

铋光栅 X 射线相衬成像条纹对比度的定量计算

黄建衡^{1,2}, 雷耀虎¹, 杜 杨¹, 刘 鑫¹, 郭金川¹, 李 冀¹, 郭宝平^{1*}

¹深圳大学光电工程学院广东省/教育部光电子器件与系统重点实验室, 广东 深圳 518060;

²深圳大学信息工程学院, 广东 深圳 518060

摘要 吸收光栅是 X 射线相衬成像系统的关键器件, 铋吸收光栅由于其制作成本低廉且适于在普通实验室开展制作而受到青睐。提出了一种针对铋光栅 X 射线相衬成像条纹对比度的定量计算方法, 通过建立模型, 数值计算了不同铋层厚度的吸收光栅所对应的叠栅条纹对比度, 并比较了 π 和 $\pi/2$ 相位光栅两种情形下的结果。结果显示, 随着吸收光栅铋层厚度的增加, 条纹对比度逐渐增加, 当源光栅和分析光栅的铋层厚度分别达到 $150\ \mu\text{m}$ 和 $110\ \mu\text{m}$ 时, 利用 π 相位光栅在 40 kV 管电压下其条纹对比度可达 48%, 60 kV 管电压下其条纹对比度只能达到 22%。而在两个吸收光栅铋层厚度相同的情况下, 采用 $\pi/2$ 相位光栅所得条纹对比度略优于 π 相位光栅的结果。对铋光栅 X 射线相衬成像条纹对比度的计算分析, 可作为 X 射线相衬成像系统设计的参考依据, 推动该成像技术走向实用化。

关键词 X 射线光学; X 射线相衬成像; 条纹对比度; 数值计算; 铋吸收光栅

中图分类号 O434.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0434001

Quantitative Calculation of Fringe Visibility in Bismuth Grating-Based X-Ray Phase-Contrast Imaging

Huang Jianheng^{1,2}, Lei Yaohu¹, Du Yang¹, Liu Xin¹, Guo Jinchuan¹, Li Ji¹, Guo Baoping¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems, Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract Absorption gratings are the key devices in grating-based X-ray phase-contrast imaging (XPCI). The low cost and fitness for the fabrication in general laboratories make bismuth absorption grating favored. A calculating method for fringe visibility in bismuth grating-based XPCI is proposed, and the moire fringe visibilities of bismuth absorption gratings with different thicknesses are calculated through modeling. Results show that fringe visibility increases with the increasing thickness of bismuth structure. The fringe visibility for π phase grating can reach 48% under the 40 kV tube voltage, but only 22% under 60 kV, when the thicknesses of bismuth structure in source gratings and analyzer gratings are $150\ \mu\text{m}$ and $110\ \mu\text{m}$, respectively. Furthermore, when the bismuth structure thicknesses of the two absorption gratings are equivalent, fringe visibilities are obtained by use of the π phase and $\pi/2$ phase gratings, respectively. Their quantitative comparison shows that the result of employing $\pi/2$ phase grating is slightly better than that of π phase grating. The quantitative calculation of fringe visibility will be beneficial to the design of grating-based XPCI system, which may promote the practicality of this technology.

Key words X-ray optics; X-ray phase-contrast imaging; fringe visibility; numerical calculation; bismuth absorption grating

OCIS codes 340.7440; 340.7450; 050.2770

收稿日期: 2016-10-11; 收到修改稿日期: 2016-11-09

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制专项(61227802)、国家自然科学基金青年基金(61605119, 61405120, 11404221)、中国博士后科学基金面上项目(2016M592529)

作者简介: 黄建衡(1985—), 男, 博士, 主要从事 X 射线光栅相衬成像系统分析和器件研制方面的研究。

E-mail: xianhuangjianheng@163.com

* 通信联系人。E-mail: bpguo@szu.edu.cn

1 引 言

自伦琴发现 X 射线之后, X 射线成像技术在医疗、安检和材料检测等领域得到了广泛的应用。然而对于生物体软组织、聚合物和纤维复合材料等对 X 射线吸收较弱的轻元素物质, 传统 X 射线吸收成像技术难以获得它们的清晰图像。理论上, 轻元素物质对硬 X 射线相位的改变量是对其振幅改变量的 $10^3 \sim 10^5$ 倍, 若能记录下 X 射线透过轻元素物质的相移, 将可以获得这类物质的高对比度相衬图像^[1-2]。20 世纪 90 年代以来, X 射线相衬成像技术已经发展了多种方法, 主要可分为晶体干涉法、衍射增强法、类同轴法和光栅相衬成像法四大类^[3-6], 其中光栅相衬成像法突破了对高相干 X 射线源的依赖, 可使用普通 X 射线源实现, 最有可能走向实际应用^[7-8]。

