

基于多层膜技术的硬 X 射线 Laue 透镜 衍射效率的理论研究*

黄秋实, 李浩川, 朱京涛[†], 桑田, 王占山, 陈玲燕

(同济大学 物理系, 精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

摘要:采用耦合波理论分析了 X 射线在多层膜 Laue 透镜中的传播, 选择 Cu 的 $K\alpha$ 线作 X 射线光源, 计算了多层膜 Laue 透镜的衍射效率. 材料为 $W\text{Si}_2/\text{Si}$, 最外层宽度为 10 nm, 深度为 8 500 nm 的多层膜 Laue 透镜, 倾斜情况下外层区域局部光栅的衍射效率可达 59%, 理论上证明了多层膜 Laue 透镜是实现 X 射线聚焦的有效手段.

关键词:X 射线光学; 多层膜; 耦合波理论; 效率; 倾斜波带片

中图分类号:O434

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2009)09-2299-5

0 引言

X 射线衍射、透射、荧光分析是研究各种材料结构、样品成分的重要手段, 在材料、生物、医学和环境等领域有着越来越重要的应用. 近年来, 随着同步辐射和各种光学元件的发展, 人们能够得到焦斑更小强度更高的 X 射线光束, 目前, 最小的 X 射线光斑已达 100 nm 以下. 由于在 X 射线波段所有物质的折射率都接近于 1, 所以无法采用常规的透镜实现 X 射线的聚焦. 复合折射透镜是由上百个透镜组成的, 通过多个透镜实现 X 射线的会聚, 一般需要采用微加工方法制成. 常用的 X 射线聚焦元件有复合折射透镜^[1]、K-B 镜^[2-3]和波带片^[4-5]等. K-B 镜利用 X 射线掠入射全反射的性质制成, 通过精细加工和装调能够得到很好的聚焦性能. 波带片有较大的数值孔径 NA, 能够达到高的空间分辨率^[6].

在软 X 射线波段, 用光刻方法制备的波带片已获得 15 nm 的分辨率, 并有望达到 10 nm^[4]. 但在硬 X 射线波段, 为了得到高的聚焦效率, 需要波带片的高宽比 z/d_m 很大, 其中 d_m 是波带片最外环的宽度, z 是波带片深度. 要制作大高宽比的波带片, 光刻方法难于实现, 人们开始利用镀膜的方法制备大高宽比的波带片. 起初是在细丝上直接镀制环形多层膜, 通过切片抛光, 得到 2 维波带片, 用这种波带片已经实现了 300 nm 的聚焦光斑, 聚焦效率约 25%^[7-8]. 由于用作波带片基底的细丝表面难于制成完美的圆弧形, 很难保证波带片内每层膜膜层均匀和位置

精确. 对于细丝基底, 溅射原子大都是倾斜沉积到基底上, 致使膜层的粗糙度增大. 而且, 在细丝基底上制作波带片是先镀制膜层厚度较厚的膜层, 最后镀制膜层最薄的膜层, 其缺点是: 经过长时间镀膜, 膜层粗糙度逐渐增大^[9], 沉积速率也会逐渐漂移, 从而造成膜层厚度控制准确度逐渐下降, 使得最外层膜的成膜质量和厚度都不易得到保证. 另一方面, 随着第三代同步辐射光源的迅速发展和 X 射线应用不断向硬 X 射线推进, 迫切需要研制能进一步提高 X 射线会聚能力和衍射效率的透射光学元件. 美国阿贡 (Argonne) 国家实验室的 Maser、Stephenson 等人提出基于多层膜技术设计 X 射线会聚光学元件—X 射线多层膜劳厄 (Laue) 透镜^[5]. 该设计的核心是: 首先镀制波带片中准确度要求最高的最薄膜层, 最后镀制厚膜层, 从而大大降低制作难度. 由于多层膜 Laue 透镜的高宽比很大, 其衍射特性不能用传统的衍射运动学来解释. 本文首先介绍 Laue 透镜的结构模型, 然后根据耦合波理论计算了其衍射特性, 最后根据现有实验室的 X 射线光源情况, 分析了不同参量 Laue 透镜所对应的性能, 为将来 X 射线 Laue 透镜制作和表征提供了理论依据.

