

光学元件表面粗糙度对第三代同步辐射光源 空间相干性的影响

王 云 肖体乔 徐洪杰

(中国科学院上海原子核研究所, 上海 201800)

陈 敏 陈建文 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 以单丝的同轴全息干涉花样为判别标准, 通过计算机数值模拟, 研究了 Be 窗的表面粗糙度对硬 X 射线相干特性的影响。提出了 X 射线在粗糙表面反射的一个简单模型, 以此为基础模拟研究了反射镜表面粗糙度对硬 X 射线及软 X 射线空间相干特性的影响, 模拟结果与实验结果相符。

关键词 同步辐射, 相干性, 粗糙度, 同轴全息。

1 引 言

作为新一代光源, 第三代同步辐射装置正以其许多无与伦比的优良特性受到各国专家和政府的一致青睐和重视。相干性便是其中之一。

相干性分为时间相干性和空间相干性。时间相干性由 X 射线的单色性来表征。单色化可由单色仪来实现, 这种技术已非常成熟和完善, 且已达到相当高的精度。对第三代同步辐射光源, 空间相干性显得尤其重要。空间相干性体现了同一时刻, 空间中两点光场之间的相位关系。它与光源的特性直接相关。第三代同步辐射光源, 电子的发射度很小, 使得辐射光的空间相干性大大提高。而插入件的使用如波荡器(Undulator)则进一步提高了其空间相干性, 从而使许多对相干性要求高的实验, 如全息显微、扫描显微、微束成像等得以实现。

但实验装置中各种光学元件如 Be 窗、反射镜、多层膜等, 因为其表面的粗糙度, 会给光束带来随机的相位调制, 从而给光源的空间相干性造成不可忽视的影响。当然, 对任何光源, 都可以利用小孔滤出满足空间相干性要求的光束, 但其代价是牺牲相干通量, 故降低粗糙度的重要意义在于大幅度提高光通量的利用效率。

在这个领域, 欧洲同步辐射装置(ESRF)的研究人员作了初步的实验工作, 并取得了一些有意义的结果^[1, 2]。国内限于硬件上的原因, 很难在第一、第二代环上开展这方面的工作。即将建造的上海同步辐射装置(SSRF)属第三代光源。它具有低发射度(约 $10 \text{ nm} \cdot \text{rad}$)、多

插入件等特点,亮度比第二代光源高两个量级以上。其辐射的 X 射线空间相干性也得到大幅度的提高,因此光学元件的表面粗糙度对光源空间相干性的影响已不可忽视。

本文以单丝的同轴全息干涉花样为判别标准,通过数字模拟,系统研究了同步辐射光束线中常用的透过型元件(如 Be 窗)和反射型元件的表面粗糙度对光源空间相干性的影响,并将模拟结果与实验结果比较。

2 原 理

2.1 单丝衍射

在空间相干性的表征和刻度方面,通常采用杨氏双缝的分波前装置或菲涅耳双平面镜、双棱镜的分振幅装置。但在高能 X 射线波段内,因为 X 射线的高透过率,上述方法很难奏效^[1, 2]。故本文采用一种简单的全息术——同轴全息术作为判别手段。因单丝衍射形成的全息图与空间相干性密切相关,可用其干涉花样的好坏来表征光源空间相干性的变化。

单丝的同轴全息如图 1 所示。它的记录装置和干涉花样简单,适合于估计 X 射线束的空间相干性。

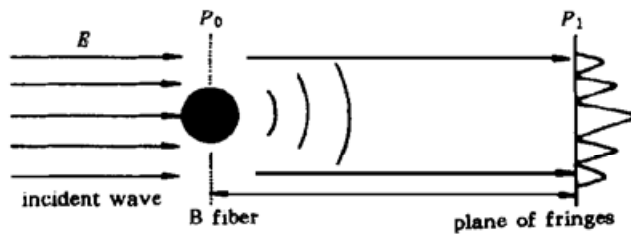


Fig. 1 Schematic setup of in-line holography

同轴全息可用菲涅耳衍射来描述。设 E 为入射 X 射线的电场矢量, E_1 为干涉像平面上各点的电场矢量。 P_0 为垂直于入射方向的纤维 B 所在平面, P_1 为干涉像平面, z 为 P_0 和 P_1 之间的距离。为简单起见,考虑单色平面波入射。由菲涅耳衍射公式^[4]