由于 X 射线相衬成像对光源相干条件的限制, 早期开展的成像实验要使用同步辐射 X 射线源或微焦斑 X 射线源来实现。但是, 同步辐射对技术要求复杂, 运行和维护费用高昂, 受应用场所限制; 微焦斑 X 射线源功率有限, 成像时曝光时间过长, 两者在可预见的时期内都难以应用到临床诊断中。2006 年, 瑞士的 Pfeiffer 等^[9-15] 使用普通 X 射线源和吸收光栅组成的阵列 X 射线源实现了光栅相衬成像, 这项突破性的工作使光栅相衬成像发展成了 X 射线相衬成像研究的热点。尽管 Pfeiffer 等提出的方法让人们看到了 X 射线光栅相衬成像广阔的应用前景, 但是该成像技术至今仍然没有真正走向实用, 主要原因是受到 X 射线光栅器件的限制。成像系统中使用的吸收光栅(包括源光栅和分析光栅)是关键器件, 若吸收光栅中阻挡 X 射线的材料厚度不足, 从吸收光栅中透过的部分 X 射线会在像面形成一个本底强度, 致使叠栅条纹对比度下降, 进而导致图像衬度和检测灵敏度不足, 难以满足实际应用的要求^[16]。国际上普遍采用金(Au)作为吸收光栅阻挡 X 射线的材料, 但是金吸收光栅的制作成本比较高, 目前对于大面积高深宽比的金吸收光栅, 其制作工艺仍在进一步研究^[17-19]。于是, 有研究小组提出了铋吸收光栅。铋(Bi)原子序数为 83, 密度为 9.78 g/cm^3 , 对 X 射线有很强的吸收, 可作为吸收光栅中阻挡 X 射线的材料^[20-21]。大面积铋吸收光栅造价低廉, 采用铋吸收光栅将有望发展一种低成本高效率的 X 射线相衬成像技术, 但目前还没有关于铋光栅 X 射线相衬成像理论和数值分析的报道。

X 射线光栅相衬成像系统的噪声特性与其叠栅条纹对比度密切相关, 物体相衬图像的量子噪声均方差与叠栅条纹对比度呈反比例关系, 条纹对比度越大, 相衬图像的信噪比就越高^[22-24]。因此, 条纹对比度是 X 射线光栅相衬成像系统的重要参量。本文提出一种针对铋光栅 X 射线相衬成像条纹对比度的定量计算方法, 依据成像原理建立数学模型对不同铋层厚度吸收光栅所对应的叠栅条纹对比度进行定量计算, 并对采用 π 和 $\pi/2$ 相位光栅这两种情形的结果进行比较分析, 为铋光栅 X 射线相衬成像系统设计和器件研制提供参考依据。

2 成像原理

当采用相干光照射光栅时, 在光栅后面的不同距离处会周期性地出现光栅自成像, 称之为泰伯效应, X 射线光栅相衬成像方法正是基于这一原理。图 1 是 X 射线点光源照明下光栅相衬成像的原理示意图, 成像系统中包括两个光栅, 其中 G_1 是相位光栅, G_2 是吸收光栅, 也称为分析光栅, 用 p_1, p_2 分别表示 G_1, G_2 的周期, 点源到相位光栅 G_1 的距离为 l , 自成像与相位光栅 G_1 的距离为 d , 在自成像的位置处放置分析光栅 G_2 。

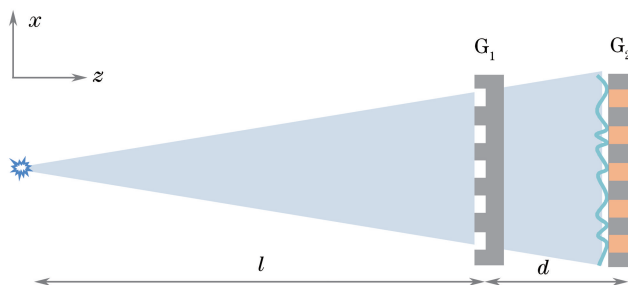


图 1 X 射线点光源照明下光栅相衬成像原理示意图

Fig. 1 Schematic of the grating based phase-contrast imaging under the illumination of point X-ray source

