

双能分析光栅的设计

荣 锋^{1,2}, 梁 莹¹, 徐 伟^{1,2}

¹天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387;

²天津工业大学天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387

摘要 双能 X 射线光栅相衬成像系统具有成像效率高、辐射小、无须步进装置、成像平台简单等优点。研究了不同 X 射线能量下, CsI 厚度与荧光透射率、金属铋的厚度与光强透射率的关系。基于以上研究, 设计了一种双能分析光栅, 阐述了光栅结构及栅条的制作材料, 分析了栅条厚度的计算方法。对双能分析光栅成像进行了仿真, 结果表明, 设计的双能分析光栅可以获得清晰的条纹图像, 并具有良好的条纹对比度。将设计的双能分析光栅应用于双能 X 射线光栅相衬成像系统, 对成像系统进行了仿真, 成像系统可以获得被测物体的相位一阶导数图像, 表明设计的双能分析光栅是有效的。

关键词 光栅; 双能分析光栅; 条纹对比度; X 射线相衬成像; 闪烁体

中图分类号 O434.19 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1105001

Design of Dual Energy Analysis Grating

Rong Feng^{1,2}, Liang Ying¹, Xu Wei^{1,2}

¹ School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

² Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

Abstract The dual energy X-ray grating phase contrast imaging system exhibits a variety of advantages, including high imaging efficiency, low radiation, setups without stepping device, and simple imaging platform. Under different energy levels of X-ray, the relationship between the CsI thickness and the fluorescence transmittance, and the relationship between the Bi thickness and the transmittance of X-ray are studied. Based on the above research, a dual energy analysis grating is designed. The grating structure and the fabrication materials of the gratings are described, and the calculation method of the thickness of the grating bar is analyzed. The simulation of dual energy analysis grating is carried out. The results show that with the designed dual energy analysis grating, clear fringe image with high fringe contrast can be obtained. The designed dual energy analysis grating is applied to dual energy X-ray grating phase contrast imaging system. With simulation, the imaging system can obtain the phase first order derivative image of the measured object, indicating that the designed dual energy analysis grating is valid.

Key words gratings; dual energy analysis grating; fringe contrast; X-ray phase contrast imaging; scintillator

OCIS codes 050.2770; 110.7440; 110.6760; 340.7450

1 引 言

传统 X 射线成像的原理是利用 X 射线透过物体后的吸收差异形成图像衬度。轻元素组成的物质对 X 射线的吸收较弱, 吸收衬度方法无法有效成像。对于轻元素, X 射线相位因子变化量要比吸收因子的变化量大 1000 倍以上, 所以 X 射线相衬成像技术获得广泛研究^[1]。目前, 人们已经提出了多种 X 射线相位衬度成像的实现方法, 大部分方法需要在同步辐射源或微焦点源上才能获得比较好的成像效果, 限制了 X 射线相衬成像技

收稿日期: 2017-05-16; **收到修改稿日期:** 2017-03-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61405144)、天津市科委青年基金(15JQCQJC42100)、天津市科技特派员项目(16JCTPJC47200)

作者简介: 荣 锋(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事 X 射线成像和无损检测等方面的研究。

E-mail: shusheng677@163.com

术的实际应用。2006年 Pfeiffer 等^[2]提出的基于 Talbot-Lau 原理的光栅微分相衬成像法,可以在常规 X 射线上实现 X 射线相衬成像,该方法被认为是最有希望获得实际应用的 X 射线相位衬度成像方法。

光栅微分相衬成像法一般采用多步位移法提取相位信息,导致成像系统存在系统复杂、曝光时间和成像时间比较长等问题。随着研究的深入,2008年陈博等^[3]提出了两步位移法,这种方法减少了步进次数,提高了成像效率,但是对步进精度要求非常高,步进误差容易导致成像质量下降。2010年,李镜等^[4]提出的正反投影法,该方法不需要光栅步进,使相衬 CT 成像取得突破性进展,但是在成像系统中需要将物体或者探测器精密旋转,实现起来非常困难。2011年 Momose 等^[5]基于逆几何 Talbot-Lau 原理设计了一种新型光栅微分相衬成像系统,该成像系统不需要步进,可以直接成像,但是其长度达 7 m,不便于实际应用。荣锋等^[6]设计了一种双能分析光栅,并提出了一种双能 X 射线光栅相衬成像系统,该系统不需要步进装置,两次曝光即可成像,精简了成像系统,提高了成像效率,有利于推动光栅微分相衬成像法走向实际应用。但是只是提出了双能分析光栅的概念,没有具体讨论光栅的制作材料、厚度设计及其成像性能等问题。本文针对以上问题开展研究,进一步完善荣锋等^[6]提出的双能 X 射线光栅相衬成像系统,推动其实际应用进程。

