

13.4 nm 软 X 射线干涉光刻透射光栅的优化设计

朱伟忠^{1,2} 吴衍青¹ 陈 敏¹ 王纳秀¹ 邰仁忠¹ 徐洪杰¹

(¹ 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 基于严格的矢量耦合波方法, 结合纳米级光栅实际制作工艺, 定量分析了在 13.4 nm 软 X 射线(TE 偏振)正入射条件下, 光栅材料、厚度、占空比、梯形浮雕底角大小等因素对光栅一级衍射效率的影响。结果表明, 在此波段处, Si_3N_4 、Cr、Au 浮雕的相位作用对光栅衍射起重要影响, 其中非金属材料 Si_3N_4 比金属材料 Cr、Au 的相位作用更明显。最后优化得到了用 Si(或 Si_3N_4) 做衬底的 Si_3N_4 、Cr、Au 光栅, 分析结果显示, 其一级衍射效率优于目前用于 13.4 nm 软 X 射线干涉光刻的 Cr、 Si_3N_4 复合光栅。

关键词 干涉光刻; 软 X 射线透射光栅; 严格耦合波方法; 复折射率; 衍射效率

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1225

Optimized Design of Transmission Grating Used for 13.4 nm Soft X-Ray Interference Lithography

Zhu Weizhong^{1,2} Wu Yanqing¹ Chen Min¹ Wang Naxiu¹ Tai Renzhong¹ Xu Hongjie¹

(¹ Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

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

Abstract Based on the rigorous coupled-wave analysis, considering the actual fabrication processes for nanometer level gratings, the first-order diffraction efficiency was simulated for a normally-incident transmission grating at wavelength of 13.4 nm. The influence on the first-order diffraction efficiency by parameters, such as grating materials, relief thickness, gap/period ratio, and trapezoidal angle on the relief are analyzed quantitatively. The results show at the wavelength, the phase of the relief (Si_3N_4 , Cr, Au) effects grating diffraction greatly. The phase shift of the nonmetallic relief (Si_3N_4) is found to precede the metallic materials (Cr, Au). After optimization, Si_3N_4 , Cr and Au gratings with Si (Si_3N_4) substrate are proposed, which have the higher first-order diffraction efficiency than the Cr/ Si_3N_4 compound gratings currently used for soft X-ray interference lithography.

Key words interference lithography; soft X-ray transmission grating; rigorous coupled-wave method; complex refractive index; diffraction efficiency

1 引 言

软 X 射线干涉光刻(X-ray interference lithography, XIL)是利用多束软 X 射线干涉场对光刻胶进行曝光的新型微纳加工技术^[1]。与传统电子束直写刻蚀相比, XIL 没有邻近效应, 能够制造大面积(mm^2)高密度亚 50 nm 的周期性结构, 且具有效

率高等优点, 有规模生产的潜力。XIL 技术可以加工特征尺度在几纳米到几微米之间的线、孔、柱等周期结构, 该类结构在磁点阵、量子点阵、纳流体、全息光学器件、自组装模版的制备中有潜在的应用价值。目前瑞士 Paul Scherrer 研究所(PSI)的微纳米技术实验室(LMN)和美国威斯康辛大学的纳米技术

收稿日期: 2007-11-27; **收到修改稿日期**: 2008-01-17

基金项目: 上海同步辐射装置干涉光刻实验站项目资助课题。

作者简介: 朱伟忠(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事 X 射线干涉光刻光栅的设计与制作及干涉光刻实验方法等方面的研究。E-mail: zhuweizhong@sinap.ac.cn

导师简介: 徐洪杰(1955-), 男, 博士生导师, 主要从事同步辐射装置束线站的研制和同步辐射应用等方面的研究。E-mail: xuhongjie@sinap.ac.cn