设距离点源单位距离处的强度为 1, 依据基尔霍夫-菲涅耳衍射理论, 在傍轴近似下, 紧贴吸收光栅 G_2 前表面的自成像强度 $I(x, y; x_0, y_0)$ 可表示为

$$I(x, y; x_0, y_0) = \frac{1}{(l+d)^2} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp\left(-i\pi n^2 \frac{d\lambda_c}{Mp_1^2}\right) \exp\left[\frac{i2\pi n}{Mp_1}\left(x - \frac{d}{l}x_0\right)\right] \right|^2, \quad (1)$$

式中 C_n 是相位光栅 G_1 复振幅透过率函数的傅里叶展开系数, λ_c 是设计使用的 X 射线中心波长, 用 (x_0, y_0) 表示点源所在位置坐标, 自成像的放大倍率 M 为

$$M = \frac{l+d}{l}. \quad (2)$$

自成像距离 d 可表示为

$$d = m \frac{Mp_1^2}{\lambda_c}, \quad (3)$$

式中 m 是分数泰伯阶, 对于 π 相位光栅, m 的取值为 $1/8, 3/8, 5/8, \dots$, 而对于 $\pi/2$ 相位光栅, m 为 $1/2, 3/2, 5/2, \dots$.

考虑到点源谱宽, 对应波长为 λ 的 X 射线在自成像位置的强度 $I_\lambda(x, y; x_0, y_0)$ 为

$$I_\lambda(x, y; x_0, y_0) = \frac{1}{(l+d)^2} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n(\lambda) \exp\left(-i\pi n^2 \frac{d\lambda}{Mp_1^2}\right) \exp\left[\frac{i2\pi n}{Mp_1}\left(x - \frac{d}{l}x_0\right)\right] \right|^2, \quad (4)$$

式中 $C_n(\lambda)$ 是相位光栅 G_1 对应 X 射线波长 λ 的复振幅透过率函数的傅里叶展开系数。

由于分析光栅 G_2 的周期 p_2 与相位光栅 G_1 自成像的周期相同, 当把光栅 G_1, G_2 平行放置, 调整两个光栅栅条方向成一个微小夹角 θ 时, 就会在 G_2 后面形成周期很大的叠栅条纹, 其强度分布 $I_m(x, y; x_0, y_0)$ 可表示为

$$I_m(x, y; x_0, y_0) = \int_{\Delta\lambda} k(\lambda) I_\lambda(x, y; x_0, y_0) T_\lambda(x, y) d\lambda, \quad (5)$$

式中 $\Delta\lambda$ 是 X 射线源谱宽, 用 $k(\lambda)$ 表示对应波长 λ 的 X 射线在源谱分布中的权重. $T_\lambda(x, y)$ 是分析光栅 G_2 的强度透过率函数, 用傅里叶级数展开表示为

$$T_\lambda(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C'_n(\lambda) \exp\left[i2\pi \frac{n}{p_2}(x \cos \theta - y \sin \theta)\right], \quad (6)$$

式中 $C'_n(\lambda)$ 是对应其强度透过率函数的傅里叶展开系数。

在常规 X 射线源前面放置一个吸收光栅 G_0 , 称之为源光栅, 用 p_0 表示其周期, 如图 2 所示, X 射线透过源光栅 G_0 后形成线阵列 X 射线源, 每个线源经过相位光栅 G_0 后形成各自的自成像, 只要满足以下关系

$$\frac{p_0}{p_2} = \frac{l}{d}, \quad (7)$$

各个线源形成的自成像可以恰好叠加在一起从而大大提高其像面强度, 这时像面叠栅条纹的强度分布 $I_s(x, y)$ 可表示为

$$I_s(x, y) = \int_S I_m(x, y; x_0, y_0) dx_0 dy_0, \quad (8)$$

式中 S 是 X 射线源的焦斑面积。

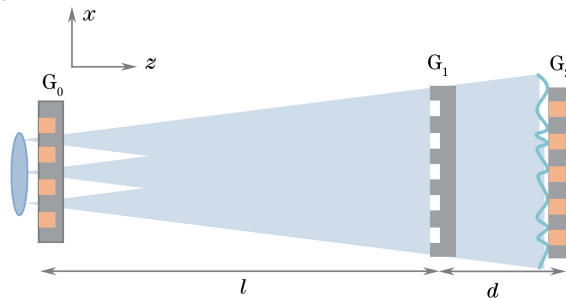


图 2 X 射线阵列源照明下光栅相衬成像原理示意图

Fig. 2 Schematic of the grating based phase-contrast imaging under the illumination of X-ray array sources