2 双能 X 射线光栅相衬成像系统原理及其相位提取方法

双能光栅相衬成像系统如图 1 所示,图中 M 为 X 射线源与相位光栅的距离, Z_L 为相位光栅与双能分析光栅的距离。与现有成像平台比较,它主要是采用双能分析光栅替代分析光栅和 X 射线转换屏。双能分析光栅由宽度一致的低能栅条和高能栅条两种栅条交错排列而成,低能栅条可以将低能的 X 射线转换为可见光,屏蔽高能 X 射线;高能栅条将高能 X 射线转为可见光,屏蔽低能 X 射线。分别用低能和高能 X 射线两次曝光,获得两幅图像,进而提取相位信息,获得相衬成像^[6]。

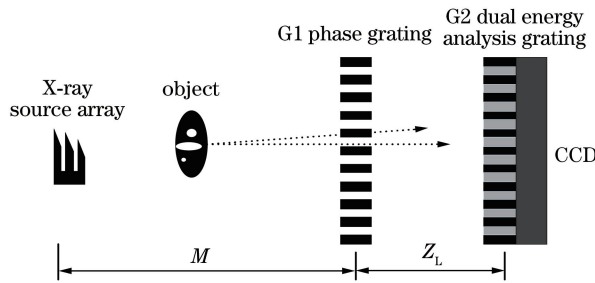


图 1 双能 X 射线光栅相衬度成像系统

Fig. 1 Dual energy X-ray grating imaging system

双能光栅相衬成像系统主要的设计思路是采用 X 射线能量的变换代替分析光栅的步进。由于成像系统光路基于 Talbot-Lau 效应设计,因此要求两种 X 射线能量下相位光栅可以在同一位置成像,并且成像周期一致。

相位光栅自成像 Talbot 距离为

$$d_m = \frac{mp^2}{8\lambda}, \quad (1)$$

式中 d_m 为 Talbot 成像的距离, m 表示 Talbot 距离的阶数, λ 为波长, p 为相位光栅的周期。由(1)式可知,当低能量 X 射线波长 λ_L 与高能量 X 射线波长 λ_H 满足 $\lambda_L = 3\lambda_H$ 时,两种 X 射线能量下可以在同一位置获得相位光栅成像。

相位光栅的相位移动表达式为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}T\delta, \quad (2)$$

式中 T 为光栅的厚度, δ 为光栅的相移因子。由(2)式可知,假如相位光栅在 X 射线波长为 λ_H 时,相位值为 π ;则 X 射线波长为 $\lambda_L = 3\lambda_H$ 时,相位光栅相位值为 3π 。 π 相位和 3π 相位光栅成像周期一致^[7]。

基于以上分析可知,当两种 X 射线能量满足一定关系时,相位光栅可在同一位置成同样周期的像。假如低能量 X 射线曝光获取的图像像素是物体位移曲线的左半腰的一个点,根据以上对于双能分析光栅的定

义可知,高能 X 射线曝光获得的图像的像素值则可以看成物体位移曲线的右半腰一个点,而且两个点是关于左右半腰对称,因此可以根据现有的两步位移法^[3]提取相位信息。该种成像系统下获得的相位图像可以看成在两种 X 射线能量之间的某一个能量的 X 射线通过多步位移法获得的相位图像。

3 双能分析光栅的设计

为了表述方便,将光栅相位成像系统中普遍采用的分析光栅称之为单能分析光栅。无论是单能分析光栅还是所设计的双能分析光栅都要根据 X 射线的能量选择栅条的制作材料,设计栅条的厚度,以便获得较高的条纹对比度来提取相位信息。以能量为 20 keV 的低能 X 射线、能量为 60 keV 的高能 X 射线为例,讨论双能分析光栅的制作材料和栅条厚度的计算方法。