1 Laue 透镜的结构

Laue 透镜是高宽比很大的波带片, 按照 Laue 透镜的性能可以确定其基本的结构参量. 图 1 给出了 Laue 透镜的基本结构. 在超光滑的平面基底上交替镀制由 2 种材料组成周期渐变的多层膜. 首先镀制厚度最薄的膜层, 然后按照波带片厚度变化规律逐渐镀制不同厚度的膜层. 完成薄膜镀制后, 再对多层膜进行切片和抛光, 逐步将多层膜的深度减薄到符合波带片设计的高宽比. 1 维 Laue 透镜是由 2 片完全一样符合波带片波带厚度变化规律的周期渐

* 国家自然科学基金(10675092)、上海市教育发展基金会晨光计划(2008CG25)和同济大学青年优秀人才培养行动计划资助

[†] Tel: 021-65981170-801

Email: jtzhu@tongji.edu.cn

收稿日期: 2008-09-23

修回日期: 2008-12-18

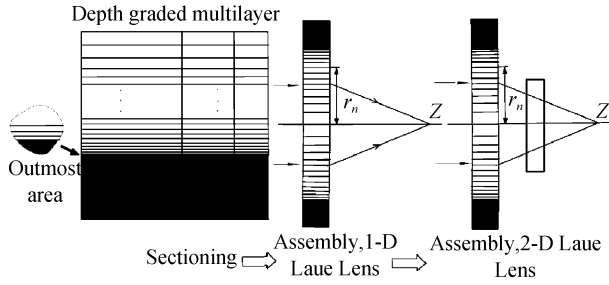


图1 Laue 透镜结构示意图

Fig. 1 Laue Lens structure diagram

变多层膜组成. 为提高波带片的衍射效率, 2 片多层膜需要同时向光轴倾斜一定的相同角度. 2 维 Laue 透镜是由 2 个 1 维 Laue 透镜相互垂直放置组成.

Laue 透镜中多层膜的结构参量为^[10]

$$r_n^2 = n\lambda f + n^2 \lambda^2 / 4 \quad (1)$$

式中 r_n 是 Laue 透镜中心往外第 n 层薄膜的位置半径, f 是 Laue 透镜 1 级衍射光的焦距, λ 是 X 射线的波长. 公式(1)中等号右面的二次项代表 Laue 透镜的球差, 当 $f \gg n\lambda/2$ 时, 这项可以忽略.

Laue 透镜中每层膜的厚度是

$$d_r = r_n - r_{n-1} = (\lambda f + n\lambda^2 / 2) / 2r_n \quad (2)$$

如果把 Laue 透镜中相邻 2 个膜层看作 1 个局部光栅结构, 则 Laue 透镜中每个局部光栅的周期 $D(r_n) = 2 \cdot d_r$, Laue 透镜总的层数

$$N_{\max} = f\lambda / 4(d_{r_{\text{out}}})^2 \quad (3)$$

式中 $d_{r_{\text{out}}}$ 是 Laue 透镜中最薄外层的厚度.

2 Laue 透镜衍射模型

通过对波带片的结构作傅里叶展开, 可以分析传统“薄”的振幅波带片各个衍射级次的特征^[10]. 用与振幅波带片透光带位相相反的透光带来代替振幅波带片中原有不透光带可使波带片的衍射效率提高 2~4 倍^[11]. 工作在硬 X 射线波段的波带片需要有很大的高宽比, 要对其进行分析, 已不适合采用描述一般“薄”波带片的衍射运动学理论, 而要考虑硬 X 射线与物质原子的多重散射以及入射 X 射线和各级衍射 X 射线的相互作用, 也就是需要利用 Laue 的衍射动力学来解释^[12], 正是由于这一原因, 这种大高宽比的波带片才被称作 Laue 透镜.

描述电磁波在体积光栅^[13,14]和厚波带片中传播方法主要有耦合波理论 (Coupled Wave Theory) 和耦合模式理论 (Coupled Mode Theory)^[15-17]. 抛物面波法也可以用来分析 Laue 透镜的衍射^[18], 且能在考虑像差的情况下分析厚波带片中离轴点的成像性质. 本文用一阶耦合波理论来研究 X 射线在 Laue 透镜中的传播.

将 Laue 透镜结构中相邻 2 层等效为一个局部

光栅(这两层宽度几乎相等), 这时可以认为 Laue 透镜是从中心到边缘由周期逐渐减小的一系列局部光栅组成. 定义 2 个描述局部光栅衍射特性的参量 Ω 和 Q'

$$\Omega = \frac{2}{\epsilon_{rd}} \frac{\lambda^2}{D^2}, Q' = \frac{2\pi}{\cos \theta} \frac{1}{\epsilon_{ra}} \frac{\lambda}{D} \frac{z}{D} \quad (4)$$

式中 ϵ_{ra} 是局部光栅平均介电系数 $(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})/2$ 的实部, ϵ_{rd} 是局部光栅的调制深度 $\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}$ 的实部(式中 ϵ_{r1} 是吸收层的介电系数, ϵ_{r2} 是透光层的介电系数), θ 是 X 射线的入射角, z 是光栅的深度, $D = 2d_r$ 是局部光栅的周期. 光栅归一化深度 ν 定义为

$$\nu = \frac{\pi \epsilon_{rd} z}{2\lambda \cos \theta} \quad (5)$$

当 $Q'\nu \leq 1$ 时, 光栅处于 Raman-Nath 衍射区.