$$E_1(x_1, y_1) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \iint_{s_0} \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2]\right\} E(x_0, y_0) t(x_0, y_0) dx_0 dy_0, \quad (1)$$

式中, (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) 分别为 P_0 平面、 P_1 平面上的空间坐标, $t(x_0, y_0)$ 为 X 射线透过率函数,

$$t(x_0, y_0) = \exp[jk(\tilde{n} - 1)d(x_0, y_0)], \quad (2)$$

\tilde{n} 为 P_0 面上各点的复折射率, $d(x_0, y_0)$ 为 P_0 面上各点厚度。设纤维 B 的半径为 R , 则纤维 B 上各点的厚度为

$$d(x_0, y_0) = 2 \sqrt{R^2 - x_0^2}. \quad (3)$$

2.2 物理模型

本文对光束线中最常用的两种光学元件 Be 窗和平面反射镜作了研究。由于粗糙度通常是随机分布的,所以可以用随机函数 $\text{Ran}(x, y)$ 来模拟光学元件表面的粗糙度。

2.2.1 Be 窗

Be 窗的单丝同轴全息示意图如图 2 所示。

入射波为单色平面波

$$E_0 = A \exp(jkz), \quad (4)$$

透过 Be 窗后,电场矢量变为

$$E_1 = E_0 \exp[jk(\tilde{n} - 1) \text{Ran}(x_0, y_0)], \quad (5)$$

经过菲涅耳衍射后, 可得干涉像平面上各点的电场矢量为

$$E_2 = F\{E_1(x_1, y_1), Z\}, \tag{6}$$

其中, F 表示菲涅耳衍射过程, 下同。

2.2.2 平面反射镜

平面反射镜的单丝同轴全息示意图如图 3 所示。

入射波为单色平面波

$$E_0 = A \exp(jkz), \tag{7}$$

反射镜的表面粗糙度对 X 射线的相位调制采用如图 3(b) 所示的简单模型, 这里不考

虑背面散射及吸收, 因为它们对光束空间相干性无影响。虚线是粗糙度为 0 时的光路。设 O 点处的粗糙度为 d , 则由几何关系可知, 有、无粗糙度的光程差为