3.1 CsI:Tl 晶体及晶体荧光透射率

X 射线成像过程中,首先由闪烁体将 X 射线转变为可见光,然后用电荷耦合器件(CCD)对可见光进行成像。CsI:Tl 晶体是一种常用的闪烁体材料,当 X 射线入射到晶体内部,高能粒子与晶体材料的原子或分子相互作用,使得材料的原子或分子电离、激发,在受激粒子退激过程中发出荧光。对于一个确定能量的 X 射线,闪烁体有一个最佳厚度。闪烁体过薄,大部分 X 射线直接透过,不产生可见光;闪烁体过厚,大部分 X 射线被转变为可见光,但是可见光无法出射到闪烁体外部进行有效成像。CsI:Tl 晶体的荧光透射率可以表征闪烁体厚度与输出可见光强度之间的关系。本研究主要采用文献^[8]建立的 CsI:Tl 晶体荧光透射率数学模型进行计算和仿真。

如图 2 所示,设能量为 E 的 X 射线光子垂直入射厚度为 L 的 CsI:Tl 层,在深度 z 处 $z \sim z + dz$ 范围内被吸收的概率与 z 有关,由于晶体主要是通过光电效应吸收能量,根据 X 射线在物质中的指数衰减特性,该概率可表示为

$$f_z(E, z) dz = \frac{u_{pe}(E) \exp[-u_T(E)z] dz}{\{1 - \exp[-u_T(E)L]\} u_{pe}(E)/u_T(E)}, \quad 0 \leq z \leq L, \quad (3)$$

式中 $u_T(E)$ 是指光电效应、相干散射和非相干散射三种效应作用下,物质对 X 射线的线性衰减系数, $u_{pe}(E)$ 为线性光电吸收系数。

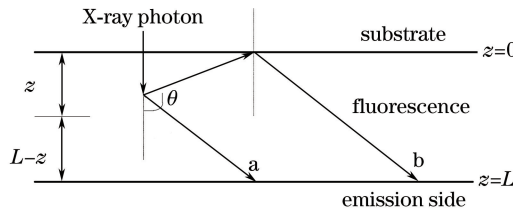


图 2 CsI:Tl 连续层中荧光透射率分布图

Fig. 2 Distribution of fluorescence transmittance in CsI:Tl continuous layer

CsI:Tl 吸收 X 射线能量后,可激发各向同性发射的荧光光子^[9],沿 θ 方向发射的概率以 X 射线入射方向为轴旋转对称,荧光进入 $\theta \sim \theta + d\theta$ 对应的空心圆锥立体角微元 $d\Omega$ 的概率为

$$f_\theta(\theta) d\theta = \frac{1}{4\pi} d\Omega = \frac{1}{2} \sin \theta d\theta, \quad 0 \leq \theta \leq \pi. \quad (4)$$

根据荧光透过 CsI:Tl 层时出射方向与入射 X 射线之间夹角的关系,在图 2 中,荧光在 CsI:Tl 连续层中传播时有两种可能途径:直接透过 CsI:Tl 层出射,如光线 a;经衬底反射后透过 CsI:Tl 层出射,如光线 b。设 CsI:Tl 对荧光的线性吸收系数为 σ ,假定衬底反射是镜面反射,忽略反射率与入射角的关系,在深度 z 处产生的以 θ 角发射的荧光透过 CsI:Tl 的概率随传输距离指数递减,根据图 2 即可得该概率为

$$f_T(z, \theta) = \begin{cases} \exp\left(\frac{-L+z}{\cos \theta} \sigma\right), & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ \exp\left(\frac{-L-z}{|\cos \theta|} \sigma\right) R_s, & \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi \end{cases}, \quad (5)$$

式中 R_s 为衬底反射率。为了降低模型的复杂度,上式忽略了逸出界面对荧光的反射。由(3)~(5)式可求

出能量为 E 的 X 射线光子,在 CsI:Tl 中激发出荧光时,荧光透过 CsI:Tl 层的概率为

$$P_{\text{esc}}(E, L, \sigma, R_s) = \int_0^L f_z(E, z) dz \int_0^\pi f_\theta(\theta) f_T(z, \theta) d\theta, \quad (6)$$

