第 46 卷 第 5 期 1997 年 5 月
1000-3290/97/46(5)/1015-07

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 46, No. 5, May, 1997
©1997 Chin. Phys. Soc.

软 X 射线多层膜单色器能量分辨研究*

崔明启 缪建伟[1)] 王 俊 崔聪悟 黎 刚 朱佩平

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

1) (Physics Department, State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, New York 11794-3800, USA)

(1996 年 9 月 17 日收到)

从理论上分析了影响软 X 射线多层膜单色器能量分辨率的机制,给出了一种既能提高多层膜能量分辨率又不影响其反射率的膜材选择规则.并给出近年来在北京同步辐射装置上开展多层膜单色器应用研究的结果.

PACC: 7865; 6865

1 引 言

随着高科学技术和边缘学科的快速发展,软 X 射线(一般定义为 1—20 nm)在光学、材料、生物、天文、微电子学、激光等离子体诊断及同步辐射应用等方面越来越显示出巨大的应用前景.为此,各发达国家相继开展了软 X 射线光学元件方面的研究,软 X 射线光学多层膜是其主要研究内容之一.它可以作为色散元件对软 X 射线进行分光,并可使软 X 射线像可见光一样进行反射、聚焦、成像等[1].作为色散元件,多层膜比光栅和菲涅耳波带片(Fresnel zone plate)具有更高的反(衍)射效率,最高已达 60 % 以上[2].其致命弱点是能量分辨($\lambda/\Delta\lambda$ 或 $E/\Delta E$)较差.本文重点从理论上对多层膜能量分辨本领进行了探讨,并给出近年来在北京同步辐射装置软 X 射线反射率计[3]上用多层膜作为软 X 射线单色器应用研究的结果.

2 影响多层膜能量分辨率的理论分析

光学常数是入射光子与物质相互作用的一个宏观反映.在软 X 射线波段任何物质的折射率小于或等于 1,并且都有吸收,其折射率是以复数形式表示的复折射率,

$$N = n + ik, \tag{1}$$

其中 n 为折射率,一般定义 $n = 1 - \delta$; k 为消光系数,表征物质对光子的吸收.

图 1 给出的是周期多层膜结构示意图,引进的是平面平行板模型.交替膜层的厚度分别为 d_1 和 d_2,周期厚度为 $d(= d_1 + d_2)$,单个周期称为周期单胞,交替层和衬底的复折射率分别为 $N_1 = 1 - \delta_1 + ik_1$, $N_2 = 1 - \delta_2 + ik_2$, $N_0 = 1 - \delta_0 + ik_0$.要精确求得多层膜能量

* 国家自然科学基金资助的课题.

分辨率的解析式是相当困难的,因此我们在分析中考虑交替材料层为无吸收和吸收较大两个极端情况.我们的目的是确定影响多层膜能量分辨率的因素,这种考虑不会影响分析结果.

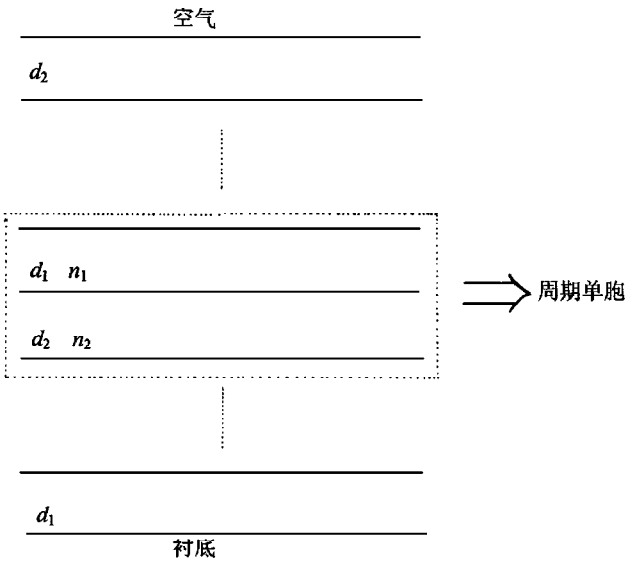


图 1 多层膜结构示意图

2.1 无吸收情况

把 X 射线动力学理论的达尔文公式应用于图 1 所示模型中,可以得到迭代公式[4]