此时光栅倒易矢量 $\mathbf{G} = (2\pi/D) \cdot \mathbf{e}$ (\mathbf{e} 是垂直于点阵平面的单位矢量) 的模较小, 根据 Ewald 理论^[12], 光栅中会产生很多衍射级次, 每个衍射级次的效率与入射角是否满足 Bragg 条件无关. 当 $\Omega \geq 10$, $Q' > 1$ 时, 光栅处于 Bragg 衍射区域, 光栅倒易矢量的模较大, 只能产生 1 级衍射, 且衍射效率完全依赖于 Bragg 条件. 此时只有当掠入射角等于 Bragg 角时, 才能达到理想的衍射效率. 为了提高厚光栅的衍射效率, 往往用倾斜入射或使光栅倾斜一个角度来满足 Bragg 条件. 对于 Laue 透镜, 每个局部光栅的 Bragg 角不一样, 倾斜某一个角度只能对 Laue 透镜中某些位置的局部光栅有效, 因此, 理想的 Laue 透镜聚焦应该是 Laue 透镜中每个局部光栅都倾斜与之相对应的 Bragg 角. 当 Ω, Q' 不满足这两个条件时, 局部光栅的衍射介于 Raman-Nath 和 Bragg 衍射之间, 这时的光栅的衍射行为非常复杂.

工作于不同入射能量的 X 射线或有不同的分辨率要求的 Laue 透镜的结构参量和光学性能会有不同. 一般情况下, Laue 透镜结构中光轴附近区域

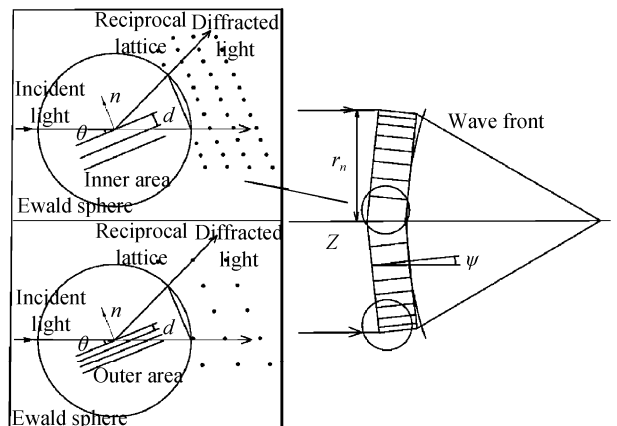


图2 Laue 透镜不同位置局部光栅的衍射特性

Fig. 2 Local grating diffraction characteristics at different positions of Laue Lens

的局部光栅处于 Raman-Nath 衍射区域,最外层部分的局部光栅处于 Bragg 衍射区域,中间部分的局部光栅处于两种衍射的过渡区域.图 2 示出了 Laue 透镜中不同部分局部光栅的衍射特性.

将 Laue 透镜等效为一组局部光栅后,可对每个光栅进行单独分析.一般情况下,材料的复折射率 $n=1-\delta-i\beta$. 对非磁材料,磁导率 $\mu=\mu_0$ 时,材料的电磁场特性是由复介电系数 $\epsilon_r=\epsilon/\epsilon_0=\epsilon'_r-i\epsilon''_r$ 表示,其中实部 $\epsilon'_r=(1-\delta)^2-\beta^2$,虚部 $\epsilon''_r=2(1-\delta)\beta$.

Laue 透镜中每个局部光栅可用周期变化的介电系数来描述, $\epsilon_r(\mathbf{r}+D\mathbf{e})=\epsilon_r(\mathbf{r})$,对光栅的介电系数作傅里叶展开得

$$\epsilon_r(\mathbf{r})=\epsilon'_{na}-i\epsilon''_{na}+(\epsilon'_{nd}-i\epsilon''_{nd})C\sum_{h=1}^{\infty}N_h\sin(h\mathbf{G}\cdot\mathbf{r}) \quad (6)$$

式中 $\epsilon'_{na}-i\epsilon''_{na}$ 是平均介电系数, $\epsilon'_{nd}-i\epsilon''_{nd}$ 是光栅调制深度, N_h 是第 h 级光栅分量的傅里叶系数.