理论上,当源光栅 G_0 和分析光栅 G_2 是两个理想的吸收光栅时,可以得到对比度最好的叠栅条纹。但实际制作的铍光栅并不理想,会有部分 X 射线从铍材料中透过,透过的 X 射线在像面产生一个强度背景而使叠栅条纹对比度下降。X 射线透过强度与光栅中铍材料的厚度相关,因此源光栅 G_0 和分析光栅 G_2 中铍层厚度会直接影响叠栅条纹的对比度。由于普通 X 射线源是宽谱 X 射线源,铍材料对不同波长 X 射线的吸收特性不同,不同波长 X 射线经过光栅后在像面上对强度分布的贡献不同,从叠栅条纹强度[(8)式]无法直观得到铍层厚度与条纹对比度的关系。下面将依据上述成像原理,设计成像系统参数,通过数值计算程序来获得不同铍层厚度的吸收光栅所对应的叠栅条纹对比度。

3 成像系统设计

依据上述原理构建了一套针对宽谱条件下铍光栅 X 射线相衬成像系统叠栅条纹强度分布的计算程序,利用该程序来数值计算 40 kV 和 60 kV 两种管电压情形下成像系统的叠栅条纹对比度。计算中采用的成像系统参数如表 1 和表 2 所示,它们分别表示 X 射线源管电压为 40 kV 和 60 kV 的情形。成像系统中三个光栅的周期分别为 $p_0=24 \mu\text{m}$, $p_1=9.6 \mu\text{m}(4.8 \mu\text{m})$, $p_2=6 \mu\text{m}$,其中 $p_1=9.6 \mu\text{m}$ 时采用 π 相位光栅, $p_1=4.8 \mu\text{m}$ 时表示 $\pi/2$ 相位光栅。源光栅 G_0 的占空比 γ_0 为 $1/4$,相位光栅 G_1 和吸收光栅 G_2 的占空比 γ_1, γ_2 均为 0.5。

表 1 成像系统 I 的参数

Table 1 Parameters of the imaging system I

Tube voltage /kV	$p_0 / \mu\text{m}$	$p_1 / \mu\text{m}$	$p_2 / \mu\text{m}$	l / mm	d / mm
40	24	9.6(4.8)	6	1309	327

表 2 成像系统 II 的参数

Table 2 Parameters of the imaging system II

Tube voltage /kV	$p_0 / \mu\text{m}$	$p_1 / \mu\text{m}$	$p_2 / \mu\text{m}$	l / mm	d / mm
60	24	9.6(4.8)	6	1440	360

计算中采用常规钨靶 X 射线源,其等效焦斑大小为 $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$,高能电子轰击钨靶主要产生韧致辐射,是一个宽谱 X 射线源,在 40 kV 和 60 kV 管电压下其 X 射线谱分布如图 3 所示^[25]。在 40 kV 管电压下,X 射线谱中心能量为 28 keV,对应设计源光栅 G_0 到相位光栅 G_1 的距离 l 为 1309 mm,相位光栅 G_1 到分析光栅 G_2 的距离 d 为 327 mm,如表 1 所示。在 60 kV 管电压下,X 射线谱中心能量为 31 keV,对应设计源光栅 G_0 到相位光栅 G_1 的距离 l 为 1440 mm,相位光栅 G_1 到分析光栅 G_2 的距离 d 为 360 mm。铍材料对不同能量 X 射线的吸收特性不同,不同能量 X 射线经过光栅后在像面上对强度分布的贡献也不同。处于 X 射线谱中心位置的 X 射线经过相位光栅产生 π (或 $\pi/2$)的相移,在像面上得到的叠栅条纹对比度最好,而位于 X 射线谱两侧的 X 射线经过相位光栅产生的相移逐渐偏离 π (或 $\pi/2$),在像面上得到的叠栅条纹对比度逐渐降低。选择吸收光栅中铍层厚度的范围为 $90 \sim 150 \mu\text{m}$,采用构建的程序计算不同铍层厚度下所对应叠栅条纹的强度分布,进而计算出相应的条纹对比度。