$$R = I/I_0 = |iS/(i\varepsilon + \sigma) \pm [(i\varepsilon + \sigma)^2 + S^2]^{1/2}|^2, \tag{2}$$

$$S = \pm \lambda |r_c| /2\pi d\cos\theta, \tag{2a}$$

$$\varepsilon = \pm \theta - \theta_0, \tag{2b}$$

其中 R 为多层膜的反射率,I_0 为入射光强,I 为反射光强,λ 为入射波长,r_c 为每一周期单胞的振幅反射系数,σ 为每一周期单胞的振幅衰减系数,θ 为入射光的掠入射角,θ_0 为布喇格角.

对一个周期单胞

$$r_c = \pm r_{12} + r_{21}\exp(\pm i\beta d_1), \tag{3}$$

$$\beta = 4\pi(N_1^2 - \cos^2\theta)^{1/2}, \tag{3a}$$

其中 r_{12} 是介质 N_1 对介质 N_2 的菲涅耳界面反射系数,r_{21} 是介质 N_2 对介质 N_1 的菲涅耳界面反射系数.

对无吸收情况,$\sigma = 0$,(2)式可以写成

$$R = |iS/i\varepsilon \pm (S^2 - \varepsilon^2)^{1/2}|^2, \tag{4}$$

因而可以得到反射率曲线的半角宽度为

$$\Delta\theta = 2|S| = \lambda |r_c| /\pi d\cos\theta. \tag{5}$$

把布喇格方程和(2),(2a) 式代入方程(5)

$$\Delta\theta = (2\,|\,\delta_1 - \delta_2|\,/\,\pi S\cos(2\theta))\,P(\theta)\,|1 - \exp(-i\beta d_1)|, \tag{6}$$

式中　$P(\theta) = -1$ 时,为 s 偏振;$P(\theta) = \cos 2\theta$ 时,为 p 偏振.因而在无吸收情况下的多层膜能量分辨率表达式为

$$\Delta\lambda/\lambda = \Delta\theta\cot\theta = (|\,\delta_1 - \delta_2|\,/\pi S\cos^2\theta)\,P(\theta)\,|1 - \exp(-i\beta d_1)|. \tag{7}$$

2.2　吸收较大情况

由于交替材料层的吸收较大,运用 X 射线运动学理论可以得到入射光强的衰减公式

$$I = I_0\exp(-\mu N d/\sin\theta), \tag{8}$$

$$\mu = 4\pi k/\lambda, \tag{8a}$$

$$k = (k_1 d_1 + k_2 d_2)/d, \tag{8b}$$

其中 I_0 为入射光强,I 为入射光穿透过 N 个周期后的光强,N 为多层膜周期数,μ 为线吸收系数,k 为平均消光因子.由于吸收较大,在考虑入射光经过 N 个周期以后的光强可以忽略的情况下,可得到多层膜的有效周期数表达式

$$N_e = \lambda\sin\theta/4\pi kd = \sin^2\theta/2\pi k. \tag{9}$$

根据瑞利判据

$$(2\pi Nd/\lambda)\cos(\theta)\Delta\theta = \pi, \tag{10}$$

把方程(9)代入(8)式,可得到反射率曲线的半角宽度为

$$\Delta\theta = 2\pi k/\sin\theta\cos\theta. \tag{11}$$

因而在吸收较大情况下多层膜的能量分辨率公式为

$$\Delta\lambda/\lambda = 2\pi k/\sin^2\theta. \tag{12}$$

根据上述两个极端情况分析得到的能量分辨率公式(7)和(12),可以看到,多层膜的能量分辨率主要与以下三个因素有关:1)掠入射角 θ,$(\Delta\lambda/\lambda)\propto 1/\sin^2\theta$;2)两材料的平均消光系数 k,$(\Delta\lambda/\lambda)\propto k$;3)两材料的衬度 $|\delta_1 - \delta_2|$,$(\Delta\lambda/\lambda)\propto|\delta_1 - \delta_2|$.据此,可以得到提高多层膜能量分辨率的一些规则:

a) 掠入射角越大,能量分辨越高,在其他条件相同情况下,正入射会使多层膜能量分辨率最高.