假设平面波 \mathbf{k}_0 入射到局部光栅上,局部光栅内产生的 l 级衍射满足动量守恒定律

$$\mathbf{k}_l=\mathbf{k}_0+l\mathbf{G} \quad (7)$$

耦合波理论认为各个衍射级次的 X 射线在光栅中传播时会发生相互作用,在各个级次的 X 射线间产生能量转移.假设各个级次的 X 射线在局部光栅内的振幅只与穿透深度 z 有关,对入射光 \mathbf{k}_0 的振幅进行归一化,此时局部光栅的边界条件为: $A_0(z=0)=1, A_l(z=0)=0, A_0$ 和 A_l 分别是 0 级和第 l 级次 X 射线的振幅.

根据 Maxwell 方程组和欧姆定律,光栅中的电场 \mathbf{E} 满足的波动方程为

$$\nabla^2\mathbf{E}(\mathbf{r})-\gamma^2\mathbf{E}(\mathbf{r})=0 \quad (8)$$

式中 γ 是复传播常量,其为

$$-\gamma^2=-i\omega\mu_0\sigma+(\omega^2/c^2)\epsilon'_r \quad (9)$$

式中 ω 是入射 X 射线的角频率, $\sigma=\omega\epsilon_0\epsilon''_r$ 是电导率.假设方程(8)的解 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r})=E^0\sum_{l=-\infty}^{\infty}A_l(z)\exp(-i\mathbf{k}_l\cdot\mathbf{r}) \quad (10)$$

式中 E^0 是光栅入射面边界处的电场振幅 $E(z=0)$.式(10)是将光栅内部任一位置的电场 \mathbf{E} 看作一系列平面波的叠加, $A_l(z)$ 是各个平面波的振幅.将式(6)、(10)代入波动方程(8)中,忽略 2 阶导数项,得到关于 $A_l(z)$ 的 1 阶微分方程组

$$\begin{aligned} &[-l(G/k_0)\sin\psi+\cos\theta]\frac{dA_l}{dz}+(\alpha+i\beta_l)A_l+ \\ &\kappa C\sum_{h=-\infty}^{\infty}N_h(A_{l+h}-A_{l-h})=0, l=0, \pm 1, \dots \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\kappa=(k_0/4\epsilon''_{na})(\epsilon'_{nd}-i\epsilon''_{nd})$ 是复耦合常量, $\alpha=1/2k_0\epsilon''_{na}$ 是平均吸收常量, $k_0=(2\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon''_{na}}$ 是波数, $G=|\mathbf{G}|$ 是光栅倒易矢量的模, ψ 是光栅倾斜角(如

图 2), $\beta_l=(k_0^2-k_l^2)/2k_0$ 是代表第 l 级衍射光偏离 Bragg 条件程度的参量.式(11)是 1 组相互关联的微分方程,可描述一系列光波的耦合以及能量在不同级次间的转移.当不同光波之间耦合系数不为 0,相速度近似相等,相互作用的区域长度合理时,能量转移就会发生.

Laue 透镜聚焦常常使用 -1 级次,为此主要考虑 -1 级次的衍射效率 $\eta=A_{-1}(z)A_{-1}^*(z)$.由此可见,Laue 透镜中局部光栅的衍射效率与光栅深度 z 有关.本文理论适用于平面波平行于光轴入射,倾斜入射或者光栅倾斜等各种情况.微分方程组(11)一般没有解析解,需要选用适当的数值算法来求出光栅不同级次衍射效率的数值解.

3 8 keV 处 Laue 透镜的衍射性能分析

现有实验室用检测仪器的 X 射线光源常用 Cu 靶的 $K\alpha$ 线,即能量为 8 keV 的 X 射线^[19].为了能够采用常规实验室 X 射线源进行 Laue 透镜的性能测量,在此主要分析 8 keV 入射 X 射线的 Laue 透镜衍射性能.

Laue 透镜是从中心到边缘由很多周期渐变的局部光栅组成.对于不同位置 r_n 处的局部光栅,周期的差异导致它们的衍射特性明显不同.图 3 给出了周期内每层宽度 d_{r_n} 分别为 5、15、30 nm 的局部光栅(光栅周期 D 分别为 10、30、60 nm) -1 级 X 射线衍射效率随深度 z 的变化.计算时,光栅材料是 WSi_2 和 Si ,入射光能量为 8 keV,图 3(a)是在光栅倾斜 θ 角($\theta=\lambda/(2D)$)满足 Bragg 条件的理想情况(ideal)下计算得到的结果,(b)是在光栅垂直光轴放置,倾角为 0 的情况(zero tilted)下计算得到的结果.

