

同步辐射 X 射线干涉的实验研究

蒋建华 韩勇 王洲光 田玉莲 王功利

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

王林 赵洋 曹芒 李达成

(清华大学精密仪器系 北京 100084)

摘要 介绍在北京同步辐射装置上进行的国内首次 LLL 型 X 射线干涉实验研究,在 X 光底片上观察到了 Moire 干涉条纹,为进一步利用 X 射线干涉技术实现纳米测量打下了初步基础.

关键词 同步辐射 X 射线干涉 纳米测量

1 引言

X 射线作为一种电磁波,它和普通的可见光一样可以互相干涉,但由于 X 射线在各种介质中的折射率都非常接近于 1,因此不能象可见光那样利用透镜及反射镜来使光束偏转和合并,然而利用 X 射线在晶体中的布拉格衍射原理也可以达到干涉的目的. 自从 1965 年 Bense 和 Hart^[1]发明 X 射线干涉仪以来,在它的理论、设计和应用方面都有了很大的发展并取得不少成就. 随着科学技术的发展,人们对纳米量级微小尺度的标定愈来愈关注. X 射线干涉测量技术是以非常稳定的亚纳米量级的单晶体的晶格作为长度基准,在纳米测量范围内具有特殊优越性,因而近年来该技术得到了迅速发展. 英国已实现了对微位移传感器的标定^[2],其最小分辨率可达 5 μm ;德国 PTB 已将其用于对纳弧度量级自准直仪的标定^[3].

2 X 射线干涉原理

X 射线干涉仪通常包括分束器(S)、镜子(M)和分析器(A)三个部件. 这三个部件由三片平行且截面晶向完全一致的高度完美的单晶体材料制成,各部件之间是非衍射层(通常为空气). 图 1(a)是 LLL 型 X 射线干涉仪的示意图. 当波长为 λ 的 X 射线以 Bragg 角 θ_0 入射到由“厚”晶片构成的分束器时,根据 Borrmann 效应,晶体内波节与原子平面一致

的波场将只受到微弱的吸收而通过晶体,在分束器后面分成向前衍射(透射)光束 O 和衍射光束 H,它们是位相可干的.如图 1(b)所示,这两束光通过镜子反射后在分析器晶片前面 P 处重新会聚.由于 M 和 S 晶片严格平行且截面晶向完全一致,因此两束相干光的光程差为零,在 P 处会产生干涉条纹,条纹间距为:

$$W = \lambda / (2\sin\theta_b) = (2d\sin\theta_b) / (2\sin\theta_b) = d, \quad (1)$$

d 为反射面的晶面间距,对 Si(220)反射面, $d = 0.192\text{nm}$.如此小的条纹间距,通常观察不到.为此使其进一步通过分析器,利用光的叠栅作用,形成放大的 Moire 条纹,从而可用底片进行观察.

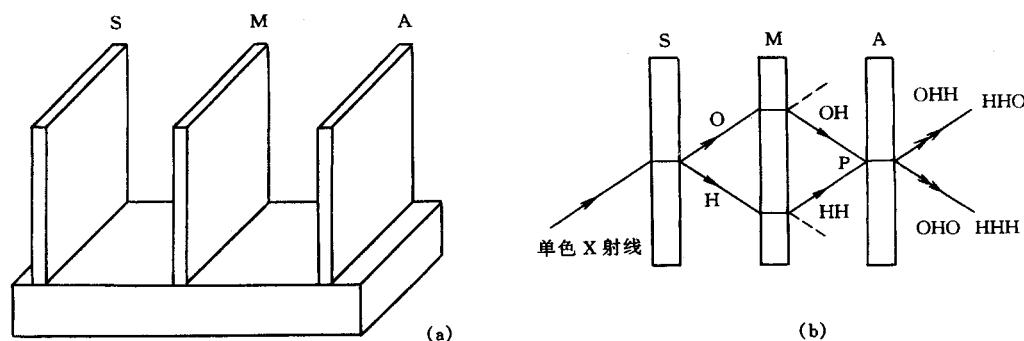


图 1 X射线干涉示意图

(a) LLL型干涉仪; (b) 干涉原理示意.

如果改变干涉仪中 A 与 M、S 的相对取向或晶面间距,或者将 A 与 M、S 分离使 A 沿着垂直于其反射晶面的方向平移,而 S 和 M 保持静止,这时 P 处的驻波花样就会和 A 本身产生的驻波花样发生干涉,从而产生附加的干涉条纹.如果在透射或衍射光束的光路中插入一个试样晶片,就会改变两个波场的光程差,也会产生新的干涉条纹.利用这些附加的干涉条纹,可以对近完美晶体进行各种研究和作原子尺度的长度测量.

