

基于X射线塔尔博特效应的纳米光栅制作模拟研究

闻铭武 杨笑微 王占山

Simulation of nano-grating patterning based on X-ray Talbot effect

Wen Ming-Wu Yang Xiao-Wei Wang Zhan-Shan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 114102 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Bessel 光束经椭圆环形孔径后的衍射光场

Diffraction optical field of the Bessel beam through elliptical annular aperture

物理学报.2015, 64(12): 124201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124201>

球壳结构金阴极及其X射线光电发射特性

Fabrication and X-ray photoemission characteristics of Au spherical shell photocathodes

物理学报.2015, 64(9): 094103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094103>

5fs 驱动激光脉冲的高次谐波选择性优化

Tunable optimization of high-order harmonic generation driven by 5 fs laser pulses

物理学报.2014, 63(22): 224103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224103>

级联式平面抛物面型X射线组合折射透镜的设计与制作

Design and fabrication of cascaded X-ray planar parabolic compound refractive lens

物理学报.2014, 63(19): 194103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194103>

Laue 弯晶聚焦特性的光线追迹研究

Study of the focusing properties of Laue bent crystal by ray-tracing

物理学报.2012, 61(10): 104102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.104102>

基于X射线塔尔博特效应的纳米光栅制作模拟研究*

闻铭武 杨笑微 王占山†

(同济大学物理科学与工程学院, 精密光学工程技术研究所, 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092)

(2014年8月7日收到; 2014年9月27日收到修改稿)

沿纳米多层膜生长方向切割可制成周期只有几纳米而厚度几十微米的切片多层膜光栅. 基于该切片多层膜光栅塔尔博特自成像效应的X射线光刻是一种新型的纳米图样制作方法. 已有学者用该方法完成了百纳米结构光栅的制作. 采用严格耦合波方法, 本文模拟计算了切片多层膜光栅在满足塔尔博特自成像条件下的后表面光场分布, 详细讨论三个影响光栅后表面成像质量的重要参数: 光栅厚度、材料厚度所占比例和多层膜周期. 模拟结果表明, 光栅厚度不仅影响X射线透射率, 还会改变像面条纹衬比度. 材料厚度比的大小直接决定像面是否存在清晰条纹, 选取合适的材料厚度比, 得到了前人实验中近场反常成像现象. 计算还表明, 在一定条件下, 采用周期更小的多层膜光栅有望获得更高分辨率的纳米图形, 这说明使用塔尔博特效应制作更加精细的纳米结构图形具有可行性.

关键词: X射线, 塔尔博特效应, 光栅, 严格耦合波理论

PACS: 41.50.+h, 42.25.Fx, 42.79.Dj, 41.20.-q

DOI: 10.7498/aps.64.114102

1 引言

集成电路因其成本低、体积小、集成度高、稳定性好等优点已广泛应用于计算机、手机、智能机器人等各类高科技产品中. 光刻技术是大规模集成电路制造的核心技术. 随着集成电路制造技术的飞速发展, 器件特征尺寸不断减小, 由于受物理极限限制, 传统的紫外及深紫外光学曝光技术已无法满足超大规模集成电路制造的需求. 为了解决22 nm以下图形的制作问题, 人们一直努力发展新的光刻技术. 根据瑞利判据, 光学曝光系统的分辨率受 $k\lambda/NA$ 限制, k 为系统常数, NA 为光学系统的数值孔径, λ 为波长. 波长越小, 系统分辨率越高. 因此, 采用13.5 nm波长的极紫外光刻(extreme ultraviolet lithography, EUVL)成为未来光刻技术的一大热门^[1]. 相比于电子束光

刻^[2] (electron beam lithography, EBL)、纳米压印^[3] (nanoimprint lithography, NIL)等其他光刻技术, EUVL具有分辨率高和易于大规模生产等优点. 除了重点开展的上述主流光刻技术研究外, 人们还在不断探寻新的纳米图形制作技术.

塔尔博特(Talbot)效应是周期结构物体的自成像现象, 由Talbot^[3]在1836年发现, 但他只是基于衍射原理给出了定性解释. 1881年, Rayleigh^[4]从菲涅耳衍射原理出发定量解释了塔尔博特效应. 对于周期为 d 的任意一维光栅, 其透过率函数 $T(x)$ 可用傅里叶级数展开为

$$T(x) = \sum_m C_m e^{i2\pi x \frac{m}{d}}, \quad (1)$$

其中, m 为级次, C_m 为对应级次的振幅系数, 对于垂直入射的单位振幅平面波, 根据菲涅耳衍射, 光

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB922203)和上海市科委纳米计划(批准号: 11nm0507200)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangzs@tongji.edu.cn

栅透射光场复振幅分布函数为

$$E(x, z) = \frac{1}{\sqrt{i\lambda z}} \int_{-\infty}^{\infty} T(x') e^{i\frac{\pi}{\lambda z}(x-x')^2} dx' = \sum_n C_n e^{-i\pi \frac{n^2 z \lambda}{d^2}} e^{i2\pi \frac{n}{d} x}, \quad (2)$$

其中, λ 为入射光波长, 在 $z = 2nd^2/\lambda$, $n = 1, 2, 3, \dots$, 有 $E(x, z) = T(x)$, 这就是塔尔博特自成像效应^[5], $z_T = 2nd^2/\lambda$ 称作塔尔博特距离. 该效应已广泛用于极紫外、X 射线纳米图形制作、波前测量^[6,7] 和相位衬比成像^[8,9] 等领域. 当 X 射线垂直照射到一维周期结构上时, 在塔尔博特距离位置放入光刻胶, 经过曝光显影可得到一维周期结构图形. 基于该效应进行纳米图形制作具有结构简单、单位面积价格便宜以及生产效率高等优点.

