

文章编号 1004-924X(2012)09-1904-09

闪耀全息光栅离子束刻蚀工艺模拟及实验验证

吴娜^{1,2}, 谭鑫^{1*}, 巴音贺希格¹, 唐玉国¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:依据特征曲线法推导了非晶体表面的离子束刻蚀模拟方程,结合全息光栅的刻蚀特点开发出离子束刻蚀模拟程序,并通过实验数据分析并优化了非晶体材料刻蚀速率与离子束入射角的关系方程,最后利用离子束刻蚀实验对所开发的离子束刻蚀模拟程序进行了实验验证。调节掩模与基底材料的刻蚀速率比为2:1至1:2,制作了线密度为1 200 l/mm,闪耀角为 $\sim 8.6^\circ$,非闪耀角为 $34^\circ\sim 98^\circ$ 的4种闪耀光栅,与刻蚀模拟程序的结果进行对比,模拟误差 $< 5\%$;控制离子束刻蚀时间为6~14 min,制作了线密度为1 200 l/mm,闪耀角为 $\sim 8.6^\circ$,顶角平台横向尺寸为0~211 nm的6种光栅,与刻蚀模拟程序的模拟结果进行对比,模拟误差 $< 1\%$ 。比较实验及离子束刻蚀模拟结果表明,离子束刻蚀模拟程序获得的模拟刻蚀轮廓曲线与实际刻蚀轮廓曲线的误差 $< 5\%$;模拟刻蚀截止点与实际刻蚀截止点误差 $< 1\%$ 。实验表明,提出的模拟方程可以准确地描述不同工艺过程和工艺参数对最终刻蚀结果的影响,进而可预知和控制离子束刻蚀过程。

关键词:闪耀光栅;全息光栅;衍射效率;刻蚀模拟;离子束刻蚀

中图分类号:0436.1;TN305.7 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20122009.1904

Simulation and experiments of ion beam etching process for blazed holographic grating

WU Na^{1,2}, TAN Xin^{1*}, Bayanheshig¹, TANG Yu-guo¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: xintan_grating@gmail.com

Abstract: A simulation equation of surface etching for amorphous materials during ion beam etching was worked out based on the characteristic curve method, and a simulation program named BLAZING for the ion etching process was established according to the holographic grating. Then, the relation between the etching rate of amorphous materials and ion beam incidence was analyzed and optimized. Finally, an experiment was carried out to verify the simulation program with the ion beam etching. By

收稿日期:2012-04-23;修订日期:2012-08-15.

基金项目:“863”重大项目(No. 2010AA1221091001);国家重大科研装备研制项目(No. ZBYZ2008-1);中国科学院重大科研装备研制项目(No. YZ201005);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20070523、No. 20086013);国家创新方法工作专项资助项目(No. 2008IM040700)

adjusting the etching rate ratio from 2 : 1 to 1 : 2 for a mask and substrate materials, four 1 200 l/mm blazed gratings with the right angle between 34° and 98° and the blazed angle about 8.6° were fabricated, and the simulation error between the experimental data and the simulation data is less than 5%. By controlling the etching time from 6 min to 14 min, six 1 200 l/mm blazed gratings with the ridge between 0 nm and 211 nm and the same blazed angle of 8.6° were fabricated, and the error mentioned above is less than 1%. The contrast results illustrate that the error of contour line between simulation and experimentation is less than 5%, and the error of etching ending time between simulation and experimentation is less than 1%. It concludes that the simulation program BLAZING can simulate the effect of different etching processes and different parameters on the etching results, and can predict and control the ion beam etching process.

Key words: blazed grating; holographic grating; diffraction efficiency, etching simulation; ion beam etching

1 引言

离子束刻蚀技术是一种典型的干法体刻蚀技术,很早就已经引入到微纳米器件的加工中,在传统的 IC 工艺及 MEMS 工艺中也有广泛的应用,同时它也是离子束刻蚀全息光栅制作的关键工艺步骤,直接影响最终获得光栅的性能参数。

离子束刻蚀的过程十分复杂,涉及各种物理、化学反应,工艺条件的控制也相应复杂。在以往的工艺设计和改进中,主要依靠大量的工艺实验来确定合适的工艺条件,既浪费时间和资金,又不能有效地进行预测。如果开发出适合的工艺模拟软件^[1-4],对于工艺设计和改进者来说,相当于有了一个虚拟实验室,最优工艺条件的查找、失效分析等都可通过软件进行,从而节省大量的时间和人力物力。

离子束刻蚀全息光栅^[5-6]作为离子束刻蚀技术的典型应用,已在光谱分析仪器行业起到了举足轻重的作用。目前对矩形光栅^[7-9]、三角槽形光栅^[10,14-15]的离子束刻蚀工艺的模拟研究正在开展。

