

超高密度(10^5 l/mm)软 X 射线透射式 闪耀光栅的新设想

黎 刚 崔明启

(中国科学院高能所同步辐射室, 北京 100039)

摘 要 首次提出了用磁控溅射方法制备光栅常数 d 在 10 nm 量级的透射式闪耀光栅的新方法的设想, 并以基于层间界面全反射的透射式闪耀光栅为模型讨论了该光栅的性能。给出了两个在“水窗口”波段的设计实例, 理论计算结果: 角色散率为 $5.7^\circ/\text{nm}$; $\lambda/\Delta\lambda \approx 10^4$ 。另一个有益的结果是作者发现 LiF、LiBO₂ 等锂化物在“水窗口”波段有很高的透过率, 这在应用上很有意义。

关键词 磁控溅射, 透射式闪耀光栅, 软 X 射线。

1 引 言

软 X 射线光栅按入射角分类有掠入射光栅和非掠入射光栅两种。前者使用很不方便, 后者效率仍太低。更糟糕的是由于 d 值仅能达到亚微米量级而软 X 波段又缺少有效的长焦距成像元件, 因此使得高分辨率单色器都不得不做得很大, 例如美国 ALS 的 U8/10 Undulator Beamline 的光栅距离出射狭缝有 $6.5 \text{ m}^{[4]}$, 使整条光束线被迫拉得很长。本文提出了另一种新的光栅制备方法——用磁控溅射方法制备光栅常数 d 在 10 nm 量级基于层间界面全反射的透射式闪耀光栅, 它使得光栅的制备彻底突破了传统方法在提高光栅角色散能力上遇到的限制, 使 d 值可达到软 X 光的衍射极限; 并可以方便的改变 d 值, 以便制备各个波段最适宜的光栅及这周期的光栅。文中讨论了全反射入射时本光栅的物理模型——闪耀角为 90° 的透射式闪耀光栅——并用该模型计算了这种光栅的主要性能。最后给出了两个有趣的在“水窗口”的例子。其角色散率为 $5.7^\circ/\text{nm}$; 能量分辨率 $\lambda/\Delta\lambda \approx 10^4$ 。另一个有益的结果是作者发现 LiF、Li₂CO₃、LiBH₄、LiBO₂、LiH、Li₂O、Li₂NH、LiAlO₂、Li₃Na₃(AlF₆)₂、等锂化物在“水窗口”波段有很高的透过率, 这不仅使得由它们制成的软 X 射线透射式闪耀光栅的效率可以高达 40% 以上, 而且为软 X 光多层膜反射镜的制备提供了一类新的理想的间隔层 (spacer) 材料。与最近发展起来的刻蚀多层膜光栅 (Etched Lamellar Multilayer Grating) 相比^[3, 5, 7], 本方法不存在由于二维光栅的共同衍射而导致的提高效率与提高色散能力间的矛盾。多层膜闪耀光栅 (Blazed Multilayer Grating) 相比本方法没有闪耀槽深度误差这个在短波长时很严重的问题。总之, 本方法的最大优点在于可以获得空前高的非掠入射的角色散能力, 而且衍射效率较高。

2 制备方法

由于分子束外延、磁控溅射等制备一维周期性微结构方法的进展提供了一种制备光栅常数 d 可达纳米量级从而其性能有突破性提高的新一代光栅的技术基础。用这种方法制备光栅的过程如下:

1) 基底的抛光和清洗。基底的表面粗糙度应小于 0.5 nm 。

2) 镀多层膜。在基底上用磁控溅射法交替镀两种光学常数不同的介质, 制成一个纳米多层膜系。这种多层膜的两种材料都有较高的透过率, 而且这种多层膜的周期数特别多, 一般达 10^4 以上。

3) 把多层膜制备成薄片。对制备透射式软 X 射线光栅而言, 片厚在微米量级, 最适宜的方法也许是光刻加离子束刻蚀, 但通常的方法是制备透射电镜样品的研磨抛光减薄及离子轰击减薄等方法的综合适用。