b) 两材料的消光系数越小越好,一般而言,在一种材料的吸收边下,它的消光系数比较小,对给定的多层膜的设计波长,最好选择这波长附近有吸收边的两种材料作交替层.

c) 两种材料的衬度 $|\delta_1 - \delta_2|$ 必须适当选择,$|\delta_1 - \delta_2|$ 的值越大,则多层膜能量分辨越差.另一方面多层膜每一界面的菲涅耳反射系数可近似表示为

$$r = ((|\,\delta_1 - \delta_2| + i\,|\,k_1 - k_2|)/2\sin^2\theta)\;P(\theta). \tag{13}$$

因此常规多层膜选材方法总希望两材料衬度越大越好,这主要是为了提高多层膜的反射率.我们的观点是 $|\delta_1 - \delta_2|$ 必须选择适当,既不能太大,也不能太小.在设计中,我们采用迭代优选方法得到最佳 $5|\delta_1 - \delta_2|$ 值.

d) 由于 $(\Delta\lambda/\lambda)\propto k$,而 $k = (k_1 d_1 + k_2 d_2)/d$,所以交替层的层厚度比 $\Gamma(= d_1/d_2)$ 也必须适当选择.事实上,层厚度比 Γ 不仅影响多层膜能量分辨率,而且也影响其反射

率,也要经过优选确定.另外周期厚度 d 的涨落(Δd)也是影响能量分辨的关键所在.

图 2 是根据以上规则进行膜系设计的一个实例,给出的是 Ti/C 多层膜在正入射时的反射率曲线,入射波长为 $\lambda=4.37$ nm,Ti 和 C 均在此附近有一吸收边,Ti 和 C 的光学常数($n-ik$)分别为(0.9945 − i0.001 303)和(1.000 143 − i0.000 142 6)[5],交替层厚度比 $d_{Ti}/d_C=0.83/1.36$(nm),周期数为 300,得到的理论反射率为 47.3%,能量分辨为 $\lambda/\Delta\lambda=224$.

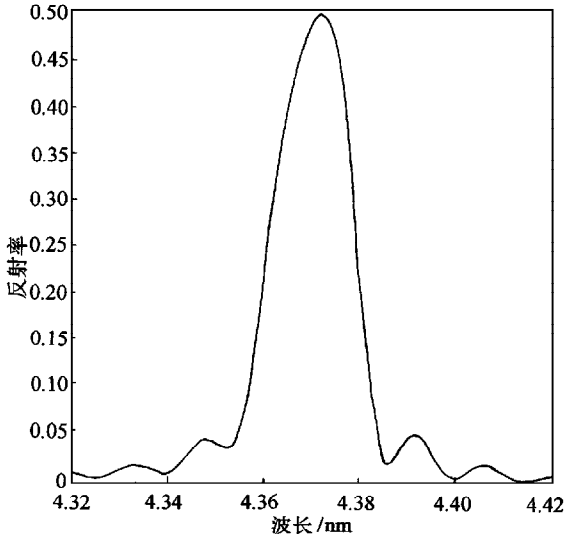


图 2 Ti/C 多层膜的理论反射率曲线($\lambda=4.37$ nm)