上式表明,荧光透射率是 X 射线光子能量 E 、CsI:Tl 层厚度 L 、荧光吸收系数 σ 、衬底反射系数 R_s 的函数。

采用(6)式仿真了 CsI:Tl 晶体在 20 keV 和 60 keV 两种 X 射线能量下厚度与荧光透射率的关系。CsI:Tl 晶体荧光吸收系数 $\sigma = 0.000222 \mu\text{m}^{-1}$, 密度 $\rho = 4.51 \text{ g/cm}^3$ (由于 Tl 含量很小可以忽略), 衬底反射系数 $R_s = 0.8$, 通过 Boone 等^[10]所提供的 CsI 对 X 射线吸收截面数据, 得到结果如图 3 所示。

根据图 3 可见,随着晶体厚度增加,荧光透射率会逐步提高,当晶体厚度达到一定程度时,荧光透射率会从最高点逐步衰减。在晶体厚度为 120 μm 处,能量为 20 keV 的 X 射线的荧光透射率为 0.6, 能量为 60 keV 的 X 射线的荧光透射率为 0.3。这意味着大部分 20 keV 的低能 X 射线转变为了可见光, 大部分 60 keV 的高能量 X 射线穿越了晶体, 没有产生可见光。随着厚度增加, 两种能量的荧光透射率都在降低。

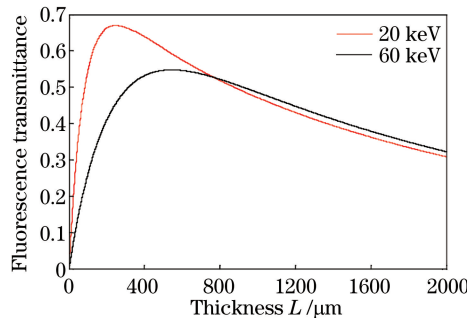


图 3 不同能量下 CsI 厚度与荧光透射率的关系

Fig. 3 Relationship between the thickness of CsI and fluorescence transmittance at different energy levels

3.2 单能分析光栅的材料及设计

单能分析光栅由透光栅条和非透光栅条交替排列而成。为了提高光的透射率,透光栅条的材料通常选择硅。为了提高条纹对比度,非透光栅条由吸收系数大、密度大的金或者铋电镀到基座制成。电镀金属的厚度越大,对光的遮挡性能越好,但是也会加大分析光栅的深宽比,提高光栅的制作难度。铋对 X 射线的吸收性能和金非常接近,制作大面积分析光栅时,使用铋进行电镀造价更低廉,因此主要研究铋对 X 射线的吸收性能。

图 4 为铋在不同能量下对 X 射线的吸收系数,可以看出随着 X 射线能量的变大,金属铋对 X 射线的吸收系数在降低,对于能量为 20 keV 的 X 射线吸收系数比较高,而对于能量为 60 keV 的 X 射线吸收系数比较低。

下物体对入射 X 射线衰减的计算公式为:

$$\frac{I_o}{I_i} = \exp(-\mu L), \quad (7)$$

式中 I_i 为入射的 X 射线强度, I_o 为出射的 X 射线强度, μ 为吸收系数, L 为物体的厚度。

根据(7)式仿真了金属铋的厚度与 X 射线光强透射率的关系,如图 5 所示。由图 5 可见,铋厚度越大,对 X 射线衰减越大,光强透射率越低。铋厚度为 50 μm 时,能量为 20 keV 的 X 射线光强透射率已经非常低,而能量为 60 keV 的 X 射线光强透射率相对还比较高。

3.3 双能分析光栅的材料及厚度

当前 X 射线光栅相衬成像系统中,单能分析光栅和闪烁体各自独立,单能分析光栅产生 X 射线条纹,闪烁体将 X 射线转变为可见光条纹,最后由 CCD 进行成像。根据上文对双能分析光栅功能的定义,本节将单能分析光栅和闪烁体结合起来,设计了双能分析光栅,其结构及材料如图 6 所示。