4) 把薄片固定在支架上。

整个过程如图 1 所示。

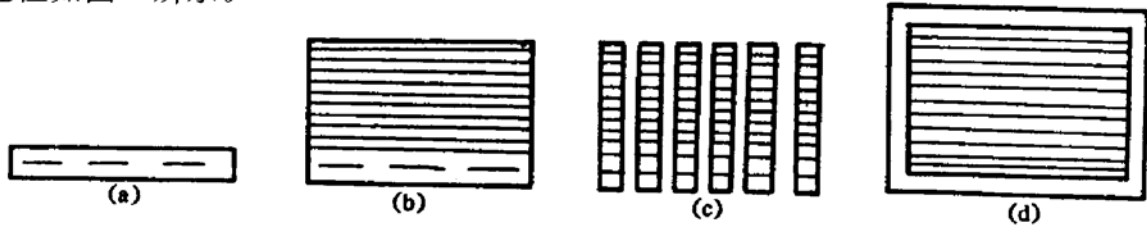


Fig. 1 Fabrication process of a transmission-blazed grating

(a) clean silicon or K9 glass wafer, (b) sputter deposit of the multilayer structure, (c) etching the multilayer into a slice, (d) fix the grating on support

3 理论模型

用上述方法制备的光栅随着入射角的变化要用不同的模型来解释, 大致可以分为全反射角入射和布拉格(Bragg)角入射两种情况。由于后者较为复杂且效率较低, 在此仅讨论全反射角入射时的情况。光栅具体参数如图 2 所示。设两种介质的光学常数分别为 $n_1 = 1 - \sigma_1 - ik_1$ 和 $n_2 = 1 - \sigma_2 - ik_2$, 厚度分别为 d_1 和 d_2 , 光栅的周期厚度为 $d = d_1 + d_2$, 透过率分别为 $T_1(L, \lambda)$ 和 $T_2(L, \lambda)$, 光栅的宽度为 L , 光栅的周期数为 N 。图 2 中的光栅周期厚度被放大了很多倍, 实际上 d/L 大致在 0.01 量级。由图 2 可知, 当入射光以全反射角 θ_{oc} 入射时, 光栅透光层类似于二维光纤。对衍射角为 θ_k 的第 k 级衍射光而言相邻周期对应点上的出射光间的光程差 ΔL 为:

$$\Delta L = n_0 d [\sin(\theta_{oc}) + \sin(\theta_k)] \quad (1)$$

其中的全反射临界角 θ_{oc} 等于:

$$\theta_{oc} = \pi/2 - \arcsin(n_2/n_0) \approx \arcsin[(2\sigma_2)^{1/2}] \quad (2)$$

这时的光栅方程为:

$$\sin(\theta_k) + \sin(\theta_{oc}) = k\lambda/n_0 d \quad (3)$$

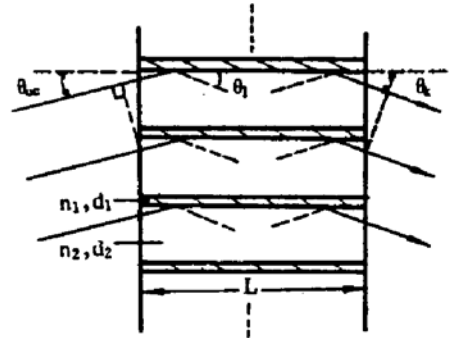


Fig. 2 Schematic diagram of a transmission-blazed grating

其中 k 为衍射光的级次, θ_k 为第 k 级出射光的衍射角。闪耀级的衍射角 θ_{bk} 等于反射光的出射角 θ_{oc} , 代入(3)式可得:

$$\sin(\theta_{bk}) = \sin(\theta_{oc}) = k\lambda/2n_0d = (2\sigma_2)^{1/2} \quad (4)$$

上式只当入射角为全反射临界角时才适用。对给定的光栅介质, 选择不同的 λ/d 值, 可使不同的衍射级得到闪耀加强。光栅单周期衍射的零级主极强(即几何反射光)正好落在 λ_{kb} 光波的第 k 级谱线上, 又由于这种光栅几乎没有遮光部分, 所以 λ_{kb} 光谱的其他级(包括零级)都落在单元衍射的暗线位置, 形成缺级。这样使波长为 λ_{kb} 的出射光的能量 90% 以上都集中到 λ_{kb} 光的第 k 级谱线上, 使其强度大大加强。虽然 λ_{kb} 光的闪耀方向不可能严格的同时又是其他波长的闪耀方向, 但由于全反射峰有一定的角宽度, 它可以容纳 λ_{kb} 附近一定波段内其他波长的第 k 级谱线, 使它们也有较大的强度, 同时这些波长的其他级谱线也都很弱。