3 同步辐射装置多层膜单色器能量分辨研究

3.1 测量装置简介

北京同步辐射装置的 3B1 光束线上建造了一套软 X 射线反射率计装置,由柱面反射镜、单色器、随动摇臂、样品台、探测器及数据获取系统等组成.我们选择软 X 射线光学多层膜作为该装置单色器的波长色散元件,多层膜由轻、重元素材料交替镀制而成,它相当于一维人工"晶体",完全遵循 Bragg 规律,即 $n\lambda=2d\sin\theta$(其中 n 为衍射级次,λ 为单色器出射波长(能量的函数),d 为多层膜周期厚度,θ 为单色器 Bragg 入射角度).在 d 值已知(可根据不同能量设计不同 d 值),只要改变单色器入射角度,即可获得相应的能量输出.探测器是经改造的 GaAsP 光电二极管(G1127, HAMAMATUS, Japan),在软 X 射线能区响应范围很宽.实验中选用三种能量范围的多层膜单色器,第一种是 Mo/Si,能量范围是 0.062—0.1 keV,第二种是 Mo/C,能量范围是 0.1—0.30 keV,第三种是利用磁控溅射方法自制的 W/Si 多层膜,能区在 0.5—1.2 keV.在这三个能区范围内分别选择了 Al,C 和 Cu 三种材料作为单色器前的滤光片和透射样品.测量中,储存环弯转磁铁

出射的同步辐射光掠入射经柱面反射镜后，3 keV 以上能量全部被切掉，3 keV 以下白光经滤光片(这时紫外及可见光也被挡住)入射到多层膜单色器上，驱动单色器扫描(扫描范围为 3°—70°,角分辨为 0.007 5°),出射的单色光的信号直接或经过反、透射样品由探测器接收，经弱电流放大器(6512, KEITHLEY, USA)、数字电压表或 A/D 转换送至计算机.

3.2　实验与结果

用两种方法对多层膜单色器出射能量及能量分辨率进行了测量分析.

1) *吸收边法*　多层膜单色器前后光路上均置入相同材料的滤光片,在单色器扫描的同时探测器作 2θ 转动，从而得到后滤光片在不同能量时的透射强度信号 I，然后退出样品，测量一组 I_0 信号，透射率 $T=I/I_0$，进而得到该样品在某一段能量范围的透射谱.根据透射谱得到该种样品材料的实测吸收边结果,利用不同元素材料在一定能量的吸收边来确定单色器的输出能量,根据实测结果与理论计算结果比较来标定绝对能量，并给出偏差和精度.实验中测量了 C, Al, Cr, Cu 等元素的相应吸收边,通过对测量角度的偏差及理论计算的结果分析,得到能量分辨的结果.图 3 给出了 Cu 滤光片的测量结果,W/Si 多层膜单色器($d=3.8$ nm, 81 层),峰值位置理论计算值为 0.932 keV (Cu($L\alpha$)), 实测值在 0.946 keV, $\Delta E/E$ 为 1.6%.

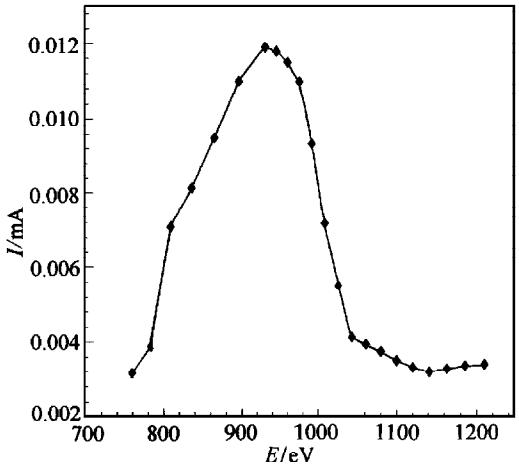


图 3　W/Si 多层膜单色器在 Cu 滤光片条件下的测量结果

2) *透射光栅摄谱方法*　透射光栅处于多层膜单色器出射方向与出射光束垂直的位置,单色软 X 射线正入射到透射光栅上,经透射光栅的衍射和干涉,在远场不同空间位置形成该单色光的各级衍射像,各衍射级峰值位置 Y_m 由下式决定:

$$Y_m = mD\lambda/d, \tag{14}$$

其中 m 为衍射级数,d 为光栅周期常数,λ 为入射波长,D 为光栅到记录平面的垂直距离,实验中 $D=156.2$ mm.记录介质为上海产软 X 射线胶片.图 4 给出了透射光栅在 0.932 keV能量时摄取的谱图及相应的黑度扫描结果.