目前, 在新型光刻技术探究中, 基于塔尔博特效应的纳米图形制作取得了一定的进展. 早在 1995 年, Chapman 等^[10] 就利用原子的塔尔博特效应进行了光刻, 成功刻蚀出线宽为 200 nm 一维光栅结构. 在 EUV 波段, 2005 年, Solak 和 Ekinici^[11] 采用中心波长为 13.5 nm 的宽带光源, 对周期为 200 nm 的一维光栅结构以及直径为 100 nm、间距为 800 nm 圆孔阵列进行塔尔博特成像, 获得清晰图样. 2009 年 Isoyan 等^[12] 使用 46.9 nm 激光对

大面积任意周期性结构的掩模板实现了塔尔博特成像, 在 1 倍塔尔博特距离处, 有效成像面积达到 $600 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$, 掩模板的最小结构尺寸为 140 nm. 为了提高纳米图形制作的分辨率, 需要使用波长更短的 X 射线开展基于塔尔博特成像的纳米图形制作研究. 2011 年, Lee 等^[13] 提出使用溅射镀膜的方法, 利用密度相差较大的两种材料 WSi_2 和 Si 制成多层膜, 在沿膜生长方向切割成光栅, 这样制成的切片多层膜光栅 (如图 1 (a)), 周期可以只有几个纳米, 厚度可以随意控制. 在 Lee 的实验中, WSi_2/Si 多层膜周期 $d = 300 \text{ nm}$, WSi_2 和 Si 两种材料的厚度比为 2:1, 多层膜总厚度也就是光栅总宽度 $2D = 10 \mu\text{m}$, 光栅厚度 $t = 13.1 \mu\text{m}$. Lee 使用该切片多层膜光栅, 在波长为 7.5 keV 的正入射 X 射线照射下, 对放于光栅后表面近场以及塔尔博特距离处涂有 ZEP520A-7 光刻胶的硅片进行曝光成像 (如图 1 (b)). 该实验成功刻蚀出 100 nm 宽的线条, 但这与理论分辨率^[12]

$$\Delta = \frac{\lambda}{2\text{NA}} = \frac{\lambda}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{z_T}{D}\right)^2} = 9 \text{ nm}$$

还有较大差距, 并且 Lee 的实验中还出现近场最佳像面位置偏离光栅后表面的反常现象.

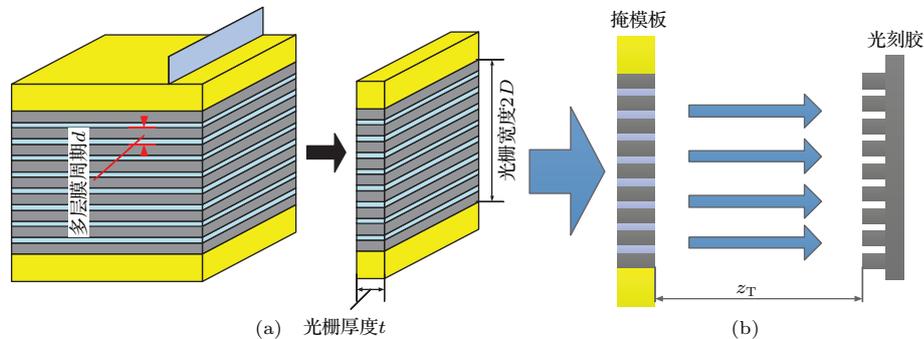


图 1 (网刊彩色) 切片多层膜光栅曝光 (a) 切片光栅制作; (b) 切片光栅的塔尔博特效应

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of nano patterning using a sectioned multilayer grating: (a) fabrication of a sectioned multilayer grating; (b) talbot effect of a sectioned multilayer grating.

利用 EUV 和 X 射线塔尔博特效应有望获得更小的特征尺寸纳米图形的制作, 在 Lee 之前, 解释分析 EUV 和 X 射线塔尔博特效应时均采用标量衍射理论, 这有利于给出光场分布的解析解. 但在考虑到材料的 X 射线吸收, 也就是光栅厚度不能忽略^[14] 时, 标量衍射理论不再适用, 需要使用准确的矢量衍射理论. 尽管 Lee 等在解释其实验时给出了基于耦合波理论 (coupled-wave theory, CWT) 计算的光场分布, 但没有对相关计算给予充分的

模拟和分析, 也没有说明其实验中的反常现象, 同时, 在进行 CWT 计算过程中, Lee 等忽略了二阶求导项和边界衍射效应^[15], 因此, 他们获得的也是近似解. 本文采用更加准确的严格耦合波法 (rigorous coupled-wave theory, RCWT) 模拟与优化了影响基于 X 射线塔尔博特效应的切片多层膜光栅自成像性能的几个重要因素, 以便提高该方法制作纳米图形的精度. 通过调节相关参数, 成功模拟出 Lee 实验中的反常现象.