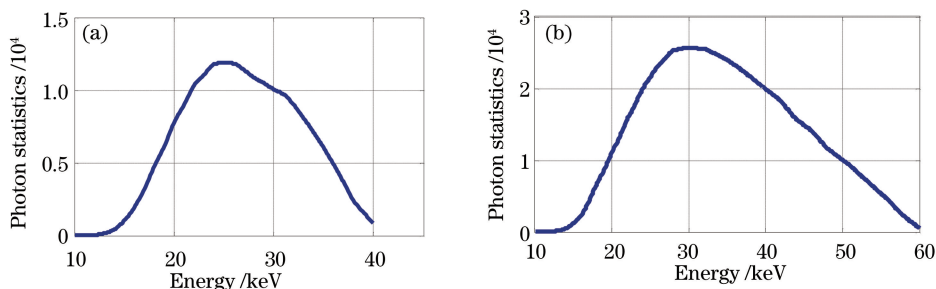


图 3 不同管电压下钨靶 X 射线谱分布。(a) 40 kV; (b) 60 kV

Fig. 3 X-ray spectrum distribution of the tungsten target at different tube voltages. (a) 40 kV; (b) 60 kV

4 结果分析与讨论

图 4 是当源光栅和分析光栅的铋层厚度分别为 $130\ \mu\text{m}$ 和 $90\ \mu\text{m}$ 时,采用 π 相位光栅在 $40\ \text{kV}$ 管电压下得到的叠栅条纹计算结果,其中图 4(a)是叠栅条纹图,图 4(b)是对应图 4(a)实线位置的强度分布曲线。图 4(b)中叠栅条纹归一化强度最大值 $I_{\max}=0.64$,最小值 $I_{\min}=0.244$,由条纹对比度的计算式 $V=(I_{\max}-I_{\min})/(I_{\max}+I_{\min})$,可得到其条纹对比度为 44% 。

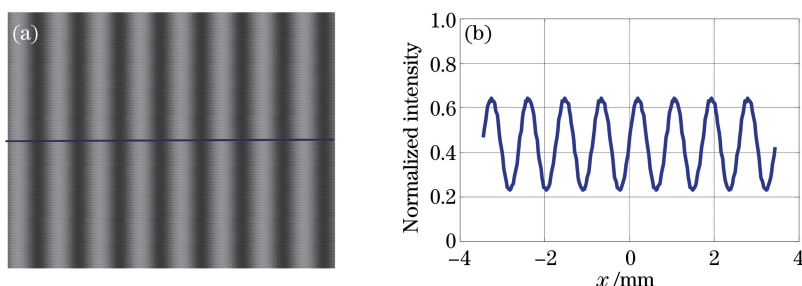


图 4 叠栅条纹的计算实例。(a) 叠栅条纹图; (b) 图 4(a)实线位置的强度分布曲线

Fig. 4 Calculation example of moire fringe. (a) Moire fringe pattern;
(b) intensity distribution of the solid line position in Fig. 4(a)

依照上述计算方法,分别计算了不同铋层厚度下所对应叠栅条纹的强度分布及其条纹对比度。图 5 和图 6 分别是 X 射线源管电压在 $40\ \text{kV}$ 和 $60\ \text{kV}$ 两种情形下所得条纹对比度的计算结果,图中横坐标对应的是源光栅铋层厚度,用不同线型代表采用不同铋层厚度的分析光栅所得结果。从图中可以看到,无论是在 $40\ \text{kV}$ 还是 $60\ \text{kV}$ 管电压下,成像系统的条纹对比度与铋层厚度密切相关,随着两个吸收光栅中铋层厚度的增加,条纹对比度逐渐增加。当源光栅和分析光栅的铋层厚度分别达到 $150\ \mu\text{m}$ 和 $110\ \mu\text{m}$ 时,采用 π 相位光栅在 $40\ \text{kV}$ 管电压下条纹对比度可达 48% , $60\ \text{kV}$ 管电压下条纹对比度只能达到 22% 。对于管电压为 $40\ \text{kV}$ 的钨靶 X 射线连续谱,吸收光栅铋层厚度达到 $150\ \mu\text{m}$ 就可基本实现对 X 射线的吸收,而对于管电压为 $60\ \text{kV}$ 的钨靶 X 射线连续谱,铋层厚度达到 $150\ \mu\text{m}$ 时仍然有部分高能 X 射线透过,未被吸收的部分高能 X 射线会在像面形成一个本底强度,导致成像系统的叠栅条纹对比度降低。