由图 3(a)可以看出,当光栅深度 z 从 0 增加到 30 μm 过程中,3 种周期光栅的 -1 级衍射效率在 0 到 60% 范围内变化. $d_{r_n}=5, 15$ nm 光栅的衍射效率分别可达 58%, 60%. $d_{r_n}=30$ nm 的光栅衍射效率略低.这是因为光栅周期增大后,光栅内将产生更多的衍射级次,根据能量守恒,入射 X 射线的能量将分散到更多的级次上, -1 级衍射光的能量相对要低一些.由图 3(b)可知,由于 X 射线平行于光轴入射,光栅垂直于光轴放置时,衍射偏离 Bragg 条件,3 种周期的光栅衍射效率都降到 30% 以下.在光栅每层宽度 $d_{r_n}=30$ nm 时,衍射的 Bragg 角 $\theta_B=1.28$ mrad,此时,光栅衍射效率开始明显受 Bragg 条件影响.当光栅每层宽度 $d_{r_n}=5$ nm 时,衍射 Bragg 角 $\theta_B=7.7$ mrad,光栅衍射效率完全依赖于

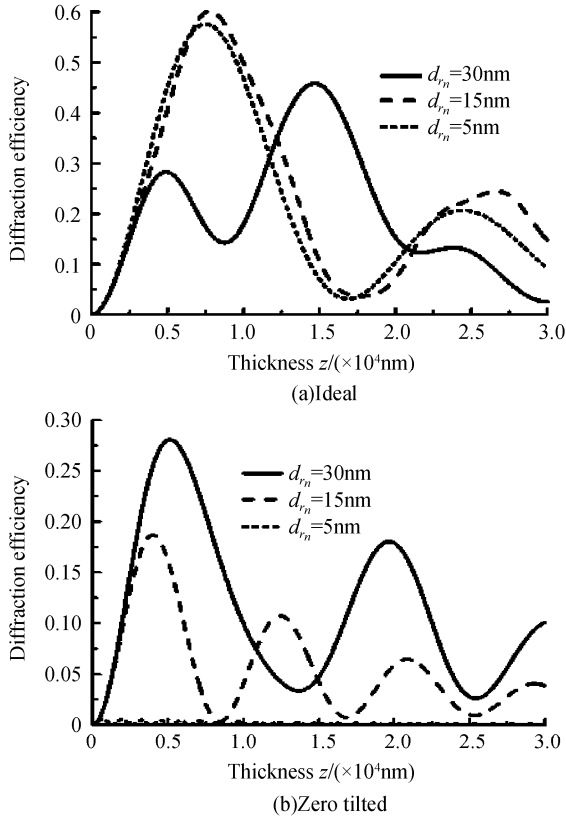


图3 光栅周期为 10、30、60 nm, 入射 X 射线能量为 8 keV 时光栅衍射效率曲线

Fig. 3 Diffraction efficiency curves of gratings for X-ray energy of 8 keV, the grating period is 10 nm, 30 nm, 60 nm, respectively

Bragg 条件, -1 级的衍射效率基本接近于 0. 这一结果也证明了衍射运动学的理论在这种条件下不再适用.

入射 X 射线是实验室常用的 Cu 靶的 $K\alpha$ 线, 能量为 8 keV, 考虑实际制备的难度和 Laue 透镜空间分辨率的需求, 将 Laue 透镜最外层宽度定为 $d_{r_{out}} = 10$ nm, 焦距 $f = 2$ mm, 最外层半径 $r_{out} = 15\,400$ nm, 材料为 WSi_2/Si . 根据不同周期光栅的衍射特性, 研究理想情况(每层都满足 Bragg 条件)下 Laue 透镜不同位置处衍射效率随深度 z 的变化.

图 4 给出了 Laue 透镜结构中不同位置局部光栅的 -1 级衍射效率随深度 z 的变化曲线. $r_n = 2\,000$ nm 时, 局部光栅周期较大, -1 级衍射效率低于 30%; $r_n = 6\,000$ nm 时, 光栅衍射处于过渡区域, 随着深度 z 的变化, 最大衍射效率增加到 48%; r_n 从 8 000 nm 变到 15 400 nm 时, 光栅衍射处于过渡区并向 Bragg 衍射区域过渡, 对应不同周期光栅的衍射效率随深度 z 的变化趋势基本一致. 由图 4 可知, 要保证外层区域的效率达到最大, 并尽量提高整个通光区域所有光栅的效率, 深度 z 应该取在 8 000 nm 左右.