2 严格耦合波理论

根据 Rayleigh 的分析, 塔尔博特效应是典型的标量衍射理论产物. 但在对 X 射线波段衍射光场进行计算时, 必需考虑材料的吸收, 这时需要采用更加准确的矢量衍射理论. 基于 RCWT^[16-20] 方法, 本文对利用多层膜光栅塔尔博特效应进行 X 射线纳米图形制作的光场分布进行了模拟计算, 并讨论了几个影响纳米图形制作质量的重要因素. 首先简单介绍 RCWT 方法.

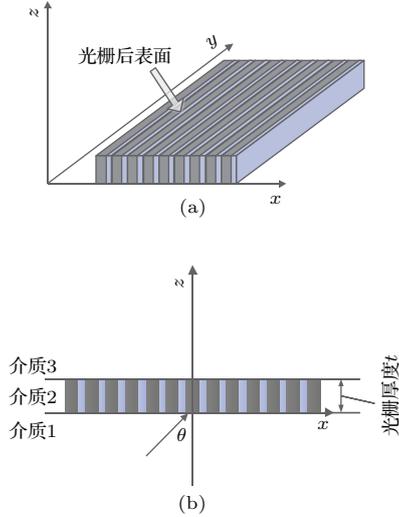


图 2 (网刊彩色) (a) 光栅所在坐标系, 栅线沿着 y 方向; (b) 厚度为 t 的光栅界面层分布

Fig. 2. (color online) (a) Coordinate system for calculation, the y axis is parallel to the grid lines of grating; (b) Interfaces distribution of the grating, t is grating thickness.

如图 2(a) 所示建立坐标系, 光栅栅线沿着 y 轴方向, x 轴平行于膜层生长方向, z 轴沿光栅厚度方向, 光栅前表面是 z 轴零点, 后文所有计算得到的图像在 z 轴方向都具有同样零点. 考虑 TE 偏振的情况, 入射光电场强度垂直于入射面, 即 $E = E_y e_y$, 其中 e_y 是 y 方向单位矢量, 入射光透过光栅, 光场复振幅满足亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 E_y + k^2 \hat{\varepsilon}(x) E_y = 0, \quad (3)$$

其中, $\varepsilon(x) = \varepsilon_0 \hat{\varepsilon}(x)$, ε_0 是真空中介电常数, $\hat{\varepsilon}(x)$ 为相对介电常数, $k = 2\pi/\lambda$ 为真空中波矢的大小. (3) 式是单色平面波照射下 TE 偏振的波动方程. 其通解可以写为

$$E_y(x, z) = \sum_j S_j(z) e^{-i[(v+j\eta)x+k\beta z]},$$

式中, $\nu = nk \sin \theta'$, $\beta = n \cos \theta'$, θ' 为折射角, $\eta = 2\pi/d$, 在正入射的情况下, $\nu = 0$, $\beta = n$. 将上述解代入亥姆霍兹方程

$$\begin{aligned} \frac{d^2 S_j(z)}{dz^2} - 2ik\beta \frac{dS_j(z)}{dz} \\ - [(v+j\eta)^2 + k^2 \beta^2] S_j(z) \\ + k^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{\varepsilon}_n S_{j-n}(z) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

j 表示不同级次的波. (4) 式表明, 第 j 个谐波振幅的变化不仅与本身, 而且与其他谐波 S_{j-n} 有关, 这就是耦合波的由来. 考虑边界条件, 如图 2(b), 在 $z = 0$ 和 $z = t$ 处电场强度和磁场强度的切向分量连续

$$\begin{aligned} E_{y1}|_{z=0} &= E_{y2}|_{z=0}, \\ H_{x1}|_{z=0} &= H_{x2}|_{z=0}, \\ E_{y2}|_{z=t} &= E_{y3}|_{z=t}, \\ H_{x2}|_{z=t} &= H_{x3}|_{z=t}, \end{aligned} \quad (5)$$

E_{y1} , E_{y2} , E_{y3} 分别表示介质 1, 2 和 3 内电场强度, H_{x1} , H_{x2} , H_{x3} 为对应的磁场强度, 利用求矩阵本征值和本征矢量的方法, 再结合边界条件, 可求出空间各处的光场分布.

对于 TM 偏振的光, 也可以用类似的方法求光场分布, 这对二维光栅的计算十分有利, 这里就不再详细介绍.

3 模拟计算结果

为了便于比对, 本文首先对 Lee 等实验条件下的光场分布进行模拟. 即模拟在 7.5 keV 的 X 射线照射下, 周期 $d = 300$ nm 厚度比为 2: 1 的 WSi₂/Si 切片多层膜光栅塔尔博特成像时的光场分布. 在光栅厚度为 $t = 13.1$ μm 的条件下, 光栅后表面起光强分布如图 3 所示.