针对上述情况,干法刻蚀模拟工具的研究也发展起来,从 20 世纪 80 年代初著名的 SAMPLE 到近年开发的 DEER 等软件均是针对干法刻蚀的模拟研究。不过这些软件都是以服务于传统的 IC 工艺为目的的商用软件^[11-13],其复杂的参数设置及高昂的价格,对光栅的离子束刻蚀模拟研究并不适用。

本文依据特征曲线法建立了离子束刻蚀非晶体材料模型,针对光栅离子束刻蚀工艺特点开发了模拟软件——BLAZING;并通过 BLAZING 模拟结果及实际刻蚀结果的对比研究对 BLAZING 进行了评价。

2 离子束刻蚀模拟理论模型

2.1 模型方程的建立

设固体表面绕 y 轴旋转对称或者沿 z 轴平移对称,则只需对 xoy 平面内的曲线 S 进行讨论。如图 1 所示,设能量密度为 J 的均匀离子束流以 y 轴方向入射,各向同性的靶源材料的密度为 ρ ,对非晶材料溅射率只是离子束入射角度 θ 的函数, $Y(\theta)$ 。

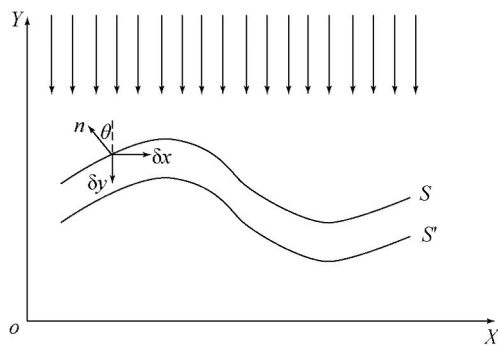


图 1 离子束刻蚀二维表面形貌示意图

Fig. 1 Contour map of a 2-D surface by ion etching

则在靶源表面上法线方向与 y 轴方向成 θ 角的

某点 A 在 y 轴负方向上的刻蚀速率为:

$$\left. \frac{\partial y}{\partial t} \right|_x = -\frac{J}{\rho} Y(\theta), \quad (1)$$

对 x 微分得:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} = -\frac{J}{\rho} Y'(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x}, \quad (2)$$

而存在 $\left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_t = \tan \theta$, 并对 t 进行微分带入式(2)得:

$$\frac{1}{\cos^2 \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{J}{\rho} Y'(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

如图 1 可知: $\left. \frac{\partial x}{\partial t} \right|_y = -\cot \theta \left. \frac{\partial y}{\partial t} \right|_x$
 $= \cot \theta \frac{J}{\rho} Y(\theta).$

对 y 微分得:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial y \partial t} = \frac{J}{\rho} \left[Y'(\theta) \cot \theta - \frac{Y(\theta)}{\sin^2(\theta)} \right] \frac{\partial \theta}{\partial y}, \quad (4)$$

而存在 $\left. \frac{\partial x}{\partial y} \right|_t = \cot \theta$, 对 t 微分并带入式(4)得:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{J}{\rho} [Y'(\theta) \sin \theta \cos \theta - Y(\theta)] \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

方程(3)、(5)为一阶偏微分方程, 可用特征曲线法求解。

一般形式的偏微分方程为:

$$v = \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{J}{\rho} \{ [Y'(\theta) \cos^2 \theta \sin \theta]^2 + [Y'(\theta) \cos \theta \sin \theta - Y(\theta)]^2 \}^{\frac{1}{2}} =$$

$$\frac{J}{\rho} \left\{ \left[\frac{d}{d\theta} Y(\theta) \cos \theta \right]^2 + [Y(\theta) \cos \theta]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

过该点的特征曲线与 y 轴的夹角为:

$$\tan \alpha = \frac{\frac{dx}{dt}}{\frac{dy}{dt}} = \frac{Y'(\theta) \cos^2 \theta}{Y'(\theta) \cos \theta \sin \theta - Y(\theta)}. \quad (11)$$

$$\theta_i = \arctan \frac{x_i}{y_i}. \quad (12)$$

在给定的固体表面在 xoy 平面内对应曲线上取 n 个点, 求出各点的法线方向和 y 轴夹角 θ , 如式(12)所示, 由式(10)、(11)分别求出特征曲线的方向和刻蚀速率 v。

2.2 计算机模拟程序

全息光栅的离子束刻蚀是以光刻胶为掩模, K9 玻璃为基底的物理溅射过程。而光刻胶及 K9 玻璃基底均为各向同性的靶源材料, 所以其刻蚀过程可以利用上面的方程进行模拟。在建立模拟模型时, 光刻胶与 K9 玻璃之间存在刻蚀分界面, 在

$$P(\theta, x, t) \frac{\partial \theta}{\partial x} + Q(\theta, x, t) \frac{\partial \theta}{\partial t} = R(\theta, x, t). \quad (6)$$