低能栅条由硅和 CsI:Tl 晶体构成,CsI:Tl 晶体比较薄,可以将低能 X 射线转换为可见光,而高能 X 射线会直接穿透,不会产生可见光,或者产生可见光光子很少。根据图 3 的仿真结果及分析,在低能 X 射线为 20 keV、高能 X 射线为 60 keV 时,低能栅条 CsI:Tl 晶体厚度为 120 μm 最佳。

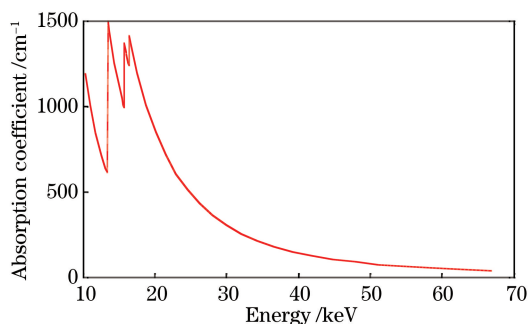


图 4 金属铋在不同能量下的吸收系数
Fig. 4 Absorption coefficient of Bi at different energy levels

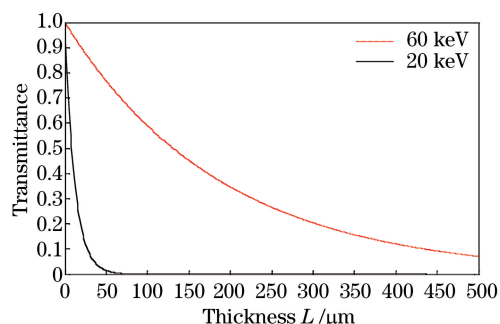


图 5 在不同能量下金属铋的厚度与光强透射率的关系
Fig. 5 Relationship between the thickness of Bi and the transmittance of light intensity at different energy levels

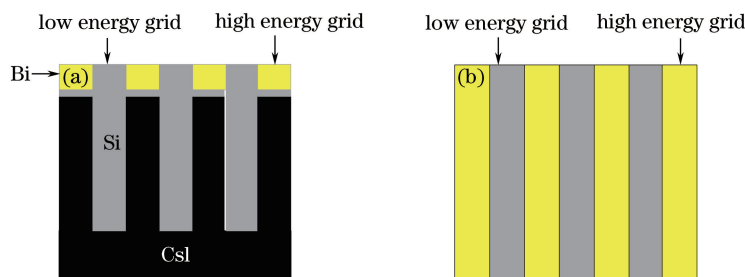


图 6 双能分析光栅的结构及材料。(a)俯视图;(b)主视图
Fig. 6 Structure and materials of dual energy analysis grating. (a) Top view; (b) front view

高能栅条由铋和 CsI:Tl 晶体构成,铋可以衰减低能 X 射线使其无法透过,而大部分高能 X 射线透过铋后由 CsI:Tl 晶体转换为可见光。根据图 5 的仿真结果,铋的厚度为 50 μm 时最佳。根据图 3 的仿真结果,高能栅条 CsI:Tl 晶体的厚度设置为 400 μm 较为合适。

4 双能分析光栅的仿真及性能分析

4.1 双能分析光栅的条纹成像仿真及分析

X 射线光栅成像系统的相位图像是由条纹图像进行提取的,条纹对比度越大,相衬成像的信噪比越高,因此条纹对比度是衡量光栅相衬成像系统性能的一个重要参数。对双能分析光栅在 X 射线能量为 20 keV 和 60 keV 时的成像条纹进行了仿真,结果如图 7 所示。

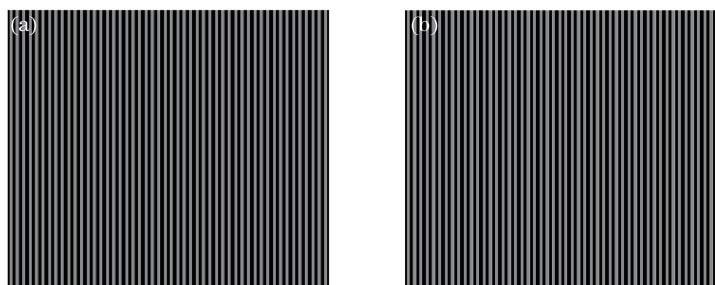


图 7 成像条纹。(a) X 射线能量为 20 keV;(b) X 射线能量为 60 keV
Fig. 7 Imaging fringe. (a) X-ray energy is 20 keV; (b) X-ray energy is 60 keV