图 3(a) 示出了在光栅后表面一个塔尔博特距离 ($z_T = 1091$ μm) 内透射光场分布. 可以看出, 在 z_T 处, 存在光栅自成像效应. 在 $1/2z_T$ 处, 同样有光栅的自成像, 但其相位与原光栅相差 π . 值得注意的是, 在 $1/4z_T$ 和 $3/4z_T$ 处, 同样存在与光栅相似的像, 而传统标量理论计算下的塔尔博特效应在该位置会出现周期减半现象. 进一步计算还发现, 周期减半现象与两种材料密度和光栅厚度等因素紧密相连.

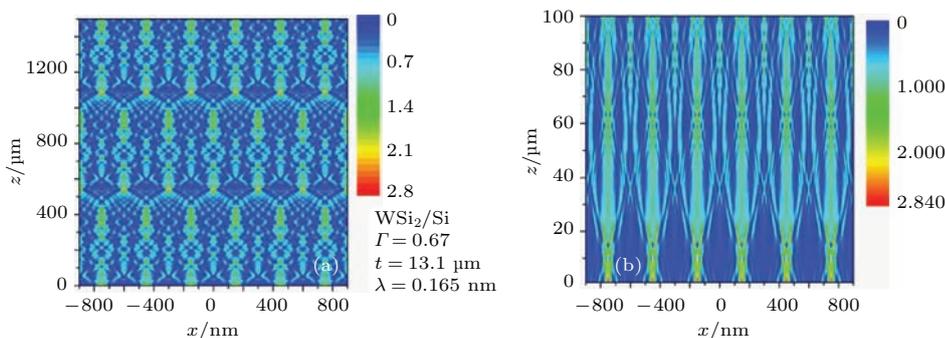


图3 (网刊彩色) 切片光栅透射光场分布图, 光栅周期 300 nm, 厚度 13.1 μm (a) 光栅后表面 1500 μm 内光场分布图; (b) 光栅后表面 100 μm 以内近场分布图

Fig. 3. (color online) Transmission wave field distribution for a sectioned multilayer grating. The grating period is 300 nm with a thickness of 13.1 μm: (a) intensity distribution of far field within 1500 μm; (b) intensity distribution of near field within 100 μm.

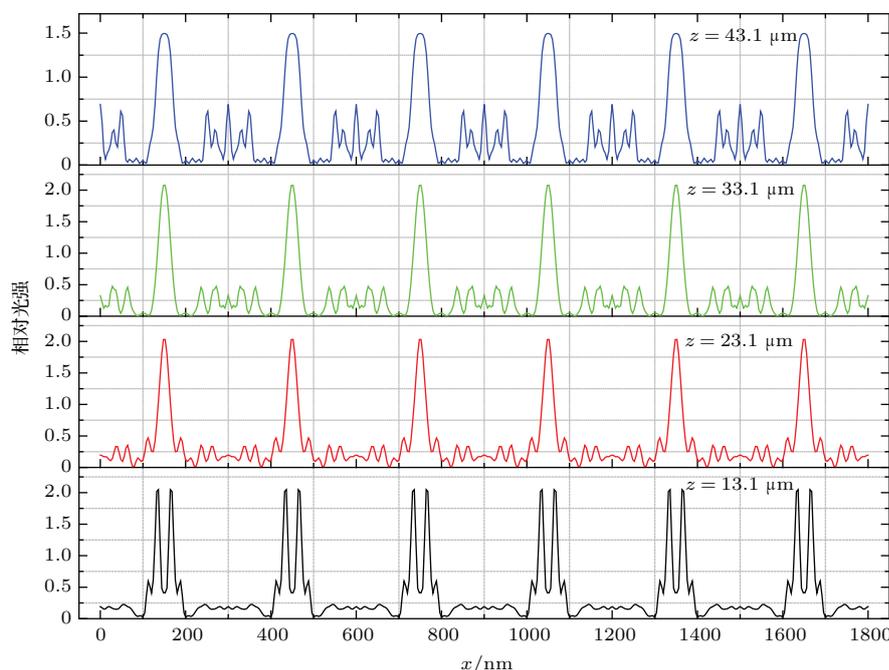


图4 (网刊彩色) 距光栅后表面不同距离光强分布图, 光栅厚度 $t = 13.1 \mu\text{m}$

Fig. 4. (color online) Series of image contrast profiles in different positions downstream the grating. The grating thickness is 13.1 μm.

与Lee等对光场分布的计算相比, RCWT和CWT计算得到的光场分布只表现出一些细节上的差别. 正是近场的细微差异, 使RCWT的计算结果更接近实际情况. 在Lee等的实验中, 出现超出其理论预计的实验结果, 即从光栅后表面开始沿 z 轴扫描, 发现最佳成像位置是在距光栅后表面约30 μm处. 由塔尔博特效应周期性的存在, $1/2z_T$ 及 z_T 附近最佳成像位置也往后移30 μm.