其特征曲线是由 $\frac{dx}{dt} = \frac{P}{Q}$ 定义的在 x-t 平面内

的曲线, 因为沿着该曲线, 式(6)可化为

$$\frac{dx \partial \theta}{dt \partial t} = \frac{R}{Q}, \text{ 即 } \frac{\partial \theta}{\partial x} dx + \frac{\partial \theta}{\partial t} dt = \frac{R}{Q} dt$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{R}{Q}. \quad (7)$$

将式(3)、(5)、(6)比较可知特征曲线为:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{J}{\rho} Y'(\theta) \cos^2 \theta. \quad (8)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{J}{\rho} [Y'(\theta)] \sin \theta \cos \theta - Y(\theta). \quad (9)$$

由式(7)可知沿特征曲线 $\frac{d\theta}{dt} = 0$ 即保持表面法线方向和离子束入射方向夹角 θ 不变。对时空均匀的离子束, 其特征曲线为直线, 且表面上任一点沿过该点的特征曲线的后退速率为常量。

由式(8)、(9)可知, 随着离子束刻蚀的进行, 表面法线方向与离子束入射方向(y 轴)夹角为 θ 的点沿特征曲线的后退速率为:

界面两侧的两种不同材料刻蚀性质不同。

以离子束刻蚀闪耀光栅为例进行离子束刻蚀建模。光刻胶掩模轮廓的曲线方程为:

$$y = \begin{cases} 0 & kp \leq x < kp + \frac{1}{2} p \\ -\sin x & kp + \frac{1}{2} p \leq x \leq kp + p \end{cases}, \quad (13)$$

其中: p 为光栅周期。由方程(12)、(13)可以推导出 θ_i 。对于非晶体材料, 其溅射率与离子束入射角的关系^[1-2]:

$$Y(\theta) = 18.73845 \cos \theta - 64.65996 \cos^2 \theta +$$

$$145.19902 \cos^3 \theta - 206.04493 \cos^4 \theta +$$

$$147.31778 \cos^5 \theta - 39.89993 \cos^6 \theta. \quad (14)$$

通过 Matlab 编程模拟获得如图 2 所示的结果。图 2 显示了 2 个周期正弦型光刻胶掩模离子

束刻蚀进程中表面形貌变化及特征曲线。同时也显示了基底材料的表面形貌变化及特征曲线;水平方向的虚线为光刻胶及基底材料的分界面,在未刻

蚀前为基底材料的表面轮廓;加粗黑实线表示的是刻蚀截止点时的基底表面轮廓,即最终获得的闪耀光栅表面轮廓线。

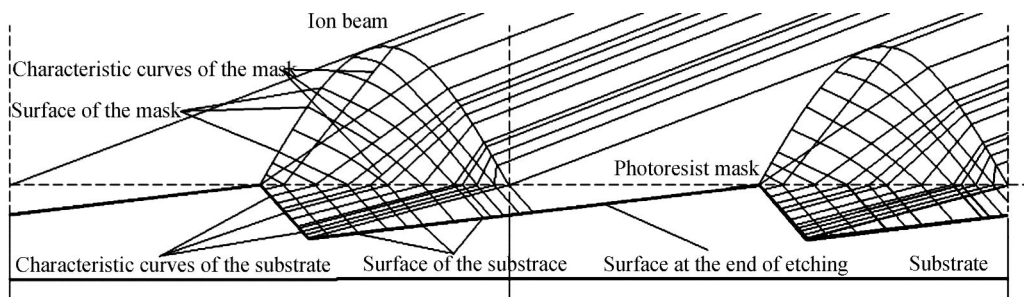


图 2 离子束刻蚀闪耀光栅正弦型掩模轮廓表面形貌变化的计算机模拟结果

Fig. 2 Simulation map of the contour change of a sinusoidal grating mask by ion etching

在开发的 BLAZING 中,对影响刻蚀最终结果的刻蚀参数进行了优化处理。并根据实际刻蚀过程对 BLAZING 进行完善,力求其能够对刻蚀过程进行指导。

给定闪耀波长及周期的闪耀光栅重要性能指标之一是衍射效率,而离子束刻蚀过程中对闪耀角、非闪耀角及槽顶角平台的控制都直接影响其衍射效率。这些因素在开发 BLAZING 时都予以

考虑,其中闪耀角由于离子源系统、光刻胶掩模参数及离子束入射角度的确定而不随其它参数的变化而变化;槽顶角平台则由于刻蚀停止时间非刻蚀截止点而产生;非闪耀角则随光刻胶掩模与基底材料刻蚀速率比的变化而变化。图 3 给出了光刻胶掩模与基底材料不同刻蚀速率比的刻蚀截止点轮廓曲线,4 幅图中括号内为光刻胶掩模与基底材料的刻蚀速率比。