从图 4 中可以看到,一级衍射峰半高全宽(FWHM)与高级衍射峰半高全宽相比,差别较小.另外从(14)式可知,由光源单色器单色性引起的透射光栅的 m 级增宽将是一级衍射宽度的 m 倍,通过考虑去除各衍射级中的几何增宽(主要是光栅狭缝宽度)和光栅本身的衍射干涉物理增宽,通过分析一阶衍射和高阶衍射峰宽的差别,进而得到能量分辨的结果.根据估算 $\Delta E=15$ eV, $\Delta E/E$ 为1.6%.

上述两种方法的测量结果尽管是装置本身的综合能量分辨结果,但主要贡献是多层

膜单色器的,实际上多层膜单色器的能量分辨率应优于该结果.因此可以说,自制的W/Si多层膜单色器在0.932 keV时的能量分辨率($\Delta E/E$)≤1.6%,两种方法测量的结果是一致的.该结果优于美国国家同步辐射光源(NSLS)W/Si多层膜作单色器的X8A束线2%的能量分辨的结果[6].

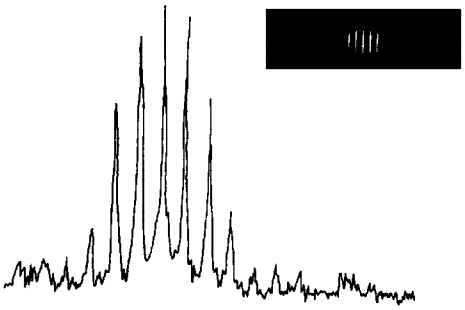


图4 透射光栅摄取的谱图及相应的黑度扫描结果
条件为W/Si多层膜单色器;Cu滤光片

4 结 论

1.提出了既提高多层膜能量分辨率又不降低反射率的规则,根据这些规则设计的多层膜,不仅具有较高的反射率,而且其能量分辨率比通常方法设计的要高出3—5倍.

2.自制的W/Si多层膜单色器在0.932 keV时的能量分辨率($\Delta E/E$)≤1.6%,该结果优于美国国家同步辐射光源(NSLS)W/Si多层膜作单色器的X8A束线2%的能量分辨率的结果.

感谢中国工程物理研究院核物理与化学研究所易荣清和杨家敏两同志在透射光栅测量中给予的帮助.

[1] P. Dhez and C. Weisbuch, Physics, Fabrication and Applications of Multilayered Structures (Plenum Publishing Corporation, 1988), p.272.

[2] N.M. Ceglio *et al.*, *Opt. Commun.*, **69**(1988), 285.

[3] Cui Mingqi, Miao Jianwei, Wang Jun *et al.*, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, **A359**(1995), 151.

[4] B.E. Warren, X-Ray Diffraction(1968), p.315.

[5] B.L. Henke *et al.*, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **27**(1982), 20.

[6] F.G. Nicholas, NSLS User's Manual: Guide to the VUV and X-Ray Beamlines, Fifth Edition (REV. 1)(April 1993), p.X8A.

THE STUDY OF ENERGY RESOLUTION FOR SOFT X-RAY MULTILAYER MONOCHROMATER

CUI MING-QI　MIAO JIAN-WEI[a)]　WANG JUN　CUI CHONG-WU　LI GANG　ZHU PEI-PING

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing* 100039)

a) (*Physics Department, State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, New York* 11794-3800, USA)

(Received 17 September 1996)

ABSTRACT

A theoretical method to obtain the soft X-ray multilayer monochromater of better energy resolution is put forward. The basic point is to choose the alternating elements with new criterions instead of general choosing method of high-and low-z elements. Moreover, a simple and practicable multilayer designing method to achieve high reflectivity was presented. The some results of soft X-ray multilayer monochromater study in recent years on Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF) have been given out.

PACC: 7865; 6865