$$\Delta = OA - OB = -2dn_v \sin \theta, \tag{8}$$

其中 n_v 为真空中的折射率。经过平面镜的相位调制后, 电场矢量变为

$$E_1 = E_0 \exp[jkn_v(-2d \sin \theta)], \tag{9}$$

经过菲涅耳衍射后, 在干涉像平面上的电场矢量为

$$E_2 = F\{E_1(x_1, y_1), z\}. \tag{10}$$

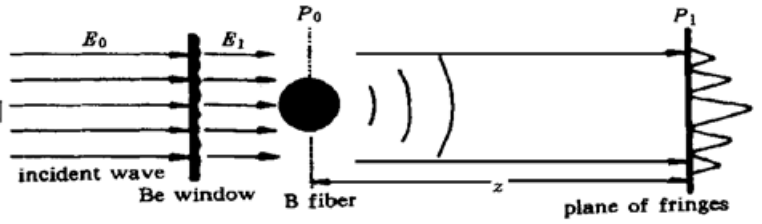


Fig. 2 Schematic setup of in-line holography in the case of Be window

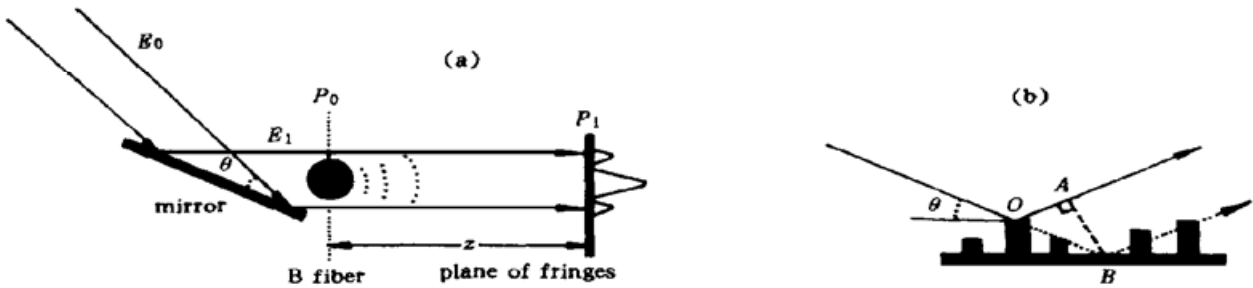


Fig. 3 (a) Schematic setup of in-line holography in the case of mirror. (b) Phase modulation of X-ray beam by surface roughness of mirror

3 结果及分析

数值模拟程序由 C 语言编译后在 PC 机上运行。菲涅耳衍射由二维快速傅里叶变换 (FFT2D) 来实现^[3]。

空间相干性的变化用可见干涉条纹数目及条纹对比度来说明和表征。因为条纹结构比较复杂, 很难用一个确定的参数来衡量空间相干性, 故综合干涉花样和横截面强度分布图进行分析, 并与表面粗糙度为零的情形作比较, 从而得出空间相干性不受影响的表面粗糙度的下限。

3.1 Be 窗

由于 Be 窗对软 X 射线有很强的吸收性, 一般仅用于硬 X 射线波段。所以本文考虑了波长为 0.100 nm(12 KeV) 和 0.041 nm(30 KeV) 的情形。

从图 4 可以看出, 与粗糙度为 0 的情形作比较, 在粗糙度小于 0.1 μm 时, 条纹数目及条纹对比度几乎不受影响, 粗糙度为 0.2 μm 时, 条纹对比度明显下降, 而粗糙度大于 0.2 μm 时, 随着粗糙度的增大, 条纹对比度逐步变差, 到粗糙度为 5 μm 时, 已观察不到干涉条纹。因此, 可认为随着 Be 窗表面粗糙度的增大, X 射线的空间相干性变差。粗糙度为 0.2 μm 是相