Lee等的近似CWT方法不能解释其实验结果, 但采用RCWT方法, 可以直观模拟出这种反常现象. 图3(b)给出光栅后表面100 μm以内的成像图

样, 图4给出距光栅不同位置的条纹分布, 我们发现紧贴光栅后表面光场(图4中 $z = 13.1 \mu\text{m}$)能量较为集中, 但条纹中间有较大凹陷, 条纹质量差, 这种缺陷可能是光栅具有一定厚度带来的. 相反, 随着距离增加, 条纹衬比度上升, 在距离后表面20 μm(图4中 $z = 33.1 \mu\text{m}$)左右, 衬比度有最大值, 但条纹宽度小于100 nm. 距离继续增加到30 μm(图4中 $z = 43.1 \mu\text{m}$), 相比于20 μm处, 衬比度有所下降, 但条纹宽度恰好100 nm左右, 因此, 可以认为, 最佳的成像位置在距离光栅20—40 μm之间, 这与Lee等的实验相符. 同时也说明如果使用

光刻胶进行曝光, 其焦深 $20\ \mu\text{m}$ 范围内都可获得较好的条纹, 这对该方法的实际应用十分有利.

前面已经提到, 在 Lee 等所使用的实验条件下, 理论分辨率可达 $9\ \text{nm}$, 目前实验还远远不及. 因此, 有必要通过模拟优化一些关键的实验参数, 以期提高后续实验的分辨率. 下面, 重点讨论光栅厚度 t 、材料厚度所占比例 Γ 以及多层膜周期 d 对成像质量的影响. 由于塔尔博特效应纵向周期性的存在, z_T 处光场分布与紧贴光栅后表面光场分布相同, 可以仅研究近场分布.

3.1 光栅厚度 t

考虑到 X 射线吸收, 光栅厚度成为不可忽略的重要因素. 仍以入射 X 射线能量为 $7.5\ \text{keV}$, 周期 $d = 300\ \text{nm}$ 、厚度比例为 2:1 的 WSi_2/Si 切片多层膜光栅为例. 假设正入射 X 射线是光强分布均匀的单位振幅平面波. 由于衍射效应, X 射线在穿过光栅后, 任一平行于光栅的像面上, 各点光强分布必然不均匀. 图 5(a) 中的黑线示出了 X 射线的平均透射率, 随着光栅厚度增加, 平均透射光强呈指数衰减, 这要求在采用塔尔博特效应进行光栅制作时, 需要根据光源强度来选取恰当的掩模板厚度.

另一方面, 由于两种材料吸收系数不同, 随着光栅厚度增加, 光栅条纹衬比度也会发生变化.

图 5(a) 中的红线和蓝线分别表示距光栅 $20\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$ 处光栅条纹衬比度, 红线基本呈上升趋势, 这说明, 光栅越厚增加, 两种材料对 X 光吸收的差异就会越大, 体现在像面就是条纹衬比度增加. 但蓝线却表明, 随着光栅厚度继续增加到 $30\ \mu\text{m}$ 以上, 衬比度反而下降. 为了研究其原因, 模拟出光栅厚度从 $5\ \mu\text{m}$ 变化到 $40\ \mu\text{m}$, 间隔 $5\ \mu\text{m}$ 的光栅后表面近场光强分布图, 由于光栅的周期性, 每个厚度只取一个周期 $\Delta x = 300\ \text{nm}$ 内的光强分布. 不同厚度光栅的光场分布进行比较如图 5(b), 光栅厚度变化时, 最佳像面与光栅距离也在不断变化. 光栅厚度为 $15\ \mu\text{m}$ 时, 最佳像面位置在 $40\ \mu\text{m}$ 附近, 距离光栅后表面约 $25\ \mu\text{m}$; 当光栅厚度增加到 $40\ \mu\text{m}$ 时, 距离光栅越远, 衬比度越低. 总而言之, 光栅厚度的改变使其对应的最佳像面位置也发生变化, 这导致图 5(a) 中红线和蓝线对应的衬比度不完全成单调变化.

以上分析可以看出, 光栅厚度是利用塔尔博特效应制作光栅的关键因素之一. 实验时需要根据光源强度, 综合考虑衬比度和 X 射线透射率来选择合适的光栅厚度. 对于本次模拟参数, 透射光衰减到入射光 $1/e$ 对应的光栅厚度约 $15\ \mu\text{m}$, 其对应条纹衬比度约 0.6, 此时成像质量较好, 因此后续讨论中, 光栅厚度选取 $15\ \mu\text{m}$.