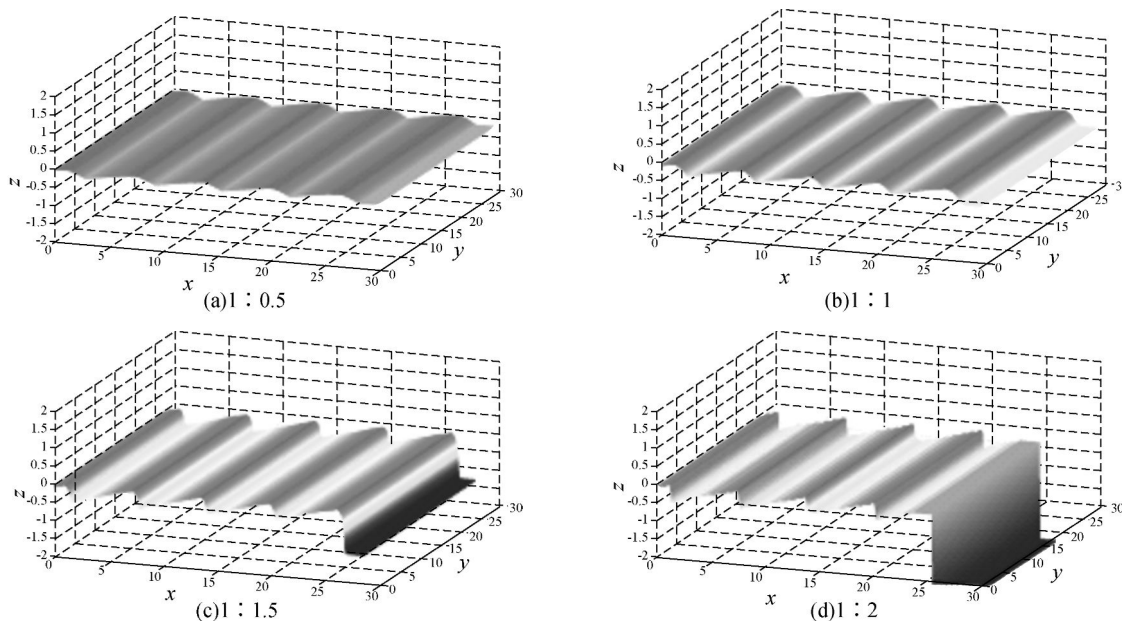


图 3 光刻胶掩模与基底材料不同刻蚀速率比的轮廓曲线

Fig. 3 Simulated ion etched grating groove of a blazed grating as functions of the etching rate of photoresist mark and substrate

从图 2 和图 3 的模拟结果体现出 2 个影响刻蚀最终结果的重要参数,刻蚀截止点及光刻胶掩模与基底刻蚀速率比。由图 2 可知,当未到刻蚀截止点而停止离子束刻蚀时,获得的闪耀光栅非闪耀面将是加粗黑实线右边的细实线轮廓面,而此时光刻胶仍有残余;去胶后闪耀光栅出现平台,这将极大的影响衍射效率。由图 3 可知,光刻胶掩模与基底材料不同刻蚀速率比时获得的闪耀光栅的非闪耀角不同,这也将严重影响衍射效率。

在离子束刻蚀模拟程序中,闪耀光栅顶角平台及非闪耀角的形成过程准确与否是衡量刻蚀模拟程序好坏的重要标准^[5-7]。下一节将通过具体的实验结果来对 BLAZING 进行评价。

3 实验结果及讨论

3.1 离子束刻蚀截止时间

以刻蚀闪耀角 8.6° 的闪耀光栅为例进行离子束刻蚀模拟计算,得到不同刻蚀时间的刻蚀结果如图 4 所示。

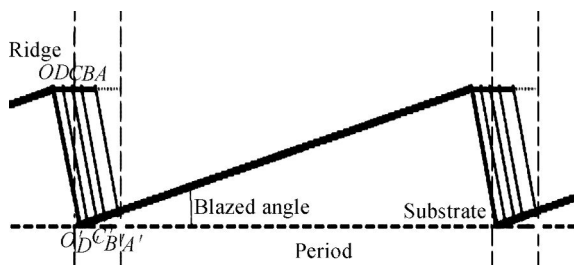


图 4 K9 玻璃基底不同刻蚀时间的离子束刻蚀模拟轮廓

Fig. 4 Simulation skeleton map for K9 substrate at different etching time

图 4 中 OO' 面, DD' 面, CC' 面, BB' 面, AA' 面为不同的离子束刻蚀时间获得非闪耀面,而 OD , OC , OB , OA 则为不同离子束刻蚀时间获得的闪耀光栅顶角平台横向尺寸(Ridge)。观图可知, Ridge 为 0 时闪耀面与非闪耀面相交于一点,不存在平台(对应图 4 中加粗黑实线所示轮廓),此时所对应的离子束刻蚀时间为截止时间,获得闪耀光栅衍射效率最高。