有一个量必须给予特别考虑, 即入射光在穿过光栅时被反射的次数 J 。当 J 为奇数时出射光间的光程差如(1)式所示; J 为偶数时出射光间的光程差为零。可以通过入射角的微小变动来改变 J 值, J 的表达式为:

$$J = [(L - \zeta/\text{tg } \theta_1)/(d_2/\text{tg } \theta_1)] + 1 = [(L \text{tg } \theta_1 - \zeta)/d_2] + 1 \quad (5)$$

其中 $\zeta(\zeta \in [0, d_2])$ 、 θ_1 的含义见图 3, $[\]$ 是取整算符。 θ_1 可由斯涅耳折射定律求得: $\theta_1 = \pi/2 - \arcsin(n_0 \sin \theta_0/n_1)$ 由于在软 X 光波段全反射的临界角一般有几度, 在此范围内的反射率都较高, 所以可以在此范围内改变入射角, 调整 J 值而不降低光栅的衍射效率。由(5)式知, 对 ζ 取不同值的同一周期上的入射光线其 J 值可能是奇数也可能是偶数。每一周期上能产生位相差的光占该周期上总入射光的百分比(定义为 P) 对光栅的效率很重要的。由于各周期对入射光是等价的, 所以只要考虑一个周期上的情况即可。无论 L, d, θ_1 取何值, 总有下式成立, 即:

$$(L/d) \text{tg}(\theta_1) = m + \delta \quad (6)$$

其中 m 是 $(L/d) \text{tg}(\theta_1)$ 的整数部分, δ 是其小数部分。令 $\varepsilon = \delta - \zeta/d$, 则当 $\varepsilon \geq 0$ 时, $J = m + 1$; 当 $\varepsilon < 0$ 时 $J = m$ 。即 $\zeta = \delta d$ 是个关键点。可以得到结论: m 为奇数时, $p = 1 - \delta$; m 为偶数时, $p = \delta$ 。给出光栅衍射的绝对效率 η 的具体表达式是困难的, 但这里能给出下式

$$\eta = PRT\eta' \quad (7)$$

η' 为相对效率, $R = R_0'$ 为光栅的等反射率, R_0 为界面的单次全反射率, R_0 一般在 95% 以上, J 一般只有 3、4 次, 所以 R 在 80% 左右。 T 为透过率, 在后面给出了几个结果, 它对波长的依赖很明显, η/η' 可以理解为有效透过率。

与多层膜相比, 光栅之所以有很高的能量分辨是因为它提供了很多周期性结构从位相上把入射光的波前分割成很多相干的次波源参与多光束干涉。这一点在以布拉格角入射时看得更加明显。本文讨论的光栅的特殊在于其闪耀角为 90° 。一般意义的闪耀角是衍射单元的法线方向与光栅平面(衍射单元周期性排列所在的平面)法线方向所成的角度。

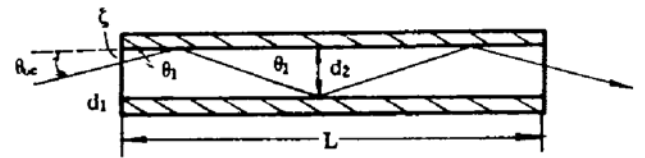


Fig. 3 Schematic diagram of the optics path in a period of the transmission-blazed grating