由图 7 可见,当 X 射线能量为 20 keV 和 60 keV 时,成像系统可以得到较为清晰的条纹图像。根据条纹对比度^[11]计算式: $V=(I_{\max}-I_{\min})/(I_{\max}+I_{\min})$,式中 I_{\max} 为最大光强值, I_{\min} 为最小光强值,计算出 X 射线能量为 20 keV、60 keV 时的条纹对比度分别为 60% 和 33.3%。因为双能分析光栅的两种栅条在 X 射线照射下会产生不同数量的可见光子,因此降低了成像条纹对比度,获得的条纹对比度比采用单能分析光栅获

得的条纹对比度要低,但根据现有理论可知,以上两种条纹对比度都满足相位信息提取的要求^[12]。

低能栅条将部分高能量 X 射线转变为了可见光,而高能栅条对低能量 X 射线的阻挡效果相对较好,因此造成了两种 X 射线能量下获得的条纹对比度不一致的情况。在进行相位信息提取之前,会对成像数据进行归一化处理,因此虽然两种 X 射线能量下获得条纹对比度不一致,但并不影响相位信息提取。

4.2 双能 X 射线光栅相衬成像系统的仿真

为了验证设计的双能分析光栅的最终成像效果,将双能分析光栅应用于双能 X 射线光栅相衬成像系统,对系统的整体成像进行仿真。检测样本为聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 小球, X 射线低能和高能量分别为 20 keV 和 60 keV,由 $\lambda = (1.24 \times 10^{-9})/E$ 计算出 λ_L 和 λ_H 的值,成像距离为 $p_1^2/(8\lambda_H)$, p_1 为相位光栅的周期, $p_1 = 4 \mu\text{m}$,分析光栅周期为 $2 \mu\text{m}$, CCD 探测器像素尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 。

首先低能 X 射线曝光,获得一幅图像,然后高能 X 射线曝光,获得一幅图像。对两幅图像的数值进行归一化处理后,根据两步位移法提取相位信息,得到检测样本相衬成像的相位一阶导数分布图。仿真结果如图 8 所示。

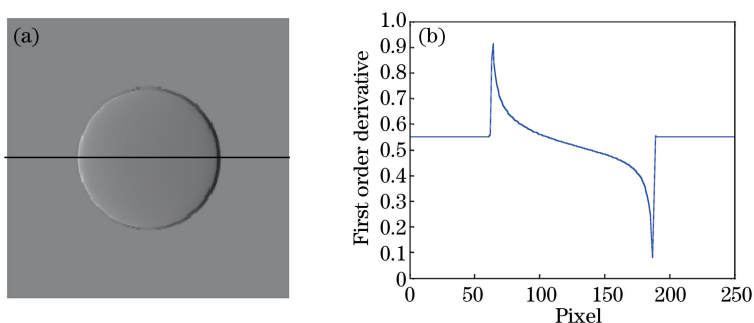


图 8 仿真结果。(a)小球相位一阶导数成像;(b)对应截面横线处的小球相位一阶导数分布

Fig. 8 Simulation results. (a) First order derivative imaging of the sphere phase;

(b) first order derivative distribution of the sphere phase at the corresponding cross section

图 8(a)为成像系统获得的小球相位一阶导数成像,图 8(b)为图 8(a)横线截面处相位一阶导数分布。由图 8(a)和(b)可见:1) 应用设计的双能分析光栅的相衬成像系统可以正确地成像,可以提取出检测样本的相位一阶导数图像;2) 获得的小球相位一阶导数成像以及球截面处提取的相位的一阶导数的变化趋势与文献[6]采用单能分析光栅、通过多步位移法进行仿真所获得的成像结果一致;3) 小球截面处提取的相位的一阶导数的变化趋势与文献[13]采用多步位移法提取相位信息所得的实验结果一致,因此提取的相位一阶导数分布能正确地反映出检测样本对 X 射线相位的改变。以上结果表明,所提出的双能分析光栅的设计方法是有效的、可行的。