3 实验描述

X 射线干涉实验是在北京同步辐射装置形貌学实验站上完成的,主要仪器是一台可以围绕入射光束翻转 90° 的高精密双轴衍射仪.衍射仪两个精密旋转轴在 $\pm 5^\circ$ 范围内的转动精度可达 0.05arcs .实验布局如图 2 所示.衍射仪的第一轴上装 Si(111)标准晶体,第二轴上装 LLL 型 Si 晶体干涉仪,用 NaI 计数器探测衍射摇摆曲线,用 X 光底片记录 Moire 干涉条纹.

实验中采用的干涉仪为两个 LLL 型 Si 晶体干涉器件,反射面均取 (220) 晶面.第一个干涉器件在日本高能物理实验室加工,分束器和分析器的厚度基本相同,分别为 0.26mm 和 0.30mm ,镜子厚度 0.76mm 约为分束器或分析器的两倍.三晶片之间的间距基本相同,分别为 6.52mm 和 6.54mm ,其间距差即散焦量为 $20\mu\text{m}$.第二个干涉器件由中国

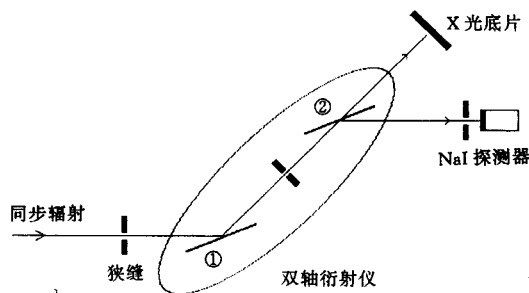


图 2 X射线干涉实验光路及布置

①Si(111)单色器; ②LLL型X射线干涉仪.

有色金属研究院加工, S、M、A 三片的厚度基本相同, 分别为 0.58mm, 0.60mm 和 0.50mm, 间距分别为 13.46mm 和 13.48mm, 散焦量也为 $20\mu\text{m}$.

考虑干涉器件晶片的厚度, 选取入射单色 X 射线波长 0.07nm , 为此, 转动第一晶体 Si(111)使其定位在相对入射同步辐射光的 Bragg 角 6.5° . 单色 X 射线经过矩形可调狭缝入射到干涉器件上, 实验中狭缝尺寸调节到垂直 $1\text{mm} \times$ 水平 7mm . 由于干涉器件的衍射面为 Si(220)晶面, 相应的 Bragg 角应为 10.6° . 实验时, 先用目测将干涉器件放置于 Bragg 角附近, 再将 NaI 探测器置于二倍 Bragg 角处, 然后通过计算机控制双向扫描干涉器件, 直到探测器接收到衍射峰值. 将干涉器件固定在这一位置, 在探测器所在方位 (对应 H 光) 以及相应的 O 光方位, 放置 X 光底片进行曝光, 便可观察到 X 射线干涉条纹.

4 实验结果及讨论

实验中探测器接收到的衍射光子强度 I 随入射角度 θ 变化的曲线即摇摆曲线如图 3 所示, (a) 对应第一个干涉器件, (b) 对应第二个干涉器件. 由图可见, 衍射峰的半高宽较大, 这是由于实验中为了尽量减小晶体对光的吸收提高输出光强, 而只用了一块硅单晶作为单色器, 导致入射光的单色化程度较差所形成的. 对 Bragg 定律的表达式微分可得:

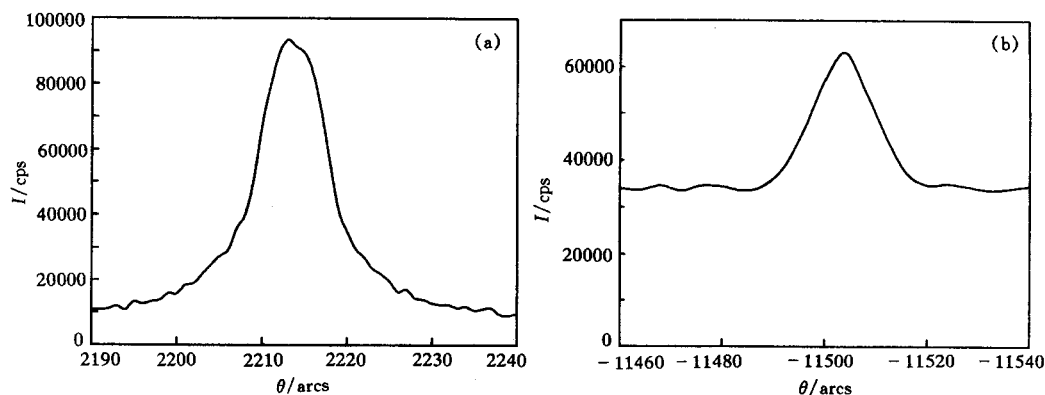


图 3 探测器接收到的衍射光子强度随入射角度变化的曲线

$$\Delta\theta = \Delta\lambda / (2d\cos\theta), \quad (2)$$

可见入射光的单色性愈差即 $\Delta\lambda$ 愈大,则能够产生衍射的角度范围 $\Delta\theta$ 也愈大,从而导致探测器接收到的衍射曲线的半高宽也增大.