4 两个例子

“水窗口”是软 X 光学中应用前景最诱人的波段，因而一直是人们感兴趣的课题之一。作者在寻找该波段透射光栅材料时，首次发现 Li 及其一系列化合物在该波段有很高的透过率，不仅是制备该波段光栅的理想材料，也是多层膜反射镜在该波段适宜的间隔层。具体结果如图 4、图 5 所示。在这些材料中，LiF、Li₂O、LiBO₂、LiBH₄、Li₂CO₃、Li₂NH、LiAlO₂ 等最有价值，因为它们在空中稳定，不潮解，熔点高(熔高分别为：LiF, 845 °C, 白色立方晶体；Li₂CO₃, 733 °C, 白色单斜结晶；LiAlO₂, 熔点大于 1625 °C, 白色粉末；Li₂O, 熔点大于 1700 °C, 白色单斜结晶。)这里仅能给出透过率的理论计算结果，作者将进行实测工作。

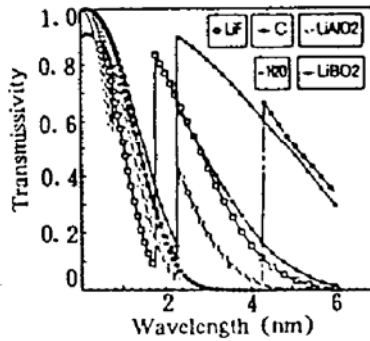


Fig. 4 Calculated transmissivity curve of LiF, LiAlO₂ and LiBO₂ in the water window. All layer thickness are 1 μm^[9]

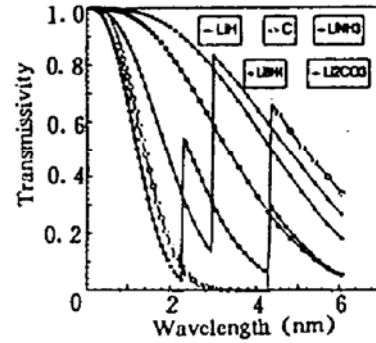


Fig. 5 Calculated transmissivity curve of LiH, LiNH₃, LiCO₃ and LiBH₄ in the water window. All layer thickness are 1 μm^[9]

下面给出两个有趣的例子。

4.1 例 1

闪耀波长为 $\lambda_b = 2.5$ nm, 光栅材料为 LiF/W, $\theta_{oc} = 6.2^\circ$, 设计参数: $d = 4\lambda_b = 10$ nm, $N = 10^3 \sim 10^4$, $L = 1$ μm, 理论性能: $K = [0.86] = 1$; $J = 11$; $p = 86\%$, 自由光谱范围: 1.2 nm, 等效反射率: $R = R_0^1 = (0.95)^{11} = 0.57$, 角色散率: $D_\theta = K/d \cos(\theta_s) = 0.1$ rad/nm = 5.7 °/nm, 能量分辨率: $\lambda/\Delta\lambda = K * N > 10^3 \sim 10^4$ 。

上例只是给出了入射角的上限, 实际可选择更小的入射角, 例如 $\theta_c = 1.5^\circ$, 则 $J = 3$, $R = 0.86$ 。可以获得较高的效率。

4.2 例 2

闪耀波长: $\lambda_b = 2.5$ nm, 光栅材料: LiBO₂/LiAlO₂, $\theta_{oc} = 3.3^\circ$, 设计参数: $d = 10\lambda_b = 25$ nm, $N = 10^3 \sim 10^4$, $L = 1$ μm, 取 $\theta_0 = 1.5^\circ$, 理论性能: $K = 1$; $J = 1$; $p = 96\%$, 自由光谱范围: 1.2 nm, 角色散率: $D_\theta = 0.04$ rad/nm = 2.29 °/nm, 能量分辨率: $\lambda/\Delta\lambda = K * N > 10^3 \sim 10^4$, 等效反射率: $R = R_0^1 = 0.95$ 。

由于反射峰的宽度有限, 透过率与波长有关, 所以效率对波长的依赖很明显, 由于相对效率易于得到, 在此仅想给出有效透过率(η'/η)结果如图 6 所示, 以便突出 P 、 R 、 T 的影响。

结 论 从上面的讨论可知: 本方法与全息法和刻划法相比有几个优点:

1) 可以彻底突破传统方法在提高光栅周期密度方面的限制, 使 d 值接近软 X 光的衍射极限, 达到 nm 量级, 这对短波长光学很有意义。机械刻划方法由于其方法的限制, d 值只能在微米量级; 全息法所能达到的最小 d 值为 $\lambda/2$, λ 为曝光用相干光的波长。由于短波长激光器的缺乏, 使全息法光栅 d 在 200 nm 以上。本方法可使 d 减小两个量级。从而使角色散能力 D_θ 提高两个量级。这在至今仍没有有效长焦距成像系统的软 X 射线波段将十分有利。此外, 小截面入射光非掠入射时亦可获得较高的能量分辨率。由于 d 值可以方便的改变因此本方法

特别适宜制备变周期光栅。

2) 可以获得较高的光谱效率。它集中了闪耀光栅相对效率高的最大优点和全反射元件的高反射率的特点, 从而可能得到较高的光谱效率。但它又不存在掠入射光栅应用上的不便。提高效率的困难在于介质的吸收, 幸运的是如前所述可利用吸收边附近的高透过率。

3) 提高能量分辨率无原则困难。

4) 误差较小。不存在多层膜闪耀光栅的槽型深度误差。本方法误差来源主要是膜厚的漂移。对 BSRF Lab 的多靶磁探测射装置的测定表明其膜厚漂移小于 2~3%。可以满足光栅制备的需要。

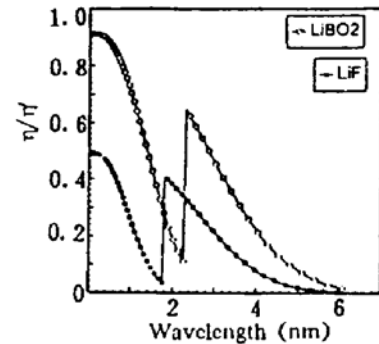


Fig. 6 Calculated (according to formula 7) effective transmissivity (η/η') curve of the grating (space material is LiF and LiBO₂) in the water windows. All grating thickness is $1 \mu\text{m}$ ^[9]

参 考 文 献

- [1] 谢建平, 明海, 近代光学基础. 合肥, 中国科技大学出版社, 19 : 131~137
- [2] 赵凯华, 钟锡华, 光学. 下册, 北京, 北京大学出版社, 第四章
- [3] H. Berrouane, J.-M. Andre, R. Barchewitz *et al.*, Experimental and theoretical performances of an etched lamellar multilayer grating in the 1 keV region. *Instrum. & Methods in Phys. Res.*, 1992, **A312**: 521~530
- [4] Center for X-ray Optics 1992, Materials Sciences Division Lawrence Berkeley Laboratory University of California Berkeley, California 94720
- [5] J.-M. Andre, A. Sammar, C. Kahn Melek *et al.*, Multilayer gratings for the soft X-ray region. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(1): 1399~1403
- [6] Hans Lochbihler, Peter Predehl, Characterization of X-ray transmission gratings. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(7): 964~971
- [7] J.-M. Andre, S. Bac, R. Barchewitz *et al.*, Performances of etched laminar multilayer gratings in the soft X-ray region. *J. Modern Opt.*, 1992, **39**(8): 1681~1694
- [8] A. Ridgeley, Normal incidence spectrometers for the extreme ultraviolet using blazed multilayer coated diffraction gratings. *Opt. Comm.*, 1992, 177~182
- [9] Mark Thomas, Optical constants Grapher. Ver 2.0, 1990, Center for X-ray Optics, Lawrence Berkeley Lab.

A New Design of Soft X-Ray Transmission-Blazed Grating with Ultrahigh Density (10^5 l/mm)

Li Gang Cui Mingqi

(Synchrotron Radiation Laboratory, Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

(Received 28 June 1994; revised 20 October 1994)

Abstract A new method of fabricating transmission-blazed grating with period's thickness of 10 nm or below by magnetron sputtering is proposed for the first time. The transmission-blazed grating model based on total reflection by inner interfaces is presented. Two examples of this grating used in water window are given, for example, angular dispersivie power $D_\theta \approx 5.7 \text{ deg./nm}$; energy resolution $\lambda/\Delta\lambda \approx 10^4$. LiF and LiBO₂ etc. with high transmissivty are considered suitable for the grating' spacer material. Possible applications are discussed.

Key words magnetron sputtering, transmission-blazed grating, soft X-ray.