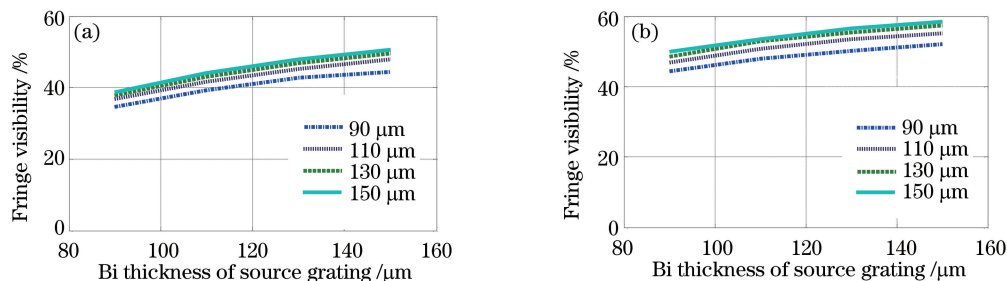


图 5 $40\ \text{kV}$ 管电压下所得条纹对比度的计算结果。(a) 采用 π 相位光栅的结果; (b) 采用 $\pi/2$ 相位光栅的结果

Fig. 5 Calculation results of the fringe visibility under the $40\ \text{kV}$ tube voltage. (a) Results of π phase grating;
(b) results of $\pi/2$ phase grating

对比图 5(a)和 5(b)可以看到,在两个吸收光栅铋层厚度相同的情况下,采用 $\pi/2$ 相位光栅所得条纹对比度稍高于 π 相位光栅的结果。究其原因,是在宽谱 X 射线照明情况下不同能量 X 射线经不同成像系统后的调制结果。图 7 是在设定管电压为 $40\ \text{kV}$ 、源光栅和分析光栅铋层厚度分别为 $150\ \mu\text{m}$ 和 $110\ \mu\text{m}$ 情况下计算得到的条纹对比度随 X 射线能量的变化曲线图,其中图 7(a)是采用 π 相位光栅的结果,图 7(b)是采用 $\pi/2$ 相位光栅的结果。在 $40\ \text{kV}$ 管电压下,X 射线谱中心能量为 $28\ \text{keV}$,计算中 π 相位光栅的硅层厚度设计为 $36\ \mu\text{m}$, $\pi/2$ 相位光栅的硅层厚度设计为 $18\ \mu\text{m}$ 。位于 X 射线谱两侧的 X 射线能量逐渐偏离 $28\ \text{keV}$,经过厚度不变的相位光栅后产生的相移逐渐偏离 π (或 $\pi/2$),使其在设计泰伯距离处形成的自成像对比度逐渐降低,从而导致像面上形成的叠栅条纹对比度从中心往两侧逐渐降低。能量在 $10\sim 20\ \text{keV}$ 的 X 射线

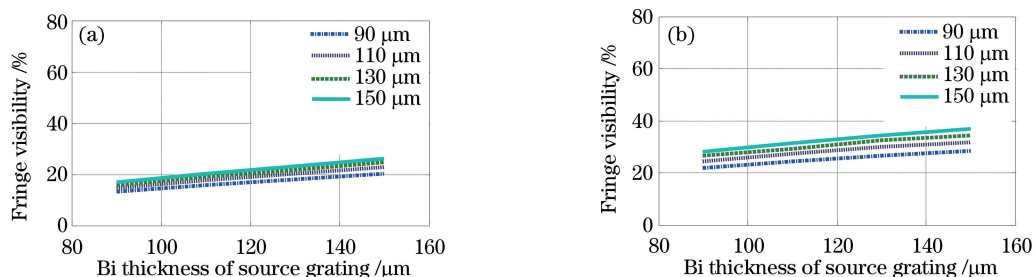


图 6 60 kV 管电压下所得条纹对比度的计算结果。(a) 采用 π 相位光栅的结果;(b) 采用 $\pi/2$ 相位光栅的结果
Fig. 6 Calculation results of the fringe visibility under the 60 kV tube voltage. (a) Results of π phase grating;
(b) results of $\pi/2$ phase grating