中心正在利用同步辐射装置从事 XIL 相关技术的研究^[1~4]。LMN 在这方面做出了许多开创性的工作,例如,首先制作了用于 XIL 的四光栅结构分束掩模,得到四束对称分布的一级衍射光用于产生干涉图案^[2]。国内第一台第三代同步辐射装置——上海光源工程建设正在进行,其中包括软 X 射线干涉光刻光束线和实验站的建设。

因为 XIL 技术产生的干涉图样特征空间尺度最小可达十几个纳米左右,因此优化设计分束光栅,提高其一级衍射效率,有效缩短曝光时间,对于提高光刻空间分辨率非常重要。针对上海光源 X 射线干涉光刻实验站的实际需求,本文基于矢量耦合波理论,对 Si_3N_4 、Cr、Au 三种材料制作的透射型光栅的一级衍射效率进行了模拟计算,并对浮雕厚度、占空比及衬底材料等参量进行了优化。

2 严格耦合波理论

严格耦合波理论(Rigorous coupled-wave analysis,

RCWA)是一种精确分析电磁场在周期性结构中衍射问题的方法^[5~10],其公式推导主要基于麦克斯韦(Maxwell)方程。金属光栅具有高电导率从而产生高衍射效率,早期假设金属光栅电导率无限大^[11~14]。对于微波,无穷大电导率的假设是近似正确的,但对于软 X 射线波段,金属的导电率极差,存在较高的损耗,这种近似会导致严重的偏差。因此,对于这类较短波长,金属材料的电磁特性需用复介电系数来描述^[15]。在严格耦合波分析中,电磁场以及光栅的复介电系数都展开成傅里叶级数,并通过光栅分层、边界条件耦合,最后即可求得各衍射级次的复振幅矩阵值。

如图 1 所示为矩形及梯形透射光栅示意图。横电(TE)偏振光正入射到光栅表面,光栅周期为 Λ ,光栅上下两侧为真空(相对介电系数为 1)。

由 RCWA 理论可以推出考虑衬底吸收作用后的第 m 级反射效率 R_m 和第 m 级透射效率 T_m 分别为^[5~7]

$$R_m = A_{R_m} A_{R_m}^* \text{Re}(k_{1,zm}/k_0) \exp(-4\pi n_i h \sqrt{\Lambda^2 + m^2 \lambda^2}/\Lambda \lambda), \quad (1)$$

$$T_m = A_{T_m} A_{T_m}^* \text{Re}\left(\frac{k_{4,zm}}{k_0}\right) \exp(-4\pi n_i h \sqrt{\Lambda^2 + m^2 \lambda^2}/\Lambda \lambda), \quad (2)$$

式中 * 为复共轭符号, A_{R_m} 和 A_{T_m} 分别为反射和透射振幅矩阵的第 m 个元素, n_i 为衬底复折射率虚部, h 为衬底厚度,下标数字 1 与 4 分别对应图 2 中的入射区域(真空区域 1)与透射区域(真空区域 2), λ 为入射波波长, k_0 为真空中的波矢, $k_{1,zm}$ 、 $k_{4,zm}$ 分别定义为

$$k_{4,zm} = k_{1,zm} = \begin{cases} (k_0^2 - k_{xm}^2)^{1/2}, & (|k_0| > |k_{xm}|), \\ i(k_{xm}^2 - k_0^2)^{1/2}, & (|k_0| < |k_{xm}|), \end{cases} \quad (3)$$

式中 $k_{xm} = 2\pi m/\Lambda$ 。

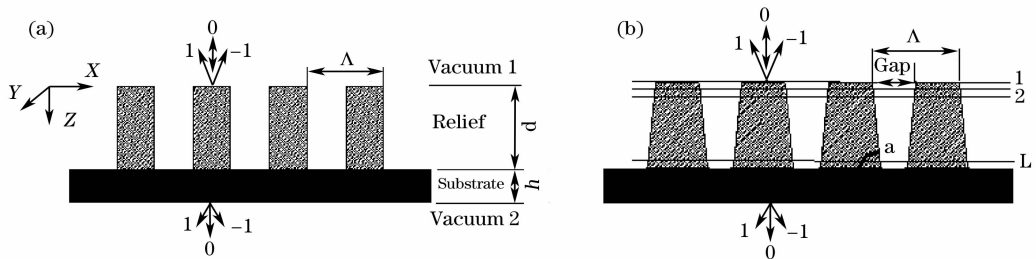


图 1 矩形(a)及梯形(b)透射光栅示意图

Fig. 1 Schematic cross section of rectangular (a) and trapezoidal (b) transmission grating