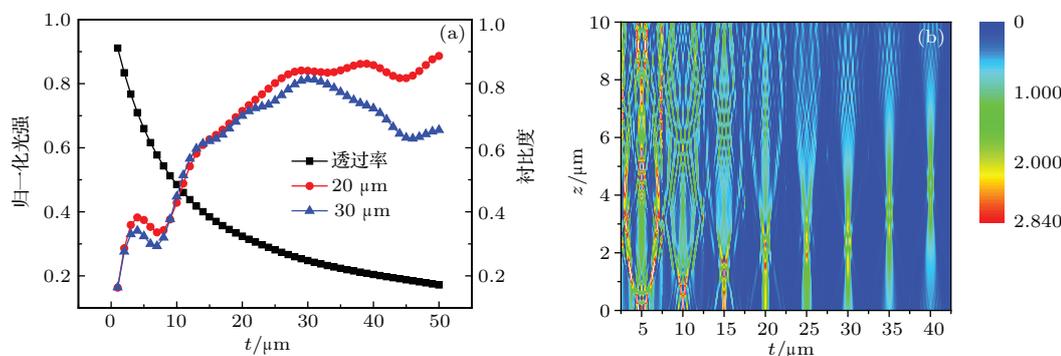


图 5 (网刊彩色) (a) 随着光栅厚度变化, 透射率 (黑线) 以及距离光栅不同位置条纹衬比度变化; (b) 不同厚度光栅近场光场强度分布.

Fig. 5. (color online) (a) The transmittance (black line) and image contrast variation (red and blue lines) with grating thickness and the spacing distance between the grating and image; (b) near wave field distribution with different grating thickness.

3.2 材料厚度所占比例 Γ

占空比 Γ 是光栅的一个重要参数. 对于本文讨论的切片多层膜光栅自成像, Γ 指的是 WSi_2 厚度

比上多层膜周期 d . 选取 $15\ \mu\text{m}$ 厚、周期 $300\ \text{nm}$ 的 WSi_2/Si 多层膜光栅, 让 WSi_2 所占比例从 $1/4$, $1/3$ 一直增加到 $4/5$, 探究在能量为 $7.5\ \text{keV}$ 的 X 射线照射下, 光栅后表面近场成像情况.

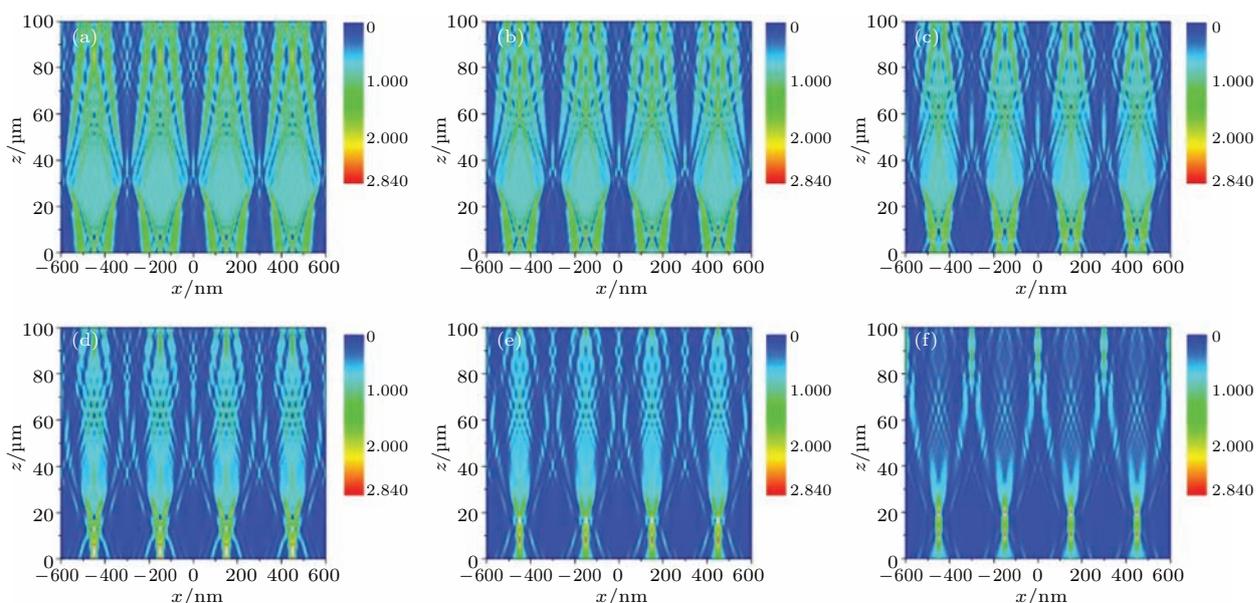


图6 (网刊彩色) 材料厚度所占比例不同的切片光栅对应的光场分布 (a) $\Gamma = 1/4$; (b) $\Gamma = 1/3$; (c) $\Gamma = 1/2$; (d) $\Gamma = 2/3$; (e) $\Gamma = 3/4$; (f) $\Gamma = 4/5$

Fig. 6. (color online) Wave field distribution with different layer thickness ratio: (a) $\Gamma = 1/4$; (b) $\Gamma = 1/3$; (c) $\Gamma = 1/2$; (d) $\Gamma = 2/3$; (e) $\Gamma = 3/4$; (f) $\Gamma = 4/5$.

