focus Fresnel zone plate [J]. *Acta Physica*

- Sinica*, 2008, **57**(5): 3044~3047
董建军, 曹磊峰, 陈 铭等. 微聚焦非涅耳波带板聚焦特性研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(5): 3044~3047
- 26 Longyu Kuang, Chuanke Wang, Zhebin Wang *et al.*. Quantum-dot-array diffraction grating with single order diffraction property for soft X-ray region [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, **81**(7): 073508
- 27 Ma Jie, Cao Leifeng, Xie Changqing *et al.*. Fabrication of high aspect-ratio-hard X-ray zone plates with supporting structures [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(10): 30~34
马 杰, 曹磊峰, 谢常青等. 带支撑结构的大高宽比硬 X 射线波带片制作[J]. *光电工程*, 2009, **36**(10): 30~34
- 28 Wang Yanbin, Tang Yongjian, Zhu Xiaoli *et al.*. Fabrication of micro-column array filled with CH for ICF target [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2011, **45**(4): 452~455
王衍斌, 唐永建, 朱效立等. 微立柱阵列 ICF 埋点靶的制备[J]. *原子能科学与技术*, 2011, **45**(4): 452~455
- 29 Qiu Keqiang, Xu Xiangdong, Liu Ying *et al.*. Design and fabrication of gold transmission phase gratings for soft X-ray [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6329~6334
邱克强, 徐向东, 刘 颖等. 软 X 射线位相型金透射光栅的设计与制作[J]. *物理学报*, 2008, **57**(10): 6329~6334
- 30 Bin Sheng, Xiangdong Xu, Ying Liu *et al.*. Vacuum-ultraviolet blazed silicon grating anisotropically etched by native-oxide mask [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1147~1149
- 31 Shengnan He, Ying Liu, Jingtao Zhu *et al.*. SiC/W/Ir multilayer-coated grating for enhanced efficiency in 50~100 nm wavelength range in Seya-Namioka mount [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(2): 163~165
- 32 Zhu Weizhong, Wu Yanqing, Guo Zhi *et al.*. The design, fabrication and performance of a large area 10000 line/mm metal transmission diffraction gratings for soft X-ray [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6386~6392
朱伟忠, 吴衍青, 郭 智等. 大面积 10000 line/mm 软 X 射线金属型透射光栅的设计、制作与检测[J]. *物理学报*, 2008, **57**(10): 6386~6392
- 33 Bai Liang, Zhu Jingtao, Xu Jing *et al.*. Multilayer film reflective mirror at 30.4 nm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2615~2618
白 亮, 朱京涛, 徐 敬等. 30.4 nm 波长处 Mg 基多层膜反射镜[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2615~2618