利用 BLAZING 获得 DD' 面, CC' 面, BB' 面, AA' 面所设定的刻蚀时间对光刻胶掩模进行离子束刻蚀,得到如图 5 所示结果。而按照 OO' 面所设定的刻

蚀时间对掩模进行刻蚀得到如图 6 所示结果。

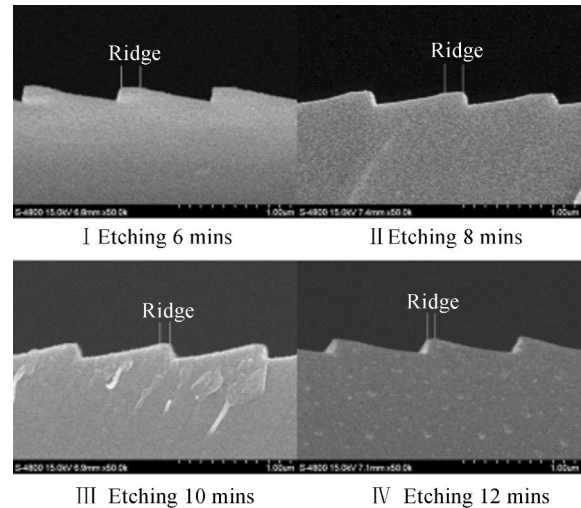


图 5 不同离子束刻蚀时间获得的闪耀光栅的扫描电镜照片

Fig. 5 SEM photographs of the blazed ion etched grating at different etching time

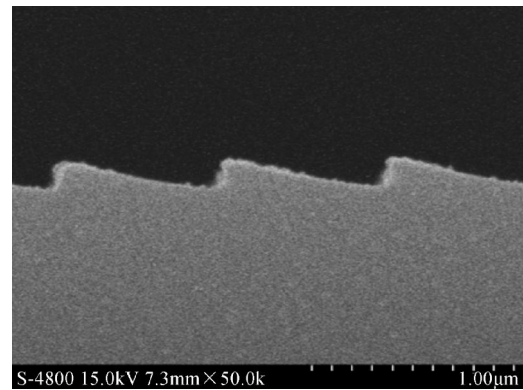


图 6 在刻蚀截止点获得的闪耀光栅扫描电镜照片

Fig. 6 SEM photograph of the deadline etching blazed grating

从表 1 的结果中可以看出样品 I, II, IV 的 Ridge 模拟值与测量值接近,而 III 号样品的 Ridge 模拟值与测量值则差异较大。经过分析可知, III 号样品差异较大是由于掩模占宽比与 BLAZING 设定的占宽比差异较大引起的。通过上面的对比可以看出, BLAZING 在不同刻蚀时间获得的模拟结果与实际刻蚀结果基本一致,且能够给出准确的刻蚀截止时间。

表 1 不同刻蚀时间获得闪耀光栅的 Ridge 模拟值及测量值

Tab. 1 Simulation ridge and measuring data of blazed grating at different etching time

基底编号	刻蚀时间 /min	Ridge 模拟值 /nm	Ridge 测量值 /nm
I	6	219	211
II	8	147	154
III	10	126	97
IV	12	66	63
V	14	7	~0

将图 6 所示的扫描电镜测得的光栅槽形通过轮廓灰度轮廓扫描得到其槽形轮廓曲线,并与该工艺条件下 BLAZING 模拟得到的结果进行对比获得图 7(共 23 组刻蚀结果与模拟结果对比,图 7 为任意选取的一组结果)。

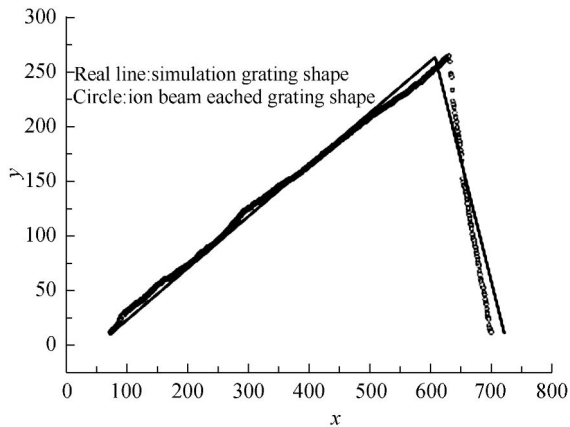


图 7 BLAZING 模拟槽形结果与实验槽形结果对比

Fig. 7 Comparison of BLAZING simulation grating and ion beam etched grating shapes

图 7 中的 x 与 y 轴为灰度扫描时设定轴,为无量纲轴。从图 7 可以看出,模拟槽形的闪耀角与实际刻蚀获得的闪耀角拟合较好,但是非闪耀角差异较大。同时,从刻蚀截止时间看,实际刻蚀结果能够获得尖锐的顶角,说明刻蚀截止时间模拟较准确。