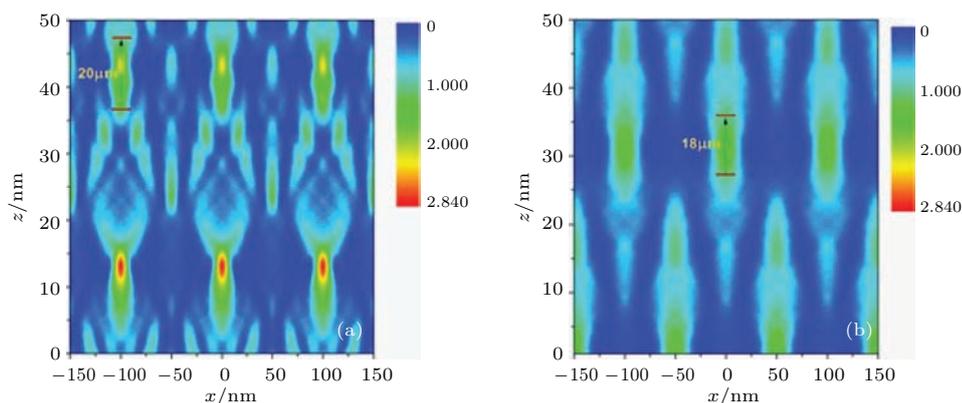


图7 (网刊彩色) (a) 周期 100 nm 切片多层膜光栅透射光场分布图; (b) 周期 50 nm 切片多层膜光栅透射光场分布图

Fig. 7. (color online) Wave field distribution with different multilayer periods: (a) $d = 100$ nm; (b) $d = 50$ nm.

如图6, 光栅后表面处于图中 $z = 15 \mu\text{m}$ 处, z 大于 $15 \mu\text{m}$ 为我们需要模拟的光场. 在 Γ 值较小时, 吸收层所占比例小, 尽管仍然出现条纹并且最佳像面位置偏离光栅后表面, 但衬比度差; 当 Γ 值大于 $1/2$ 时, 条纹变得更加清晰, 在 $\Gamma = 2/3$, 也就是3.1中使用的 Γ 值中, 最佳像面偏离光栅后表面的反常现象非常明显, 成像焦深也较长; 而随着逐渐增大, 这种反常现象逐渐消失; 在 Γ 增大到 $4/5$ 时, 最佳像面紧贴光栅后表面, 尽管此时条纹衬比度很好, 但不利于曝光成像.

模拟结果表明, Γ 的大小一方面直接决定是否

能获得衬比度更高的条纹; 另一方面, Γ 的大小会导致最佳像面位置的变化, 反常现象在 Γ 大于 $4/5$ 时基本消失. 选取恰当的 Γ 是获得清晰图样的关键, 但选取 Γ 首先需要考虑的是镀制多层膜时两种成膜材料的结晶状况、应力匹配等因素, 只有保证两种材料成膜质量良好, 才能制备出高质量切片光栅.

3.3 膜周期厚度 d

根据分辨率计算公式

$$\Delta = \frac{\lambda}{2\text{NA}} = \frac{\lambda}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{z_T}{D}\right)^2}, \quad z_T = 2nd^2/\lambda,$$

波长越短、多层膜周期越小,分辨率越高.采用溅射镀膜的方法,可以做出周期只有几个纳米的多层膜,因此,用塔尔博特效应进行纳米光栅制作,理论上分辨率可以提高到亚纳米的量级.如图7,针对7.5 keV的X射线,膜厚15 μm , $\Gamma = 2/3$,当膜周期从100 nm减小到50 nm,仍然有较好成膜质量.对比图7(a)和(b),可以发现两点变化:一方面,条纹衬比度有所下降,但影响不大,有效成像焦深变化较小,都在20 μm 左右,即在20 μm 范围内曝光都可以获得较好线条,这对进一步提高曝光线条的分辨率十分有利,同时由于成像焦深较大,将两个切片多层膜紧贴正交放置同时曝光,有望进行二维纳米结构成像;另一方面,多层膜周期改变,最佳像面位置同样也会发生改变.

值得一提的是,实际中即使是同步辐射光源,也会存在一定发散角或会聚角,这一方面会使塔尔博特像有一定的放大或缩小;另一方面,塔尔博特像面位置也会后退或前移.这都将制约切片光栅周期的进一步减小.

4 结 论

本文基于RCWT理论,对利用切片多层膜光栅的塔尔博特效应进行纳米光栅制作进行了模拟计算,讨论了三个影响图形质量的重要因素.模拟发现:光栅厚度 t 直接决定X射线透射率,并对像面条纹衬比度产生影响.X射线透射率随光栅厚度增加呈指数衰减,而衬比度基本上随着厚度增加而增加,受最佳像面位置偏移的影响,距光栅相同距离处像面的衬比度随着厚度变化时会出现局部极大或极小值.光栅占空比 Γ 的大小决定是否可以形成高对比度条纹,根据模拟,密度大的材料所占比例越大,条纹越清晰.