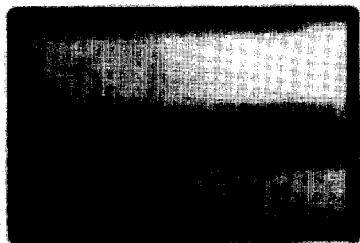


图 4 O光光路上获得的X射线干涉图象

图 4 是从放置于 O 光光路上的 X 光底片上获得的干涉图象. 整个图象由三部分组成, 在中间部分上可以清楚地看到干涉条纹, 而上下两部分中看不到干涉条纹. 这可由图 5 所示 LLL 型干涉仪的分束特性来解释. 当一束入射光以 Bragg 角入射到分束器晶体的表面时, 由于异常透射效应, 在出射面会产生一束向前衍射 (透射) 光和衍射

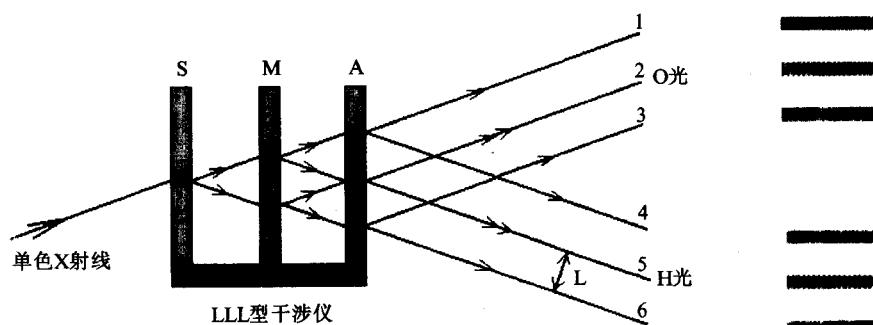


图 5. LLL型干涉仪的分束特性

光. 由于镜子和分析器与分束器平行, 每束光通过每一晶片都会产生同样的分光效应, 因此, 一束入射光经过 LLL 型干涉仪后可以有六束出射光. 其中, 光束 2 (O 光) 和 5 (H 光) 分别为两束相干光的叠加, 故可以产生干涉条纹. 而光束 1 是经过三次透射形成的, 因此光强最大. 所以, 在 O 光光路上放置底片时, 就会获得图 4 所示在中间区域有干涉条纹, 且上部较为明亮的图象.

从 LLL 型 X 射线干涉仪的分束特性可以导出: 在任一组平行的出射光束中, 光束之间的间距 L 取决于三晶片的厚度及其间隙. 设三晶片的厚度分别为 t_s, t_m, t_a , 间隙分别为 d_1, d_2 , 则间距 L 为:

$$L = (t_s + t_m + t_a + d_1 + d_2) \sin\theta_b. \quad (3)$$

将两个干涉仪的具体尺寸代入公式计算可得: 第一个干涉仪的出射光间距为 2.66mm, 第二个为 5.29mm, 与实验拍摄到的情况相符.

本次实验是国内首次用 LLL 型干涉仪观察到 X 射线干涉现象, 观察的结果与理论分析一致. 虽然由于 4W1A 是白光束线, 形貌站内同步辐射散射本底较大使干涉条纹的对比度尚不太好, 但条纹已清晰可见. 下一步实验拟设法缩短同步光在空气中的传播距离, 并采取进一步的屏蔽措施以提高衍射光强度和干涉图象对比度. 同步辐射 X 射线干涉实

验研究的初步成功,为利用该技术实现纳米测量打下了基础。

日本高能物理实验室张晓威博士和中国有色金属研究院陈坚邦研究员分别为本次实验加工制作了X射线干涉器件,中国科学院高能物理研究所夏绍建研究员参与了实验工作的讨论,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Bonse U, Hart M. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, 6:155
- [2] Bowen D K et al. *Meas. Sci. Technol.*, 1990, 1:107
- [3] Windsch D et al. *J. Appl. Cryst.*, 1992, 25:377

Study of X-Ray Interference Using Synchrotron Radiation

Jiang Jianhua Han Yong Wang Zhouguang Tian Yulian Wang Gongli

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Wang Lin Zhao Yang Cao Mang Li Dacheng

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The experimental study of synchrotron radiation X-ray interference has been presented. This experiment has been performed at the topography station of Beijing Synchrotron Radiation Facility. The Moire fringes have been observed on the X-ray films. It has laid an initial foundation for the measurements with nm length.

Key words synchrotron radiation, X-ray interference, measurement with nm length