对表 1 所列数据及 23 组如图 7 所示的对比结果进行处理可知,刻蚀时间误差小于 1%。而对于闪耀光栅刻蚀过程,刻蚀时间 1% 的误差可以忽略不计,因此 BLAZING 完全能够满足指导离子束刻蚀对于刻蚀截止点精确控制的需要。

3.2 刻蚀速率比^[14-15]

3.1 中讨论了模拟槽形的非闪耀角与实际刻

蚀结果非闪耀角存在差异,其主要原因为刻蚀速率的设定值不够准确,即式(14)中各展开式系数与实际值存在差异。光刻胶与光栅基底材料(K9,熔石英)均为非晶体材料,其刻蚀速率与离子束入射角关系及刻蚀速率比对于闪耀光栅的槽形形成具有关键意义。因此这里进行了不同刻蚀速率比情况下的刻蚀实验。

按图 3 给定的 4 种刻蚀速率比对光刻胶掩模进行离子束刻蚀,得到如图 8 所示的不同刻蚀速率比情况下的刻蚀结果。

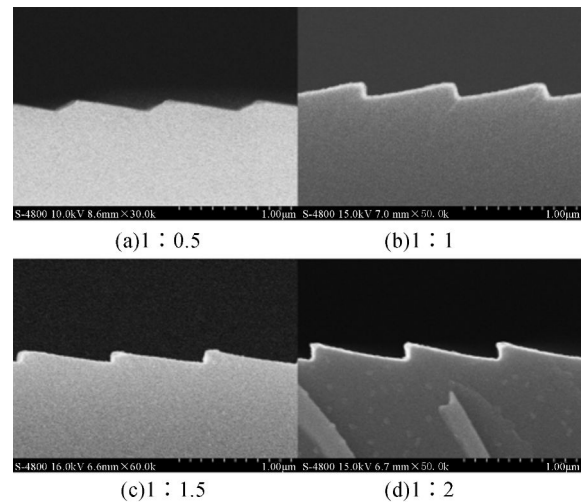


图 8 光刻胶与基底刻蚀速率选择比不同时获得闪耀光栅的 SEM 照片

Fig. 8 SEM photographs of the blazed ion etched grating grooves for photoresist mark and substrate with different etching rates

利用灰度扫描对图 8 所示的刻蚀结果与 BLAZING 的模拟结果进行对比,得图 9。对图 9 进行分析得到表 2。

表 2 不同刻蚀速率比时获得的闪耀光栅的非闪耀角模拟值及测量值

Tab. 2 Right angles of simulation and measuring as functions of the etching rates of photoresist mark and substrate

基底编号	刻蚀速率比 (光刻胶/基底)	非闪耀角 模拟值	非闪耀角 测量值
I	1 : 0.5	31°	34°
II	1 : 1	62°	67°
III	1 : 1.5	76°	79°
IV	1 : 2	89°	98°