干成像实验所能容忍的最大粗糙度, 即 Be 窗加工时应增加表面抛光工艺, 使粗糙度小于 $0.2 \mu\text{m}$ 。图 5 同图 4, 只是波长更短。

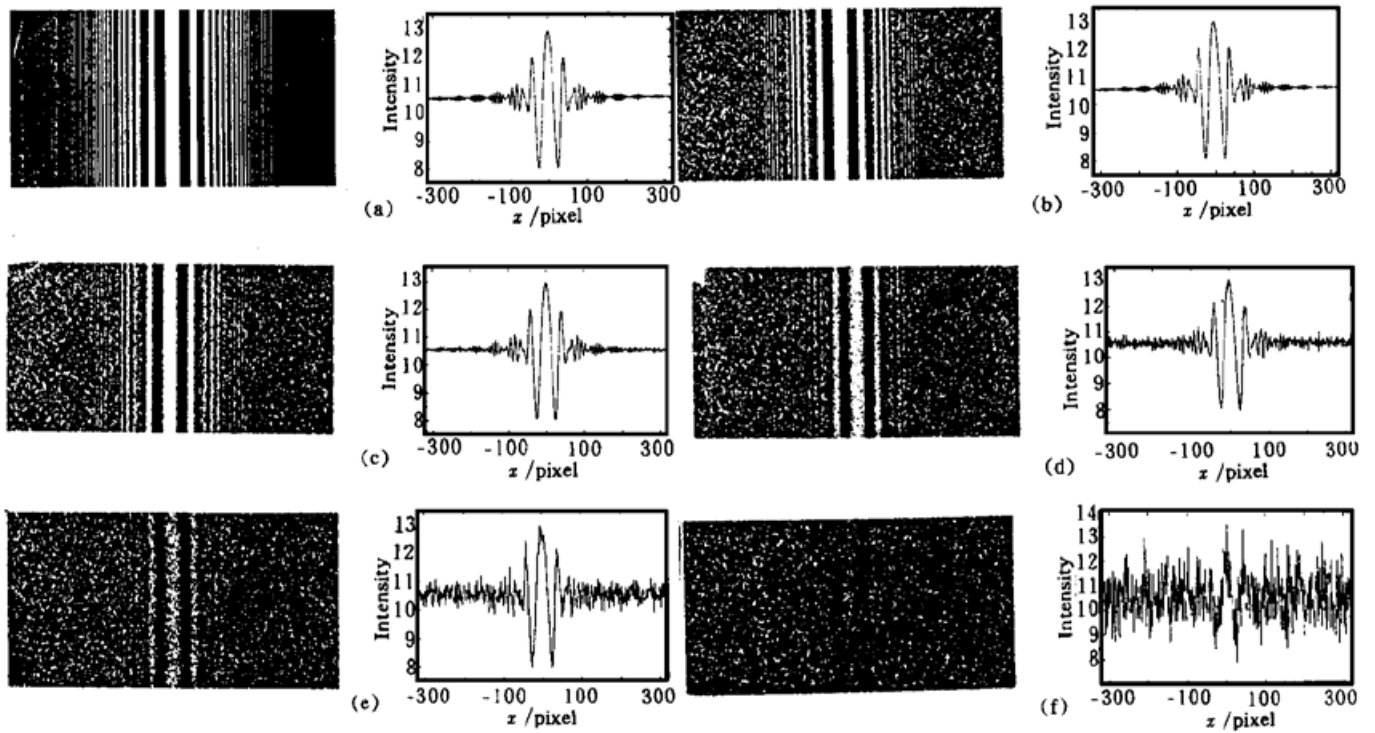


Fig. 4 Fringes pattern and its transverse profile of intensity at 0.100 nm (12 keV) and different surface roughness of Be window: (a) $0 \mu\text{m}$, (b) $0.1 \mu\text{m}$, (c) $0.2 \mu\text{m}$, (d) $0.5 \mu\text{m}$, (e) $1.0 \mu\text{m}$, (f) $5.0 \mu\text{m}$