3 计算结果与讨论

XIL 技术目前通常使用 13.4 nm 的软 X 射线,原因之一是该波段兼容目前发展中的极紫外光刻。为便于和 X 射线干涉光刻目前使用的光栅进行比较,本文光栅周期取 100 nm,远大于使用的软 X 光

波长,因此横磁(TM)波的情况与 TE 波基本相同。以下模拟结果均为 TE 偏振情况,另外,软 X 射线正入射光栅表面。

3.1 光栅分析

LMN 在瑞士光源上使用的光栅的基本参量如

图 2 所示^[2],浮雕部分为 25 nm 厚的 Cr 和 40 nm 厚的 Si_3N_4 ,光栅的衬底为 60 nm 厚的 Si_3N_4 ,周期 $\Lambda=100$ nm,使用波长 13.4 nm,正入射软 X 射线透射型光栅。

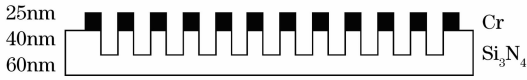


图 2 LMN 的干涉光刻光栅的切面示意图

Fig. 2 Schematic cross section of the diffraction grating of LMN for interference lithography

基于(1)式、(2)式,对图 2 所示的光栅进行模拟计算。计算中,对无穷矩阵截断数分别取 15 和 29 时的模拟结果进行了比较,发现两者的相对误差为 0.4%,所以截断数取为 15 计算结果已说明问题。最后得到 TE、TM 偏振下一级衍射效率模拟结果分别为 5.8% 和 6.03%,光栅总吸收率分别为 60.6% 和 59.5%。其中,衍射效率的计算结果与瑞士光源提供的数据(6%)^[2]相一致,验证了该方法的正确性。

3.2 相位型光栅浮雕厚度的影响

利用矢量耦合波理论,分别计算了不同材料 [Si_3N_4 、Cr、Au、Cr/ Si_3N_4 (100 nm)、Au/ Si_3N_4 (100 nm)] 的矩形光栅浮雕厚度对一级衍射效率的影响。模拟计算中假设无衬底,浮雕形状为矩形,周期 100 nm,占空比为 1/2。采用 Si_3N_4 、Cr、Au 的复折射率分别为 $0.9740 - i0.0091$, $0.9333 - i0.0382$, $0.9000 - i0.0498$ 时^[16],计算结果如图 3(a) 所示,其中一级最大衍射效率数值及其对应的浮雕厚度如表 1。由图 3(a) 可见,Cr/ Si_3N_4 (100 nm)、Au/ Si_3N_4 (100 nm) 复合型光栅的最大一级衍射效率分别只比 Cr、Au 光栅高出 0.7%、0.4%。但 Cr/ Si_3N_4 (100 nm)、Au/ Si_3N_4 (100 nm) 复合型光栅的制作需要对 Si_3N_4 进行感应耦合等离子体刻蚀,这一步很容易造成 Si_3N_4 衬底薄膜的破裂,因此以下的优化模拟不针对此类复合型光栅。图 3(b)~图 3(d) 同时分别给出了复折射率中实部、虚部等对一级衍射效率的贡献。