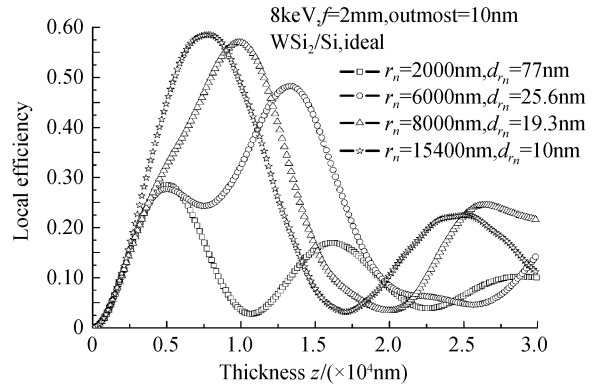


图4 Laue 透镜上不同位置衍射效率曲线

Fig. 4 Diffraction efficiency curves of different positions in Laue Lens

现考虑深度 $z = 8\,500$ nm, 最外层宽度 $d_{r_{out}}$ 分别为 3 nm 和 10 nm, 焦距 f 分别为 0.6 mm 和 2 mm 的两种结构的 Laue 透镜, 图 5 给出了在 Laue 透镜中多层膜不倾斜、多层膜整体倾斜固定角度和 Laue 透镜结构中每层都倾斜不同角度以满足 Bragg 条件的理想情况时, Laue 透镜中局部光栅衍射效率随位置 r_n 的变化曲线. 倾斜固定角度时的倾角分别为 9.83 mrad 和 3.18 mrad.

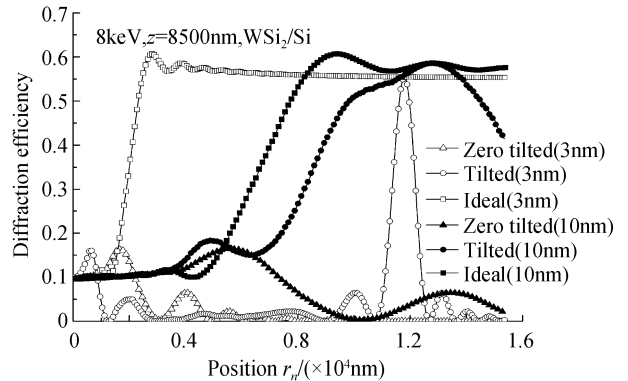


图5 固定深度 z , 衍射效率随位置 r_n 的变化曲线

Fig. 5 Diffraction efficiency varied with position r_n at fitted depth z

由图 5 可知, 所选用 2 种结构的 6 种情况在 $r_n < 1000$ nm 时, 衍射效率与衍射运动学的计算一致, 约为 10%. 对 Laue 透镜中最外层宽度 $d_{r_{out}} = 10$ nm 的情况, $r_n = 6\,000$ nm, 对应 $d_n = 25.6$ nm 时, 不倾斜和理想情况的衍射效率曲线开始分离, 不倾斜的衍射效率逐渐降到 10% 以下而理想的衍射效率逐渐升到 60%, 这说明局部光栅的衍射进入过渡区域, 开始依赖于 Bragg 条件. 此时, 倾斜的 Laue 透镜能较好的逼近理想情况, 只是在最外层, Bragg 衍射区域效率降到 40%. 对 Laue 透镜中最外层宽度 $d_{r_{out}} = 3$ nm 的情况, 不倾斜和理想的效率曲线在 $r_n = 2\,000$ nm, $d_n = 23.1$ nm 时就开始分离. 所以当入射 X 射线波长, Laue 透镜通光孔径和深度确定

后,影响 Laue 透镜中局部光栅衍射特性的因素只是局部光栅周期大小.图 5 中 2 种结构的 Laue 透镜在 d_{r_n} 减小到 23~25 nm 时,局部光栅的衍射都进入过渡区,效率开始依赖于 Bragg 条件.此时,要获得理想的衍射效率,只有采用满足 Bragg 条件倾斜光栅.对于 $d_{r_{out}} = 3$ nm 的 Laue 透镜结构,由于 $r_n > 2\ 000$ nm 时,每层宽度都小于 23 nm, Bragg 角 $\theta_B > 1.67$ mrad,最外层对应的 Bragg 角 $\theta_B = 12.83$ mrad,这样 Laue 透镜整个结构中不同位置局部光栅的 Bragg 角变化范围很大.此时,Laue 透镜倾斜固定角度只能使 Laue 透镜中局部光栅在很小的区域内满足 Bragg 条件,因而,倾斜情况时大部分区域效率仍低于 10%.