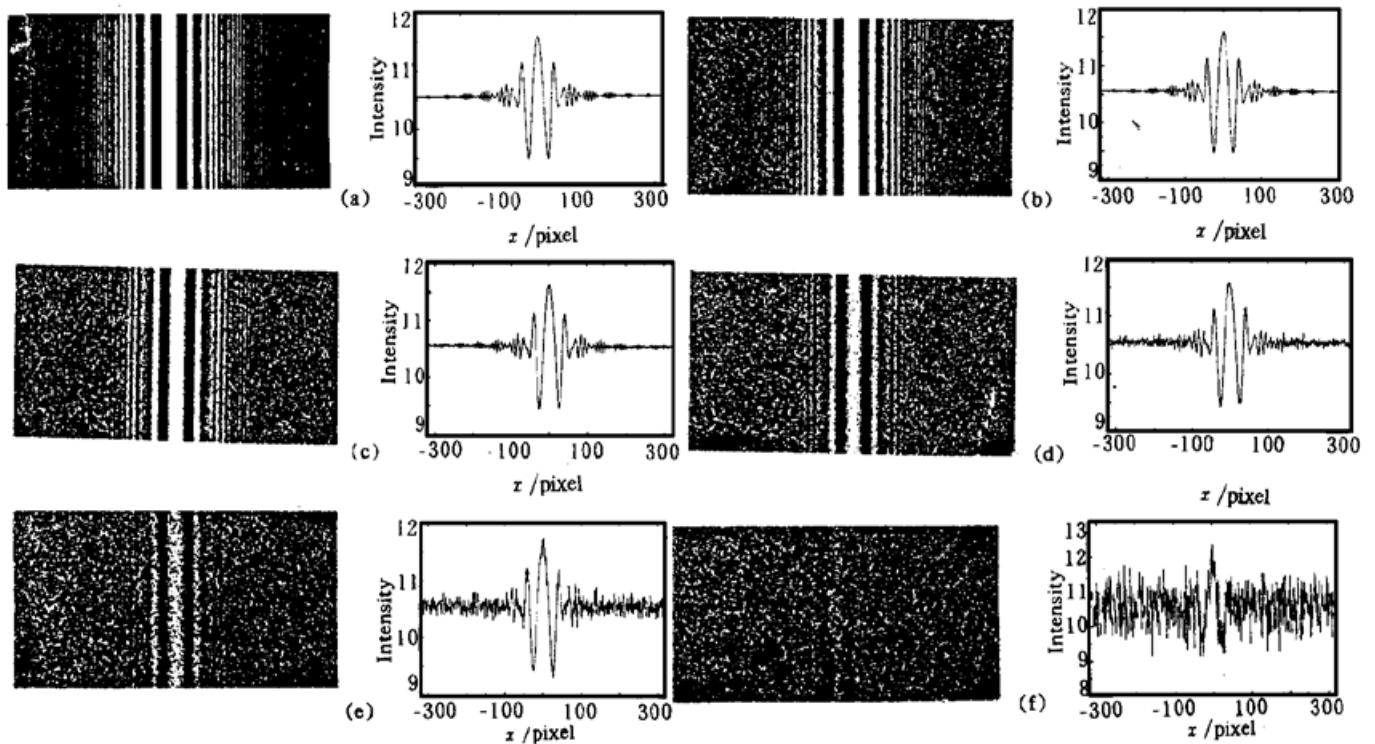


Fig. 5 Fringes pattern and its transverse profile of intensity at 0.041 nm (30 keV) and different surface roughness of Be window: (a) $0 \mu\text{m}$, (b) $0.1 \mu\text{m}$, (c) $0.2 \mu\text{m}$, (d) $0.5 \mu\text{m}$, (e) $1.0 \mu\text{m}$, (f) $5.0 \mu\text{m}$

3.2 反射镜

对于反射镜, 本文考虑了波长为 0.041 nm(30 KeV) 和 4.37 nm(水窗) 情形。

反射镜的镀层材料为 Au, 入射角的选取均略小于各波长下的 Au 的全反射临界入射角。

图 6 对应硬 X 射线的情形。由图可知, 对于反射镜, X 射线波长 $\lambda = 0.041 \text{ nm}$, 掠入射角 $\theta = 2 \text{ mrad}$, 当粗糙度小于 $1 \times 10^{-5} \mu\text{m}$ 时, 可见条纹数目及条纹对比度几乎不受影响, 当粗糙度为 $2 \times 10^{-5} \mu\text{m}$ 时条纹对比度有明显下降, 到粗糙度为 $5 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 时条纹对比度为零。与 Be 窗一样, 随着反射镜表面粗糙度的增大, X 射线的空间相干性逐渐变坏。因此, 可以认为该条件下对反射镜表面的粗糙度容限为 $2 \times 10^{-5} \mu\text{m}$ (0.02 nm)。