透过硅层厚度为 $36 \mu\text{m}$ 的相位光栅后产生相移为 $2.5\pi \sim 1.5\pi$, 而透过硅层厚度为 $18 \mu\text{m}$ 相位光栅后产生相移为 $1.5\pi \sim 0.7\pi$, 在设计距离处形成的自成像对比度很低, 因此叠栅条纹对比度在该能量区间显著降低。从图 7 可以看到, 采用 π 和 $\pi/2$ 相位光栅所得条纹对比度的最高值 70% 都出现在 X 射线能量为 27 keV 附近, 但采用 π 相位光栅所得条纹对比度高于 50% 的谱宽范围只有 10 keV, 而采用 $\pi/2$ 相位光栅, 其谱宽范围达到 15 keV, 由此可解释采用 $\pi/2$ 相位光栅所得条纹对比度略优于采用 π 相位光栅的结果。同样的情况在图 6(a)、(b) 也可以看到, 不再赘述。

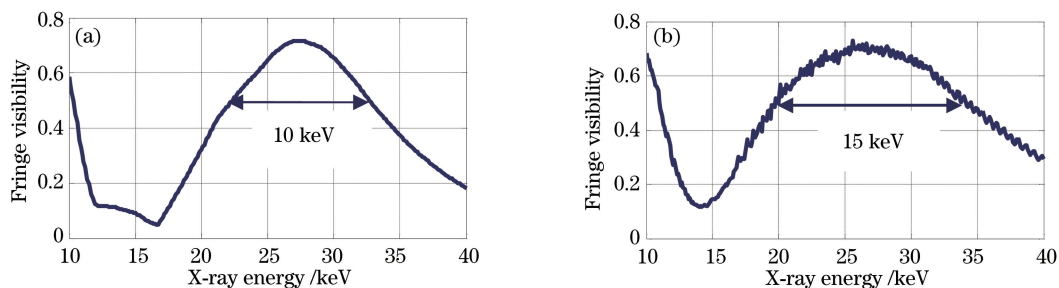


图 7 条纹对比度随 X 射线能量的变化曲线图。(a) π 相位光栅; (b) $\pi/2$ 相位光栅
Fig. 7 Fringe visibility versus X-ray energy. (a) Result of π phase grating; (b) result of $\pi/2$ phase grating

5 结 论

大面积铍吸收光栅便于在普通实验室制作, 且成本低, 采用铍吸收光栅将有望发展一种低成本高效率的 X 射线相衬成像技术。依据成像原理建立数学模型定量计算了铍光栅 X 射线相衬成像条纹对比度, 得到了不同铍层厚度吸收光栅所对应的条纹对比度。无论是在 40 kV 还是在 60 kV X 射线源管电压下, 随着吸收光栅铍层厚度的增加, 条纹对比度逐渐增加。当源光栅和分析光栅铍层厚度分别达到 $150 \mu\text{m}$ 和 $110 \mu\text{m}$ 时, 40 kV 管电压下其条纹对比度可达 48%, 60 kV 管电压下其条纹对比度只能达到 22%。同时比较了采用 π 和 $\pi/2$ 相位光栅两种情形的结果, 由于在宽谱 X 射线照明下不同能量 X 射线经不同成像系统后形成的调制效应, 在吸收光栅铍层厚度相同的情况下采用 $\pi/2$ 相位光栅得到高对比度叠栅条纹的谱宽宽于采用 π 相位光栅的情况, 因此采用 $\pi/2$ 相位光栅所得条纹对比度略优于 π 相位光栅的结果。对铍光栅 X 射线相衬成像条纹对比度的分析, 可为铍光栅 X 射线相衬成像系统设计和器件研制提供有力依据, 从而推动该成像技术的实用化进程。

参 考 文 献

- [1] Henke B L, Gullikson E M, Davis J C, *et al.* X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E=50\text{-}30,000 \text{ eV}$, $Z=1\text{-}92$ [J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1993, 54(2): 181-342.
- [2] Momose A. Demonstration of phase-contrast X-ray computed tomography using an X-ray interferometer[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1995, 352(3): 622-628.