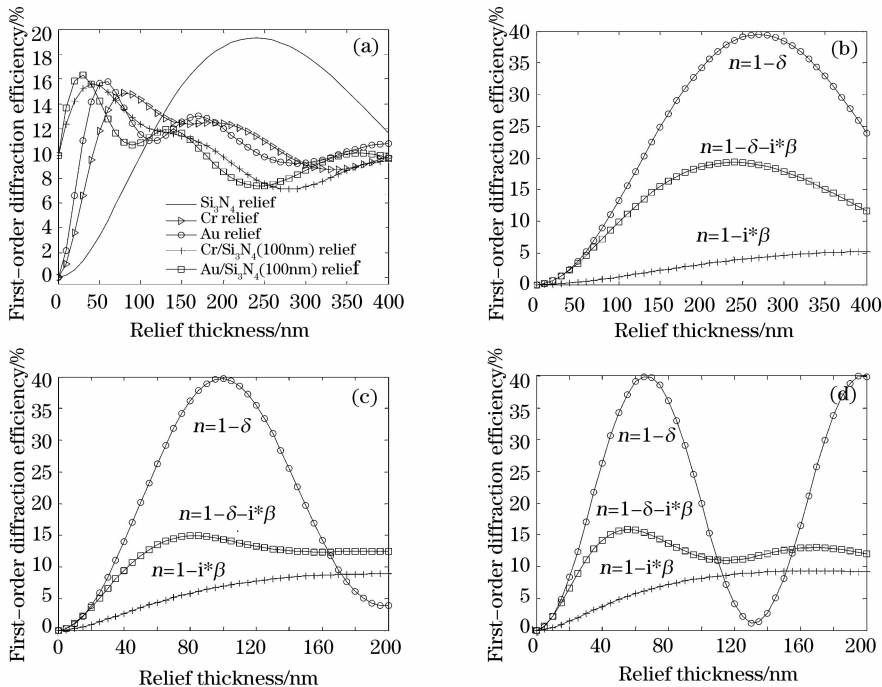


图 3 光栅一级衍射效率随浮雕厚度变化。(a) 采用标准复折射率值,(b) Si_3N_4 , (c) Cr, (d) Au 光栅复折射率实部、虚部对其衍射效率的贡献

Fig. 3 First-order diffraction efficiency versus relief thickness. (a) With a standard complex refractive index, contributions of real and imaginary part of (b) Si_3N_4 , (c) Cr, (d) Au grating for the diffraction efficiency

从图 3 中可见,对于只考虑相位作用的完全相位型光栅($n=1-\delta$),当光栅占、空两部分的相位差增加到 π 的过程中,一级衍射效率逐渐增加到极大值,然后随着相位差的进一步增大,一级衍射效率开

始下降;对于只考虑吸收作用的完全振幅型光栅($n=1-i\beta$),在 Si_3N_4 光栅浮雕厚度 400 nm 和 Cr、Au 光栅浮雕厚度 200 nm 范围内,一级衍射效率随着浮雕吸收作用的增大而缓慢增大。实际的一级衍

射效率是浮雕的吸收作用和相位作用共同影响的结果。从图 3(b)~图 3(d)可见,实际光栅的一级衍射效率和其对应的完全相位型光栅变化曲线相似,因此相位作用对光栅一级衍射效率起主导作用。尤其要指出的是,非金属 Si_3N_4 光栅一级衍射效率达到最大值时对应的吸收作用比相应的 Cr 光栅和 Au

光栅要小,相对而言,相位作用更显著,因而最大一级衍射效率最高。

考虑到纳米光栅制作的现行工艺条件^[17],本文所取的 Si_3N_4 、Cr、Au 光栅浮雕厚度比分别为 160 nm、80 nm、55 nm,本文优化模拟以此厚度为基础。

表 1 最大一级衍射效率及其对应的浮雕厚度

Table 1 Maximal first-order diffraction efficiency and corresponding relief thickness

Relief material	Si_3N_4	Cr	Au	Cr/ Si_3N_4 (100 nm)	Au/ Si_3N_4 (100 nm)
Maximal first-order diffraction efficiency / %	19.4	14.9	15.9	15.6	16.3
Relief thickness corresponding to the maximal first-order diffraction efficiency /nm	240	80	55	40	30
Relief thickness corresponding to the π phase shift /nm	258.1	100.5	67.0	61.6	41.0