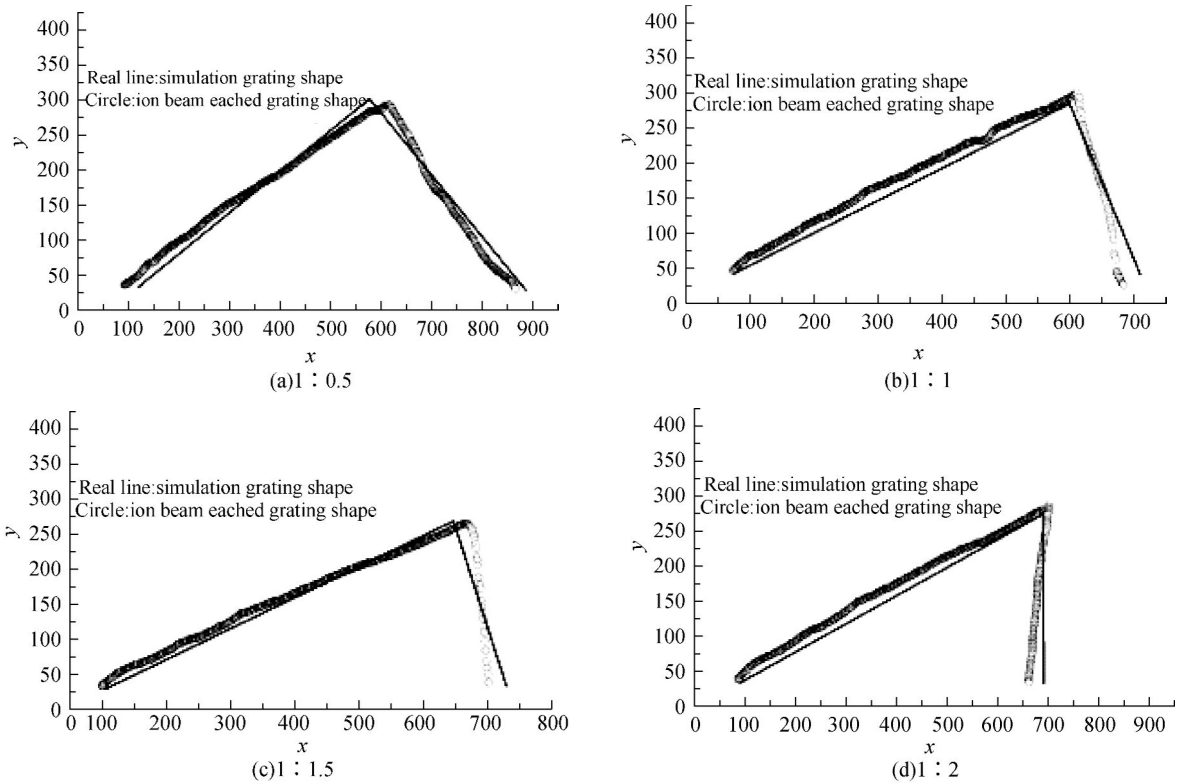


图 9 光刻胶与基底刻蚀速率选择比不同时 BLAZING 模拟槽形结果与实验槽形结果对比

Fig. 9 BLAZING simulation grating and ion beam etched grating shapes as functions of the etching rates of photoresist mark and substrate

由图 9 和表 2 可知,非闪耀的模拟值与实测值存在一定差异,但趋势相同,误差达到 10%左右。为获得更为准确的非闪耀角模拟结果,又进行大量的实验工作,将上述式(14)修正为:

$$Y(\theta) = 16.8\cos\theta - 68.6\cos^2\theta + 143.2\cos^3\theta - 206\cos^4\theta + 147.3\cos^5\theta - 39.9\cos^6\theta \quad (15)$$

式(15)与式(14)对比可知,方程的一次方系

数与二次方系数已通过实验进行修正,而更高次方系数对于结果的影响较小。利用修正后的式(15)重新编写 BLAZING 程序,并进行离子束刻蚀实验。获得的模拟结果与实验结果对比如图 10 所示,其原子力显微镜测试结果如图 11 所示。

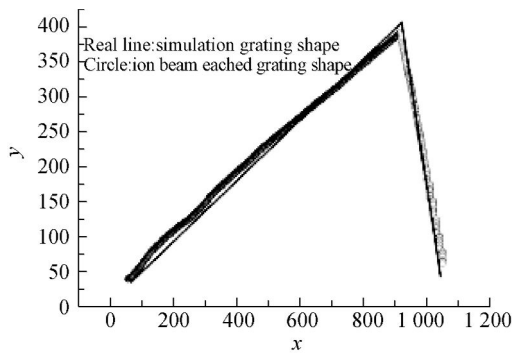


图 10 修正后 BLAZING 模拟槽形结果与实验槽形结果对比

Fig. 10 Comparison of BLAZING simulation grating and ion beam etched grating shapes

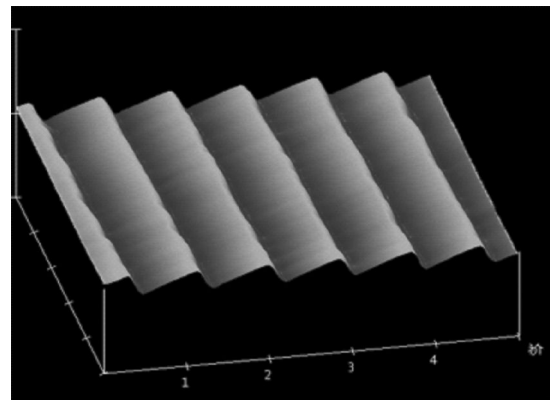


图 11 1 200 lp/mm, 250 nm 闪耀光栅 AFM 照片

Fig. 11 AFM photograph of a 1 200 lp/mm blazed grating with wavelength of 250 nm

由图 10 可以看出,修正后 BLAZING 的模拟结果与实际刻蚀结果拟合较好,非闪耀角模拟误差小于 5%,BLAZING 获得的模拟结果精度较高。

4 结 论

本文利用特征曲线法对固体材料表面的离子束刻蚀过程进行了研究,推导了表面轮廓变化方程及特征曲线方程,通过实验方法修正了离子束入射角与非晶体材料溅射率方程,并开发了离子

束刻蚀模拟程序—BLAZING。该程序能够快速、准确地计算出离子束刻蚀过程中的掩模表面轮廓变化及刻蚀截止点。以刻蚀闪耀光栅为例对 BLAZING 进行评价,实际刻蚀结果与模拟结果一致。对比结果表明,BLAZING 计算的模拟刻蚀轮廓曲线与实际刻蚀轮廓曲线误差小于 5%;模拟刻蚀截止点与实际刻蚀截止点误差小于 1%。这样可以准确地描述不同工艺过程、工艺参数对最终刻蚀结果的影响,进而实现离子束刻蚀过程的可预知性和可控性。

参考文献:

- [1] WEHNER G. Influence of the angle of incidence on sputtering yields [J]. *J. Appl. Phys.*, 1959, 30 (10):1762-1765.
- [2] DUCOMMUN J P, CANTAGREL M. Evolution of well-defined surface contour submitted to ion bombardment[J]. *J. Mater. Sci.*, 1975,10(7):52-62.
- [3] JOHNSON L F. Evolution of grating profiles under ion-beam erosion[J]. *Appl. Opt.*, 1979, 18 (15): 2259-2574.
- [4] AOYAGI Y, NAMBA S. Blazed ion-etched holographic gratings [J]. *Opt. Acta.*, 1976, 23 (9): 701-707.
- [5] 庄夔,刘桂琴,李永贵.全息光栅[J]. *光学精密工程*, 1981, 12(5): 226-230.
ZHUANG X, LIU G Q, LI Y G, Holographic Gratings[J], *Opt. Precision Eng.*, 1981, 12 (5): 226-230. (in Chinese)
- [6] HUTLEY M C. *Diffraction Gratings* [M]. Academic, New York, 1982.
- [7] TAN X, LIU Y, LIU ZH K. Performance of a soft X-ray splitter grating parallelism measuring system by diffraction method[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2009, 24(15): 61-65.
- [8] LIU Y, TAN X, LIU ZH K. Soft X-ray holographic grating beam splitter including a double frequency grating for interferometer pre-alignment[J]. *Optics Express*, 2008, 18(16):14761-14770.
- [9] 谭鑫,刘颖,徐向东,等. 13.9 nm Lamina 分束光栅的研制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1):33-37.
TAN X, LIU Y, XU X D, *et al.*, 13.9 nm Lamina grating as beam splitter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):33-37. (in Chinese)
- [10] LIN H, LI L F. Fabrication of extreme-ultraviolet blazed gratings by use of direct argon - oxygen ion-beam etching through a rectangular photoresist mask[J]. *Appl. Opt.*, 2008, 33 (47): 6212-6218.
- [11] OLDHAM W G, NEUREUTHER A R, SUNG C, *et al.*. A general simulator for VLSI lithography and etching process: Part ii- Application to deposition and etching[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1980,45(27): 1455-1465.
- [12] MCVITTIE J P J, REY C, CHENG L Y, *et al.*. LPCVD profile simulation using a Re-emission model[J]. *IEDM 90*, 1990, 245(19): 917-920.
- [13] ZHOU R C, ZHANG H X, HAO Y Y, *et al.*. Simulation of profile evolution in etching-polymerization alternation in DRIE of silicon with SF₆/C₄F₈[J]. *MEMS 03*, 2003, 27(16): 161-164.
- [14] 谭鑫,李文昊,巴音贺希格,等.紫外全息闪耀光栅的制作[J], *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1536-1544.
TAN X, LI W H, Bayanheshig, *et al.*. Fabrication of the ultraviolet holographic blazed grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1536-1544. (in Chinese)
- [15] TAN X. Fabrication of high-efficiency ultraviolet blazed gratings by use of direct Ar₂-CHF₃ ion-beam etching through a rectangular photoresist mask[J]. *SPIE*, 2011, 8191: 1117-1129.

作者简介:



吴 娜(1983—),女,吉林长春人,博士研究生,2007年长春理工大学获学士学位,主要从事衍射光学元件精密加工研究。E-mail: chinagrating_wuna@gmail.com



巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,理学博士,研究员,博士生导师,2002年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术研究。E-mail: bayin888@sina.com



谭 鑫(1981—),男,吉林长春人,工学博士,副研究员,硕士生导师,2003年于中国科学技术大学获学士学位,2008年于中国科学技术大学获博士学位,主要从事光栅设计制作技术及光学器件微细加工技术研究。E-mail: xintan.grating@gmail.com



唐玉国(1968—),男,吉林长春人,理学博士,研究员,博士生导师,所长助理,1989年于吉林工业大学获学士学位,1995年于中国科技大学获理学博士学位,1995年~1997年为中科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博士后,主要从事光栅制作技术及光谱技术研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

● 下期预告

使用优化的固着磨料磨盘全口径加工碳化硅反射镜的实验研究

王 旭

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所)

中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033)

在早期的实验中测试了圆形丸片的去除函数,文中引入了填充因子的概念来评价实验所获得的去除函数。为了提高填充因子和磨盘的加工特性,根据圆形丸片的实验结果优化了磨头的结构。在 Matlab 中模拟新型磨头的去除函数。同时,也开展了在全口径范围考察磨头工作稳定性的实验。在同样的条件下也完成了固着磨料和散粒磨料的加工实验。最后为了评价理论模拟和实验结果的相似程度,文中引入了结构相似指数。对新型磨头而言,结构相似指数达到了0.425 7。最终的结果证明了优化后的固着磨料磨头在大口径碳化硅反射镜加工方面有着很广阔的前景。