将 Laue 透镜通光孔径内所有点局部光栅的衍射效率平均值定义为平均效率.通过平均效率可以更清楚地看出不同结构的 Laue 透镜在不倾斜、倾斜和理想情况时衍射特性的差异,图 6 给出了相应的结果.图 6 计算所用的入射 X 射线能量、Laue 透镜的孔径和深度以及所用材料与图 5 相同,图 6 中的计算点是 Laue 透镜最外层宽度 $d_{r_{out}}$ 分别是 3 nm, 5 nm, 10 nm, 15 nm 和 25 nm 的平均效率.

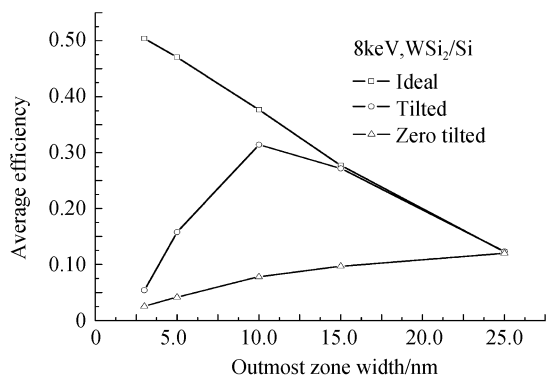


图 6 不同最外层宽度 Laue 透镜的平均效率

Fig. 6 Average efficiency of Laue Lens for different outmost layer thickness

当 $d_{r_{out}} = 25$ nm 时,Laue 透镜不倾斜、倾斜固定角度和理想 Bragg 情况下的平均效率相同.这时,Laue 透镜只有最外层区域局部光栅衍射依赖于 Bragg 条件,不倾斜也可以达到理想的平均效率(适当调整深度 z 还可以提高此时 3 种情况的平均效率). $d_{r_{out}} = 15$ nm 时,不倾斜的 Laue 透镜平均效率下降,倾斜情况可很好的逼近理想情况.随着最外层宽度继续减小,倾斜 Laue 透镜的平均效率也开始下降, $d_{r_{out}} = 3$ nm 时,倾斜 Laue 透镜的平均效率降到 5% 以下.而且由于入射 X 射线对 Bragg 条件的偏离,会使 Laue 透镜出射面不同位置的相位出现很大偏差,导致出射 X 射线在像面上相干相消,使分辨率变差.由计算可知,在理论上倾斜 Laue 透镜

可以将其聚焦 X 射线的光斑大小推进到 15~10 nm 的水平,但当最外层宽度降到 3 nm 以下时,倾斜固定角度的 Laue 透镜无法实现对硬 X 射线的有效聚焦.因此,需要设计新的 Laue 透镜结构使得其每一层都倾斜不同角度以满足 Bragg 条件^[20].

4 结论

理论上,在平面基底上镀制周期渐变多层膜,再通过切片和抛光制备的 Laue 透镜可以实现任意高宽比,显著提高其对硬 X 射线的聚焦效率.本文利用耦合波理论计算了 WSi₂/Si 材料组合的 1 维 Laue 透镜 X 射线衍射效率,证明了在硬 X 射线波段,Laue 透镜中波带片结构高宽比的增大导致衍射运动学方法不再适用于 X 射线在 Laue 透镜中的传播,而需要用衍射动力学来计算.计算得到用 Cu 的 K α 线作光源时,最外层宽度为 10 nm,深度为 8 500 nm,材料为 WSi₂/Si 的倾斜 Laue 透镜,外层区域局部光栅的衍射效率可达 59%,这种 Laue 透镜将是今后用于硬 X 射线聚焦和成像的有效手段.