3.3 占空比及梯形浮雕底角的影响

光栅的一级衍射效率随占空比的变化而变化,优选最佳的占空比是加工理想光栅的一项重要工作。下面首先对矩形光栅的占空比进行优化,然后考虑纳米级光栅在实际制作过程中的浮雕不陡直情况,对浮雕梯形底角和占空比作统一优化。

把总的衍射光(D_t)分成三部分:0级透射光(衍射效率为 T_0)、 ± 1 级透射光(T_1 、 T_{-1} ,两者衍射效率近似相等)、其余级次的衍射光(衍射效率为 D_o)。从图 4 可见,光栅的 0 级、 ± 1 级透射光是总衍射光强的最主要的两部分;随着占空比从 0.4 到 0.6 的变化,总衍射光强逐渐增大,同时 0 级透射光强也逐渐增大;同时随着占空比从 0.4 到 0.6 的变化,1 级透射光强在总衍射光强中所占的比例逐渐减小,其余衍射级次光强所占的比例在占空比达到 0.5 左右时最小,因为在占空比为 0.5 时,偶数级次的衍射消光。以上因素最终导致矩形光栅的一级衍射效率在占空比为 0.5 左右时达到最大,越远离 0.5,一级衍射效率越小。 Si_3N_4 光栅、Cr 光栅的情况也相类似。

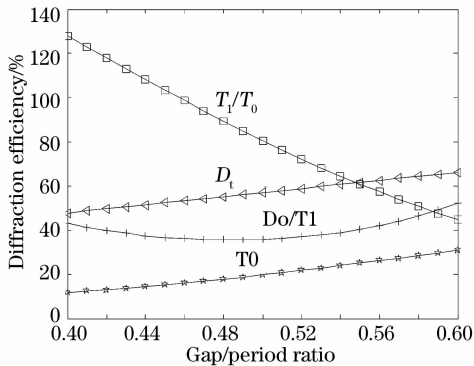


图 4 矩形 Au 光栅的衍射效率随占空比的变化

Fig. 4 Diffraction efficiency for Au rectangular grating versus gap/period ratio

由于经过电子束曝光、显影、蒸镀(或电镀)等工艺制作的金属光栅,或者经过电子束曝光、显影、ICP 或反应离子刻蚀得到的非金属光栅侧壁并不能完全陡直,一般得到的是梯形光栅,同时由于工艺设备及控制条件的不同以及浮雕厚度的不同,梯形的底角也会发生一定的变化,从而对一级衍射效率会有一定影响。在对周期 100 nm、浮雕厚 160 nm、占空比为 0.5、梯形浮雕底角 83° 的 Si_3N_4 光栅衍射效率的模拟计算过程中,对梯形光栅进行了等厚度分层计算处理,结果发现层厚取 10 nm 与取 5 nm 相比,一级衍射效率的计算值相差仅为 0.01%,因此本文模拟计算的等厚度分层的层厚取 10 nm。本文选取光栅的占空比范围为 0.4~0.6、梯形浮雕底角范围 α 为 $83^\circ\sim 90^\circ$,模拟结果如图 5 所示。

由图 5 可见,对于 Si_3N_4 、Cr、Au 三种光栅,若梯形浮雕底角在 $83^\circ\sim 90^\circ$ 之间取任一角,都有一个对应的占空比值,使得到的一级衍射效率最大;梯形底角偏离直角越小,对应一级衍射效率最大值的占空比值也越小;对于相同的梯形浮雕底角,浮雕厚度较大的光栅(如 Si_3N_4 光栅)对占空比变化较为敏感。因此适当调整占空比的大小可以提高衍射效率,这种调整对较小的梯形底角(电子束刻写的具体条件及后续工艺所决定)尤其重要。