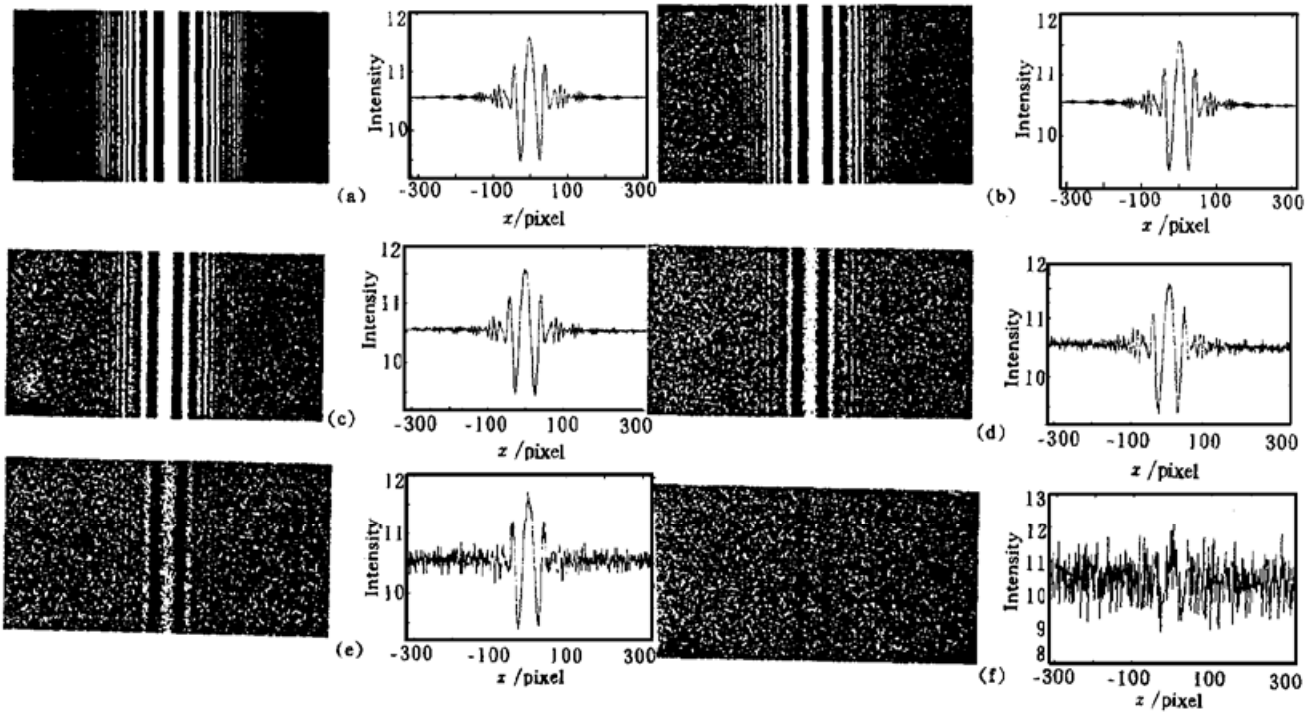


Fig. 6 Fringes pattern and its transverse profile of intensity at wavelngth 0.041 nm (30 keV), with grazing incident angle 2 mrad and different surface roughness of mirror: (a) $0 \mu\text{m}$, (b) $1 \times 10^{-5} \mu\text{m}$, (c) $2 \times 10^{-5} \mu\text{m}$, (d) $5 \times 10^{-5} \mu\text{m}$, (e) $1 \times 10^{-4} \mu\text{m}$, (f) $5 \times 10^{-4} \mu\text{m}$

图 7 对应软 X 射线的情形。由图可知, 对于反射镜, X 射线波长 $\lambda = 4.37 \text{ nm}$, 掠入射角 $\theta = 0.1 \text{ rad}$, 当粗糙度小于 $1 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 时, 可见条纹数目及条纹对比度几乎不受影响, 当粗