参考文献

- [1] SCHROER C G, KURAPOVA O, PATOMMEL J, *et al.* Hard X-ray nanoprobe based on refractive X-ray lenses [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **87**(124103): 1-3.
- [2] GU Chun-shi, WANG Zhan-shan, MU Bao-zhong, *et al.* Imaging research with non-periodic multilayers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 881-885.
顾春时,王占山,穆宝忠,等.基于非周期多层膜的 X 射线成像研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6): 881-885.
- [3] JARRE A, FUHSE C, OLLINGER C, *et al.* Two-dimensional hard X-Ray beam compression by combined focusing and waveguide optics [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **94**(074801): 1-4.
- [4] CHAO Wei-lun, ANDERSON Erik H, FISCHER Peter, *et al.* Towards sub-10 nm resolution zone plates using the overlay nanofabrication processes [C]. *SPIE*, 2008, **6883**(688309): 1-8.
- [5] KANG H C, MASER J, STEPHENSON G B, *et al.* Nanometer linear focusing of hard X rays by a multilayer laue lens [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **96**(127401): 1-4.
- [6] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 461.
- [7] TAMURA S, YASUMOTO M, KAMIJIO N, *et al.* Development of a multilayer Fresnel zone plate for high-energy synchrotron radiation X-rays by DC sputtering deposition [J]. *J Synchrotron Rad*, 2002, **9**(3): 154-159.
- [8] KAMIJIO N, SUZUKI Y, TAKANO H, *et al.* Microbeam of 100 keV x ray with a sputtered-sliced Fresnel zone plate [J]. *Rev Sci Instrum*, 2003, **74**(12): 5101-5104.
- [9] QIN Jun-ling, SHAO Jian-da, YI Kui, *et al.* Interface roughness, surface roughness and soft X-ray reflectivity of Mo/Si multilayers with different layer number [J]. *Chin Opt Lett*, 2007, **5**(5): 301-303.

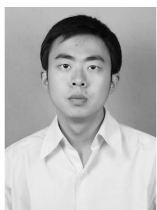
- [10] ATTWOOD D T. Soft X-Rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 337.
- [11] KIRZ J. Phase zone plates for x rays and the extreme uv[J]. *JOSA*, 1974, **64**(3): 301-309.
- [12] MAI Zheng-hong. X-ray characterization of thin film structure [M]. Beijing: Science Press, 2007.
麦振洪. 薄膜结构 X 射线表征[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] SANG Tian, WANG Zhan-shan, WU Yong-gang, *et al.* Reflected properties analysis of thin-film waveguide-grating filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1461-1465.
桑田, 王占山, 吴永刚, 等. 薄膜波导光栅滤光片反射特性研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(10): 1461-1465.
- [14] SANG Tian, WANG Zhan-shan, WU Yong-gang, *et al.* Research on guide-mode resonance for sub-wavelength dielectric grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 641-645.
桑田, 王占山, 吴永刚, 等. 亚波长介质光栅导模共振研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(5): 641-645.
- [15] SOLYMAR L, COOKE D J. Volume holography and volume gratings[M]. New York: Academic Press, 1981.
- [16] MOHARAM M G, GAYLORD T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. *JOSA*, 1981, **71**(7): 811-818.
- [17] MASER J, SCHMAHL G. Coupled wave description of the diffraction by zone plates with high aspect ratios[J]. *Opt Commun*, 1992, **89**(2,3,4): 355-362.
- [18] KOPYLOV Y V, POPOV A V, VINOGRADOV A V. Application of the parabolic wave equation to X-ray diffraction optics[J]. *Opt Commun*, 1995, **118**(5-6): 619-636.
- [19] LI Cun-xia, WANG Zhan-shan, WANG Feng-li, *et al.* Design and fabrication of high reflection multilayer for the wavelength range 50 ~ 110 nm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1862-1866.
李存霞, 王占山, 王凤丽, 等. 50~110 nm 波段高反射率多层膜的设计与制备[J]. 光子学报, 2007, **36**(10): 1862-1866.
- [20] YAN Han-fei, MASER J, MACRANDER A T, *et al.* Takagi-taupin description of X-ray dynamical diffraction from diffractive optics with large numerical aperture[J]. *Phys Rev B*, 2007, **76**(115438): 1-13.

Diffraction Efficiency of Multilayer-Based Laue Lens for Hard X-ray Focusing

HUANG Qiu-shi, LI Hao-chuan, ZHU Jing-tao, SANG Tian, WANG Zhan-shan, CHEN Ling-yan
(*Institute of Precision Optical Engineering (IPOE), Physics Department, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: The transmission of X-ray in Laue Lens is analyzed by the coupled wave theory. The diffraction efficiency of multilayer Laue Lens is calculated using Cu $K\alpha$ line as the X-ray source. For the WSi_2/Si multilayer Laue Lens with the outmost layer width of 10 nm, and the depth of 8 500 nm, the diffraction efficiency of the local gratings in the outer area reaches 59% in the case of tilted. Multilayer Laue Lens is proved to be an effective focusing method theoretically.

Key words: X-ray optics; Multilayer; Coupled wave theory; Efficiency; Tilt



HUANG Qiu-shi was born in 1985. He is a graduate student at Tongji University, and his research interests focus on multilayer technology based X-ray micro-focus optics.