从图 6 中可见, Au 光栅的梯形浮雕底角为 85° 时,当占空比取 0.4~0.6 时,一级衍射效率都是在 Au 浮雕厚度为 55 nm 左右处达到最大值,同时在梯形浮雕底角为 $83^\circ\sim 90^\circ$ 时,一级衍射效率最大值对应浮雕厚度的取值也是 55 nm 左右。所以,在实际加工时浮雕厚度的优化取值不依赖占空比及梯形浮雕底角。这个结论对 Si_3N_4 光栅和 Cr 光栅也成立。因此,对浮雕高度的优化和对占空比和梯形浮

雕底角的优化分别进行是合理可行的。

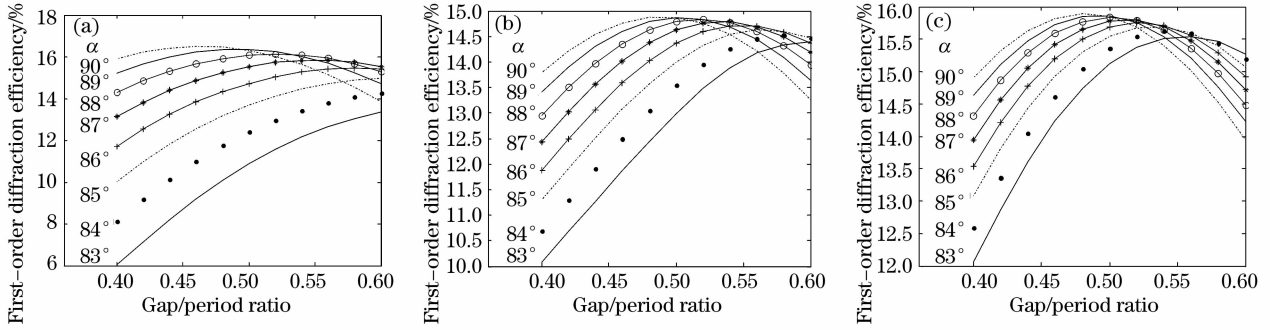


图 5 Si_3N_4 (a), Cr (b), Au (c) 光栅一级衍射效率随梯形浮雕底角与占空比的变化

Fig. 5 First-order diffraction efficiency for Si_3N_4 (a), Cr (b), Au (c) grating versus the gap/period ratio at various trapezoidal angles

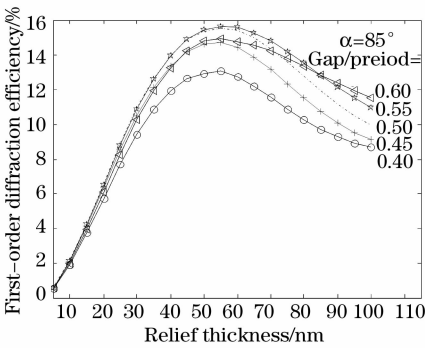


图 6 Au 光栅一级衍射效率随浮雕厚度的变化

Fig. 6 First-order diffraction efficiency of Au grating versus relief thickness

3.4 衬底的影响

Si_3N_4 、Cr、Au 光栅在最优化的梯形浮雕底角、占空比条件下,光栅衬底只是产生吸收作用,对讨论的光栅优化条件没有影响。衬底对 X 射线的吸收会引起两个问题:一是减弱光栅的一级衍射效率,增加光刻胶的曝光时间,导致长周期振动对干涉光刻的

不利影响;二是增加了光栅热形变,可能导致衍射波前产生畸变,从而影响干涉图样及其空间分辨率。对于 13.4 nm 的软 X 射线, Si 的复折射率为 $0.9999 - i0.001821$,其吸收作用比 Si_3N_4 弱,但是 Si_3N_4 的支撑强度较高,所以光栅制作中可以用较厚的 Si 作为支撑的衬底。PSI 在制作光栅时,在 25 nm 厚 Cr 蒸镀完成后,在 100 nm 厚的 Si_3N_4 膜上再刻蚀掉 40 nm,余下 60 nm 厚的 Si_3N_4 作为光栅衬底。刻蚀 Si_3N_4 膜这一过程会改变 Si_3N_4 膜的应力,使之容易破裂。本文在设计中不对 Si_3N_4 薄膜进行刻蚀,所以工艺相对简单、可靠。