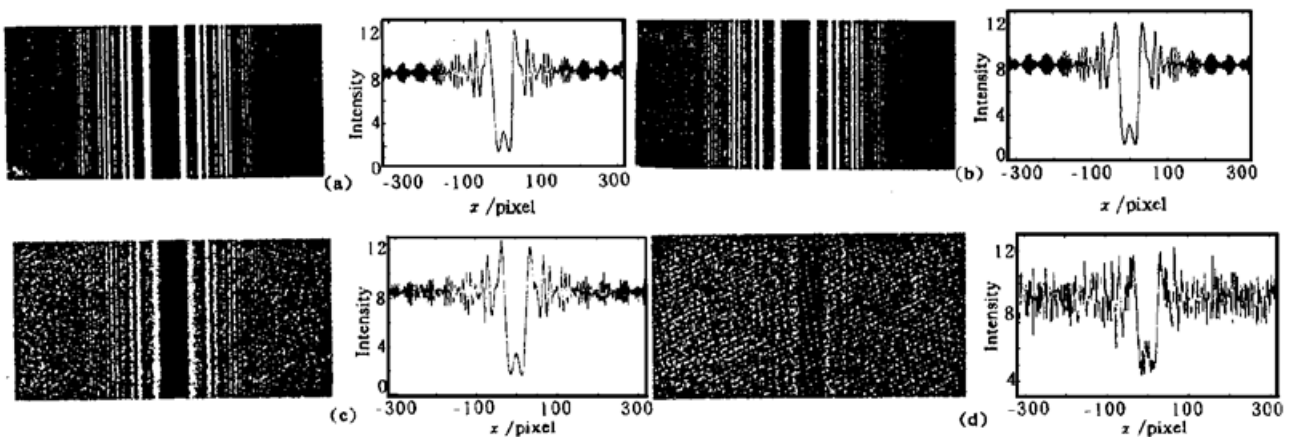


Fig. 7 Fringes pattern and its transverse profile of intensity at wavelngth 4.37 nm, grazing incident angle 0.1 rad and different surface roughness of mirror: (a) $0 \mu\text{m}$, (b) $1 \times 10^{-4} \mu\text{m}$, (c) $5 \times 10^{-4} \mu\text{m}$, (d) $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}$

糙度为 $5 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 时条纹对比度有明显下降, 到糙度为 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 时条纹对比度为零。因此, 该条件下对反射镜表面的糙度容限为 $5 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ (0.5 nm)。

比较 $\lambda = 0.041 \text{ nm}$ 与 $\lambda = 4.37 \text{ nm}$ 的情形, 发现在长波长时, 中央干涉条纹为暗纹, 而在短波长时则为亮纹。这是由 B 纤维对软 X 射线的强吸收所造成的。

3.3 与实验结果比较

图 8 是波长为 0.124 nm、掠入射角为 2.79 mrad、糙度为 0.3 nm 时的干涉花样及横截面强度分布图。与文献[1]中的实验结果比较, 从它们的可见条纹数目、条纹对比度及强度分布截面图等方面都符合较好。这也说明了 X 射线反射模型的正确性。

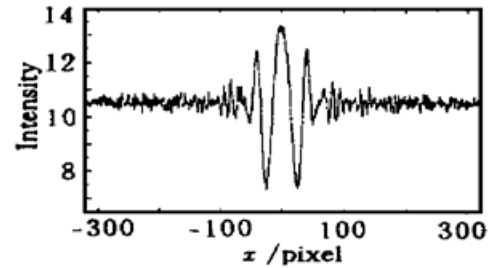
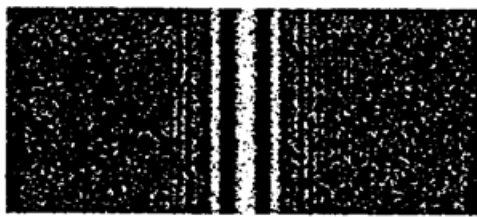


Fig. 8 Fringes pattern and its transverse profile of intensity with the surface roughness of mirror 0.3 nm, wavelength 0.124 nm and grazing incidence angle 2.79 mrad (0.16°)