5 结 论

设计了一种双能分析光栅,阐述了光栅的制作材料,对材料与 X 射线的相互作用进行了研究和仿真,进而提出了光栅厚度的计算方法。通过仿真证明,设计的双能分析光栅在两种 X 射线能量下都可以获得成像条纹,并且条纹对比度较好。将设计的双能分析光栅应用于双能 X 射线光栅相衬成像系统,仿真结果显示系统可以获得被测物体的相位一阶导数成像。因此,设计的双能分析光栅是有效的、可行的。下一步的工作是按照设计结果制作实际的双能分析光栅,并进行成像实验,推动双能 X 射线光栅相衬成像系统实用化进程。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Chen Bo, Zhu Peiping, Liu Yijin, *et al.* Theory and method of X-ray grating phase contrast imaging[J]. *Acta Physica*

- Sinica, 2008, 57(3): 1576-1581.
- 陈博, 朱佩平, 刘宜晋, 等. X 射线光栅相位成像的理论和方法[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1576-1581.
- [4] Li Jing, Liu Wenjie, Zhu Peiping, *et al.* Reconstruction algorithm of fan-beam helical X-ray computer tomography based on grating imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 421-427.
- 李镜, 刘文杰, 朱佩平, 等. 基于光栅相衬成像的扇束螺旋 CT 重建算法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 421-427.
- [5] Momose A, Kuwabara H, Yashiro W. X-ray phase imaging using Lau effect[J]. Applied Physics Express, 2011, 4(6): 066603.
- [6] Rong Feng, Xie Yanna, Tai Xuefeng, *et al.* Research on dual energy grating based X-ray phase contrast imaging[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(1): 018701.
- 荣锋, 谢艳娜, 邵雪凤, 等. 双能 X 射线光栅相衬成像的研究[J]. 物理学报, 2017, 66(1): 018701.
- [7] Yaroshenko A, Bech M, Potdevin G, *et al.* Non-binary phase gratings for X-ray imaging with a compact Talbot interferometer[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 547-556.
- [8] Xu Xiangyan, Niu Hanben. The fluorescence escape efficiency of CsI:Na (CsI:Tl) phosphor and its converting factor to X-rays[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2002, 19(3): 195-202.
- 徐向晏, 牛憨笨. CsI:Na (CsI:Tl) 荧光透过率和对 X 射线的转换因子[J]. 计算物理, 2002, 19(3): 195-202.
- [9] Stevels A L N, Schramad A D. Vapor-deposited CsI:Na layers; morphologic and crystallographic properties[J]. Philips Research Reports, 1974, 29(4): 340-352.
- [10] Boone J M, Chavez A E. Comparison of X-ray cross sections for diagnostic and therapeutic medical physics[J]. Medical Physics, 1996, 23(12): 1997-2005.
- [11] Huang Jianheng, Lei Yaohu, Du Yang, *et al.* Quantitative calculation of fringe visibility in bismuth grating-based X-ray phase-contrast imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0434001.
- 黄建衡, 雷耀虎, 杜杨, 等. 铋光栅 X 射线相衬成像条纹对比度的定量[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0434001.
- [12] Lei Yaohu, Huang Jianheng, Liu Xin, *et al.* Improvement of visibility of Moiré fringe in X-ray differential phase-contrast imaging[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2016, 33(5): 506-510.
- 雷耀虎, 黄建衡, 刘鑫, 等. X 射线微分相衬成像系统莫尔条纹对比度的改善[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2016, 33(5): 506-510.
- [13] Pfeiffer F, Weitkamp T, Bunk O, *et al.* Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources[J]. NaturePhysics, 2006, 2(4): 258-261.

问题:

[1]正文参考文献引用先有 9 后有 8

[2]图中的两个变量在图 1 上一段中需说明其物理意义(注意正斜体格式)。另外:图 2 中“CsI:Tl 层厚度”也为 L , 此处应另设一个变量

[3]图 2 中标出了两个 θ , 有误

[4](7)式下一段 I_{\max} 、 I_{\min} 的物理意义需说明