通过对光栅梯形浮雕底角和占空比分别在 $83^\circ \sim 90^\circ$ 和 $0.4 \sim 0.6$ 的优化配置(图 6 中每条曲线的最大值对应的梯形浮雕底角和占空比的一组值),采用 80 nm 的 Si_3N_4 作为支撑衬底,则 Si_3N_4 、Cr、Au 光栅的一级衍射效率分别可以达到 $6.7\% \sim 8.2\%$ 、 $7.2\% \sim 7.5\%$ 、 $7.8\% \sim 8.0\%$,如图 7(a)。若采用 160 nm 的 Si 作为支撑的衬底,则 Si_3N_4 、Cr、Au 光

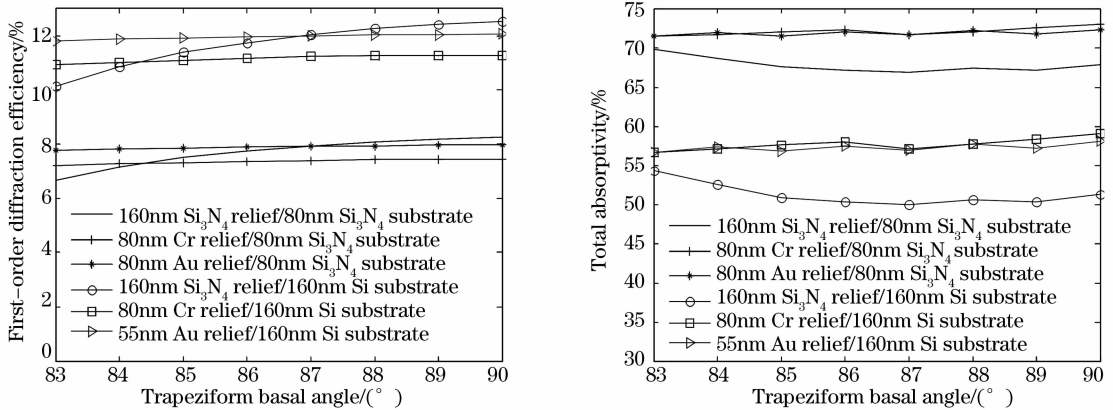


图 7 在最优化的梯形浮雕底角、占空比条件下, Si_3N_4 、Cr、Au 光栅的一级衍射效率(a)和总吸收率(b)

Fig. 7 Under the conditions of the optimized trapezoidal basal angle and the gap/period ratio, the first-order diffraction efficiency (a), and the total absorptivity (b) of Si_3N_4 , Cr, Au gratings

栅的一级衍射效率分别可以达到 10.1%~12.4%、10.9%~11.3%、11.8%~12.1%，如图 7(a)。因此用 Si 做衬底可有效增加光栅的一级衍射效率。

另外计算了浮雕与衬底同材料的情况下，若用 50 nm 的金属做衬底，Au 或 Cr 光栅的总吸收率达到 90% 以上，因此实际设计中金属光栅一般需要用非金属材料做衬底。

由图 7 可见，若选用 160 nm 的 Si 做衬底，则优化模拟得到的 Si_3N_4 、Cr、Au 三种材料的光栅的一级衍射效率和总吸收率均优于瑞士光源微纳米技术实验室的干涉光刻光栅；若选用 80 nm 的 Si_3N_4 做衬底，总吸收率虽有所增大，但其一级衍射效率仍然较优。将后一种方案列入考虑范围，是因为浮雕和衬底均为 Si_3N_4 的方案技术上更简单些。