- [3] Bonse U, Hart M. An X-ray interferometer[J]. Applied Physics Letters, 1965, 6(8): 155-156.
- [4] Davis T J, Gao D, Gureyev T E, *et al.* Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials using hard X-rays[J]. Nature, 1995, 373(6515): 595-598.
- [5] Wilkins S W, Gureyev T E, Gao D, *et al.* Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays[J]. Nature, 1996, 384(6607): 335-338.
- [6] David C, Nöhammer B, Solak H H, *et al.* Differential X-ray phase contrast imaging using a shearing interferometer [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(17): 3287-3289.
- [7] Pfeiffer F, Weitkamp T, Bunk O, *et al.* Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources[J]. Nature Physics, 2006, 2(4): 258-261.
- [8] Pfeiffer F, Bech M, Bunk O, *et al.* Hard X-ray dark-field imaging using a grating interferometer [J]. Nature Materials, 2008, 7(2): 134-137.
- [9] Stampanoni M, Wang Z, Thüning T, *et al.* The first analysis and clinical evaluation of native breast tissue using differential phase-contrast mammography[J]. Investigative Radiology, 2011, 46(12): 801-806.
- [10] Momose A, Yashiro W, Kido K, *et al.* X-ray phase imaging: from synchrotron to hospital [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2014, 372(2010): 20130023.
- [11] Du Y, Liu X, Lei Y, *et al.* Non-absorption grating approach for X-ray phase contrast imaging[J]. Optics Express, 2011, 19(23): 22669-22674.
- [12] Qi Jun cheng, Ren Yuqi, Du Guohao, *et al.* Multiple contrast micro-computed tomography system based on X-ray grating imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1034001.
戚俊成, 任玉琦, 杜国浩, 等. 基于 X 射线光栅成像的多衬度显微计算层析系统 [J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1034001.
- [13] Li Xinbin, Chen Zhiqiang, Zhang Li, *et al.* The status and development prospect of the diagnosis of breast cancer based on grating-based X-ray phase-contrast imaging [J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2015, 20(4): 305-318.
李新斌, 陈志强, 张 丽, 等. 基于 X 射线光栅相衬成像的乳腺癌诊断技术的现状和发展前景 [J]. 中国体视学与图像分析, 2015, 20(4): 305-318.
- [14] Du Yang, Liu Xin, Lei Yaohu, *et al.* Low cost and high efficiency method for X-ray phase contrast imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0334001.
杜 杨, 刘 鑫, 雷耀虎, 等. 低成本高效率 X 射线相衬成像技术研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0334001.
- [15] Wang S, Margie P O, Atsushi M, *et al.* Experimental research on the feature of an X-ray Talbot-Lau interferometer vs. tube accelerating voltage[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(6): 068703.
- [16] Donath T, Pfeiffer F, Bunk O, *et al.* Phase-contrast imaging and tomography at 60 keV using a conventional X-ray tube source[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(5): 053701.
- [17] David C, Bruder J, Rohbeck T, *et al.* Fabrication of diffraction gratings for hard X-ray phase contrast imaging[J]. Microelectronic Engineering, 2007, 84(5-8): 1172-1177.
- [18] Matsumoto M, Takiguchi K, Tanaka M, *et al.* Fabrication of diffraction grating for X-ray Talbot interferometer[J]. Microsystem Technologies, 2007, 13(5): 543-546.
- [19] Rutishauser S, Bednarzik M, Zanette I, *et al.* Fabrication of two dimensional hard X-ray diffraction gratings [J]. Microelectronic Engineering, 2013, 101: 12-16.
- [20] Lei Y, Du Y, Li J, *et al.* Application of Bi absorption gratings in grating-based X-ray phase contrast imaging [J]. Applied Physics Express, 2013, 6(11): 117301.
- [21] Lei Y, Du Y, Li J, *et al.* Fabrication of X-ray absorption gratings via micro-casting for grating-based phase contrast imaging [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2014, 24(1): 015007.
- [22] Revol V, Kottler C, Kaufmann R, *et al.* Noise analysis of grating-based X-ray differential phase contrast imaging [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(7): 073709.
- [23] Modregger P, Pinzer B R, Thüning T, *et al.* Sensitivity of X-ray grating interferometry [J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18324-18338.
- [24] Huang Jianheng, Du Yang, Lei Yaohu, *et al.* Noise analysis of hard X-ray differential phase contrast imaging [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(16): 168702.
黄建衡, 杜 杨, 雷耀虎, 等. 硬 X 射线微分相衬成像的噪声特性分析 [J]. 物理学报, 2014, 63(16): 168702.
- [25] Boone J M, Seibert J A. An accurate method for computer-generating tungsten anode X-ray spectra from 30 to 140 kV [J]. Medical Physics, 1997, 24(11): 1661-1670.