4 讨 论

在相同的表面糙度情况下, 反射镜由于是掠入射, 其有效糙度 $R_{\text{ou eff}} = R_{\text{ou}} \sin \theta$, 小于 Be 窗的有效糙度。但比较透过型元件和反射型元件的模拟结果, 发现对于 Be 窗, 当糙度为 $0.2 \mu\text{m}$ 时, 光源空间相干性才较明显地变差。而对于反射镜, 到 $2 \times 10^{-5} \mu\text{m}$ 时相干性就开始迅速变坏, 即光源的空间相干性对反射镜表面糙度比对 Be 窗表面糙度更加敏感。其实, 位相调制不仅与表面糙度有关, 还与材料的复折射率 \tilde{n} 有关。对于 Be 窗, 由表面糙度产生的光程差 $\Delta \propto \delta_{\text{Be}}(1 - \delta_{\text{Be}} - i\beta_{\text{Be}})$ 为 Be 窗的复折射率, 对于反射镜, $\Delta \propto n_v$ (真空中折射率), 而 $\delta_{\text{Be}}/n_v < 10^{-5}$, 故总的效果是反射镜的空间相干性更容易受到影响。

以上只研究了平面反射镜, 曲面型反射镜与此类似, 只是受加工工艺的限制, 平面、球面的加工可达到较高的表面光洁度, 而特殊表面如椭球面、超环面等(特别是镜子尺寸较大时)则很难得到小的糙度。因此在对 X 射线空间相干性要求较高的光束线中应尽量避免使用特殊表面光学元件。

对反射型光学元件, 硬 X 射线对糙度的容限为 0.02 nm, 软 X 射线的容限为 0.5 nm。就目前的加工能力以及检测手段, 可以达到的表面糙度约为 0.5 nm。因此就现有的工艺水平在软 X 射线波段的相干照明、相干成像实验是可以实现的。相对而言, 硬 X 射线波段要实现对相干性要求较高的实验(如全息术)就很困难, 因为此时 X 射线通过光束线传输到实验站时其空间相干性已受到严重破坏。

结 论 第三代同步辐射光源本身具有较好的空间相干性, 但由于光学元件表面糙度的相位调制而易遭到破坏。这就对光学元件的加工提出了较高的要求。模拟结果表明, 对于 Be 窗, 在硬 X 射线情形下, 表面糙度须小于 $0.2 \mu\text{m}$; 对于反射镜, 在软 X 射线情形, 糙度须小于 0.5 nm, 在硬 X 射线情形, 糙度须小于 0.02 nm。只有达到上述要求方可保证光源

的空间相干性基本能满足相关实验的要求。

参 考 文 献

- [1] Snigirev A. Coherent properties of the third generation synchrotron radiation sources: Requirements to the optics. *Proc. SPIE*, 1996, **2856** : 26~ 33
- [2] Snigirev A, Snigireva I, Kohn V G *et al.*. On the requirements to the instrumentation for the new generation of the synchrotron radiation sources. Beryllium windows. *Nucl. Instrum. & Methods in Physics Research (A)*, 1996, **370**(2-3) : 634~ 640
- [3] 肖体乔, 徐至展, 陈建文等. 全息图的数字重现. *光学学报*, 1995, **15**(2) : 129~ 134
- [4] 顾德门 J W 著. 詹达三等译. 傅立叶光学导论. 北京: 科学出版社, 1976.

Effect of Surface Roughness of Optical Elements on Spatial Coherence of X-Ray Beams from the Third Generation Synchrotron Radiation Sources

Wang Yun Xiao Tiqiao Xu Hongjie

(Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Chen Min Chen Jianwen Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 4 December 1998; revised 8 January 1999)

Abstract Effect of surface roughness of Be window on the spatial coherence of hard X-ray beams is investigated by means of digital simulation, in which the interference pattern of one fiber in-line holography is employed to estimate the coherence. A simple model for X-ray reflection from rough surface is proposed. Based on this model, effect of surface roughness of reflection mirror on X-ray beams, including hard X-ray and soft X-ray, is simulated. The result from simulation is consistent with that from experiments.

Key words synchrotron radiation, coherence, roughness, in-line holography.