4 结 论

基于严格的矢量耦合波方法，模拟分析了 13.4 nm 软 X 射线透射光栅一级衍射效率的各种影响因素。计算了只考虑吸收作用和相位作用时 TE 波的一级衍射效率，讨论了 Si_3N_4 、Cr、Au 等不同材料及厚度的浮雕对衍射效率的影响。结果表明，这些材料的相位因素主导了一级衍射效率。模拟了光栅的占空比、梯形浮雕底角对一级衍射效率的影响，计算了最优化的梯形浮雕底角、占空比条件。分别选取 160 nm Si 和 80 nm Si_3N_4 作为衬底，讨论了衬底的吸收作用。结果表明，若选用 160 nm Si 做衬底， Si_3N_4 、Cr、Au 材料光栅的一级衍射效率和总吸收率均明显优于 PSI 微纳米技术实验室的干涉光刻光栅，但工艺制作较复杂；若选用 80 nm 的 Si_3N_4 做衬底，总吸收率虽然有所增大，但其一级衍射效率仍较优，且工艺制作较简单。另外在优化的光栅结构中，TE 波条件下的一级衍射效率模拟结果与 TM 波基本相等。

致谢 感谢中国科学院微电子所的谢常青老师和丹麦科技大学的 Peixiong Shi 老师在光栅优化设计和相关工艺的探讨中给予的极大帮助。

参 考 文 献

1 H. H. Solak, C. David, J. Gobrecht *et al.*. Four-wave EUV interference lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2002, **61~62**: 77~82

2 H. H. Solak, C. David, J. Gobrecht *et al.*. Sub-50 nm period patterns with EUV interference lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2003, **67~68**: 56~62

3 John Wallace, Yang-Chun Cheng, Artak Isoyan *et al.*. A novel EUV exposure station for nanotechnology studies[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007, **582**(1): 254~257

4 Yasin Ekinici, Harun H. Solak, Celestino Padeste *et al.*. 20 nm line/space patterns in HSQ fabricated by EUV interference lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, **84**(5~8): 700~704

5 M. G. Moharam, D. A. Pomett, E. B. Grann *et al.*. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1077~1086

6 S. Peng, G. M. Morris. Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1087~1096

7 D. Hambach, G. Schneider, E. M. Gullikson. Efficient high-order diffraction of extreme-ultraviolet light and soft X-rays by nanostructured volume gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(15): 1200~1202

8 Wang Chunhua, Liu Liren, Yan Aimin *et al.*. Diffraction properties of transmission photorefractive volume holographic grating read by an ultrashort pulsed laser beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 801~805

王春花,刘立人,闫爱民等. 透射型光折变体全息光栅对超短脉冲激光束衍射的特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 801~805

9 Liu Qiuping, He Xingdao, Zhang Aiyun *et al.*. Linear solution for coupled-wave equation of nonlinear 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

10 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

11 D. Maystre, R. Petit. Diffraction par un réseau lamellaire infiniement conducteur[J]. *Opt. Commun.*, 1972, **5**(2): 90~93

12 G. M. Whitman, D. M. Leskiw, F. Schwegler. Rigorous theory of scattering by perfectly conducting periodic surfaces with trapezoidal height profile—TE and TM polarization[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**(12): 1495~1503

13 J. A. DeSanto. Scattering from a perfectly reflecting arbitrary periodic surface—An exact theory[J]. *Radio Science*, 1981, **16**(6): 1315~1326

14 R. Petit, M. Cadilhac. Form of the electromagnetic field in the groove region of a perfectly conducting echelette grating[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(7): 963~965

15 Lifeng Li. Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(9): 1870~1876

16 B. L. Henke, E. M. Gullikson, J. C. Davis. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E=50\sim 30,000$ eV, $z=1\sim 92$ [J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, **54**(2): 181~336

17 Sunggook Park, Helmut Schift, Harun H. Solak *et al.*. Stamps for nanoimprint lithography by extreme ultraviolet interference lithography[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2004, **22**(6): 3246~3250