模拟结果还表明:最佳像面位置会偏离光栅后表面,该现象同时受 Γ 和光栅厚度 t 以及多层膜周期 d 影响, t 和 d 的变化会导致偏移量改变, Γ 直接决定最佳像面位置偏移现象是否存在.由于实际光栅具有一定大小,塔尔博特效应随着 z 增加不会无限重复出现,越靠近光栅,进行曝光的质量越好.为了防止掩模板和光刻胶之间的接触污染,需要两者之间有一定间距.当 Γ 很大时,虽然条纹衬比度很高,但最佳像面位置基本与光栅后表面重合,不利于近场光刻胶曝光.根据本文的模拟结果, Γ 选

在2/3附近合适.最后,根据模拟计算,在保证发生衍射的前提下,使用周期更小的多层膜,仍能有足够焦深和较好的条纹对比度.

基于RCWT方法的模拟计算,成功模拟出Lee等实验中的反常现象.采用模拟优化后的参数有望利用X射线塔尔博特效应制作更高分辨率的纳米图形.

参考文献

- [1] Cui Z 2008 *Micro-Nanofabrication Technologies and Applications*(Beijing: Higher Education Press) p107 (in Chinese) [崔铮 2008 微纳加工技术及其应用(北京:高等教育出版社)第107页]
- [2] Jiang W, Wang N, Yan W, Hu S 2013 *International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale* Suzhou, China, August 26-30, 2013 p337
- [3] Talbot H F 1836 *Philos. Mag.* **51** 401
- [4] Rayleigh L 1881 *Philos. Mag.* **67** 196
- [5] Kim J M, Cho I H, Lee S Y, Kang H C, Conley R, Liu C, Macrander A T, Noh D Y 2010 *Opt. Express* **18** 24975
- [6] Matsuyama S, Yokoyama H, Fukui R, Kohmura Y, Tamasaku K, Yabashi M, Yashiro W, Momose A, Ishikawa T, Yamauchi K 2012 *Opt. Express* **20** 24977
- [7] Wang H C, Berujon S, Pape I, Rutishauser S, David C, Sawhney K 2013 *Opt. Lett.* **38** 827
- [8] Stutman D, Finkenthal M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 091108
- [9] Lei Y H, Liu X, Guo J C, Zhao Z G, Liu H B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 042901
- [10] Chapman M S, Ekstrom C R, Hammond T D, Schmiedmayer J, Tannian B E, Wehinger S, Pritchard D E 1995 *Phys. Rev. A* **51**
- [11] Solak H H, Ekinici Y 2005 *J. Vac. Sci. Technol.* **23** 2705
- [12] Isoyan A, Jiang F, Cheng YC, Cerrina F, Wachulak P, Urbanski L, Rocca J, Menoni C, Marconi M 2009 *J. Vac. Sci. Technol.* **27** 2931
- [13] Lee S Y, Cho I H, Kim J M, Yan H, Conley R, Liu C, Macrander AT, Maser J, Stephenson GB, Kang HC, Noh DY 2011 *J Appl. Phys.* **109** 44307
- [14] Attwood D 1999 *Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation Principles and Applications* (New York: Cambridge University Press) p357
- [15] Gaylord T K, Moharam M G 1982 *Phys. Rev. B* **28** 1
- [16] Magnusson R, Gaylord T K 1977 *J. Opt. Soc. Am.* **9** 1165
- [17] Chu R, Kong J A 1977 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **1** 14
- [18] Moharam M G, Gaylord T K 1981 *J. Opt. Soc. Am.* **7** 811
- [19] Gaylord T K, Moharam M G 1985 *Proc. IEEE* **5** 894
- [20] Zhang G P, Ye J X, Li Z G 1996 *Chin. Phys. B* **5** 817

Simulation of nano-grating patterning based on X-ray Talbot effect*

Wen Ming-Wu Yang Xiao-Wei Wang Zhan-Shan[†]

(MOE Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, School of Physics Science and Engineering, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(Received 7 August 2014; revised manuscript received 27 September 2014)

Abstract

High aspect ratio gratings can be made by perpendicularly cutting in the growth direction of multilayers. X-ray exposure technique using a sectioned multilayer grating based on Talbot effect is a new type of nano patterning method. Although 300 nanometer gratings through the experiment are completed, some phenomena in the experiments cannot be satisfactorily explained and the factors influencing the nano pattern quality have not been fully understood yet. Here we use a rigorous coupled-wave theory to discuss several important factors, including grating thickness, the fraction of material thickness and multilayer period, which is the first time as far as we know for Talbot self-imaging in X-ray range. Simulation results show that the grating thickness affects both X-ray transmission efficiency and fringe contrast, while the fraction of material thickness determines the quality of fringes. And the position deviation of the best image plane in near field is related to both the thickness of the grating and the multilayer period. Moreover, the multilayer gratings with smaller periods can achieve higher resolution, indicating that the Talbot effect can be used to fabricate a more detailed structure.

Keywords: X-ray beams, Talbot effect, gratings, rigorous coupled-wave theory

PACS: 41.50.+h, 42.25.Fx, 42.79.Dj, 41.20.-q

DOI: 10.7498/aps.64.114102

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2011CB922203), and the Nano Special Program of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality, China (Grant No. 11nm0507200).

[†] Corresponding author. E-mail: wangzs@tongji.edu.cn