

双能 X 射线光栅相衬成像的研究

荣锋 谢艳娜 邵雪凤 耿磊

Research on dual energy grating based X-ray phase contrast imaging

Rong Feng Xie Yan-Na Tai Xue-Feng Geng Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 018701 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.018701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.018701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

X 射线光栅微分相衬成像视场分析

Quantitative analysis of the field of view for X-ray differential phase contrast imaging

物理学报.2016, 65(5): 058701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.058701>

基于对数解调的递变能量 CT 成像方法

CT imaging method with varying energy based on logarithm demodulation

物理学报.2015, 64(13): 138701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.138701>

一种基于 Radon 逆变换的半覆盖螺旋锥束 CT 重建算法

A half-covered helical cone-beam reconstruction algorithm based on the Radon inversion transformation

物理学报.2015, 64(5): 058704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.058704>

利用 Sagnac 干涉仪实现光子轨道角动量分束器

Realisation of orbital angular momentum sorter of photons based on sagnac interferometer

物理学报.2015, 64(13): 130704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130704>

一种超快时间分辨速度干涉仪的设计和理论研究

Design and theoretical research of an ultrafast time-resolved velocity interferometer

物理学报.2014, 63(6): 060703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.060703>

双能X射线光栅相衬成像的研究*

荣锋^{1)2)†} 谢艳娜¹⁾ 邵雪凤²⁾ 耿磊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)

(2016年7月8日收到; 2016年9月8日收到修改稿)

X射线光栅相衬成像存在系统复杂、成像效率低、步进精度要求高、光栅加工难度大等问题. 本文设计了一种双能阵列X射线源和双能分析光栅, 并应用于X射线光栅相衬成像, 提出了一种双能X射线光栅相衬成像系统, 阐述了该成像系统的成像原理和相位信息提取方法. 提出的成像系统不需要精密步进平台, 精简了成像系统, 避免了步进误差导致的成像质量降低问题; 两次曝光就可以成像, 提高了成像效率; 双能阵列X射线源、双能分析光栅的应用避免了源光栅、分析光栅难以加工的问题. 对提出的成像系统及其相位提取方法进行了仿真, 仿真结果显示成像系统可以正常成像, 提取到的检测样本的X射线相衬成像相位一阶导数分布与相关文献实验所得结果一致.

关键词: X射线相衬成像, 双能阵列X射线源, 双能分析光栅**PACS:** 87.59.-e, 07.60.Ly, 42.30.Rx, 87.57.-s**DOI:** 10.7498/aps.66.018701

1 引言

X射线成像技术广泛应用于材料科学、生命科学、工业检测等领域, 是研究物质内部结构不可或缺的重要工具^[1]. X射线与物质的相互作用可以用复折射率来表示, 即 $n = 1 - \alpha + i\beta$, 其中 β 为吸收因子, α 为相位因子, 它们分别表征了X射线透过物体之后的振幅和相位变化^[2]. 传统的X射线检测是基于物质对X射线的吸收差异成像, 但是由C, H, O, N等轻元素组成的物质对X射线的吸收比较微弱, 无法有效成像^[3]. 对于轻元素组成的物质, X射线相位的变化量是吸收变化量的一千到十万倍^[4]. 因此X射线相位衬度成像技术受到广泛关注和研究.

研究人员已经提出了多种X射线相位衬度成像的实现方法, 如晶体干涉仪成像法^[5]、衍射增强成像法^[6]、光栅相衬成像法^[7]、相位传播成像法^[8]

等. 2006年, Pfeiffer等^[9]将Talbot-Lau效应应用于光栅相衬成像法, 使该方法摆脱了同步辐射光源的限制, 可以采用普通X射线源成像, 极大地推动了这种成像方法的发展, 使这种方法成为最有可能获得实际应用的X射线相位衬度成像方法.

近几年, 光栅相衬成像的研究不断取得突破, 但是从实验室走向实际应用依然存在一些问题^[10]. 光栅相衬成像相位提取算法早期采用多步位移法. 2008年, 陈博等^[11]提出两步相移法; 2010年, 刘鑫等^[12]提出了两步任意位移法. 尽管光栅位移的步数越来越少, 但是成像系统依然需要精密步进平台, 增加了系统的复杂性, 多次步进和曝光使得成像效率低, 并增大了被测对象的受辐射量. 2010年, 朱佩平等^[13]提出的正反投影法不需要光栅步进, 该方法使相衬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, 实现也非常困难. 本文设计了一种双能阵列X射线源和双能分析光栅, 提出了一种双能X射线光栅相衬成

* 国家自然科学基金青年基金(批准号: 61405144)、天津市科委青年基金(批准号: 15JCQNJC42100)和天津市科技特派员项目(批准号: 15JCTPJC56300)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shusheng677@163.com

像系统. 该成像系统可以不动光栅, 不旋转被测物体和探测器, 两次曝光即可成像, 简化了成像系统, 提高了检测效率.

2 双能X射线光栅相衬成像系统及原理

2.1 双能X射线光栅相位衬度成像系统

当前国内外研究机构构建的典型的X射线光栅相衬成像平台主要包含X射线源、源光栅、自成像光栅、分析光栅、精密步进平台、电荷耦合器件(CCD)探测器几个部分^[14]. 成像过程为分析光栅通过步进获得条纹图像, 根据多幅条纹图像提取相位信息, 生成相衬图像. 本文设计了一种双能阵列X射线源和双能分析光栅, 应用于X射线光栅相衬成像系统. 采用双能阵列X射线源和双能分析光栅改进后的X射线光栅相衬成像系统, 本文称之为双能X射线光栅相衬成像系统. 改进后的成像系统如图1, 包含双能阵列X射线源、自成像光栅、双能分析光栅、CCD探测器几个部分.

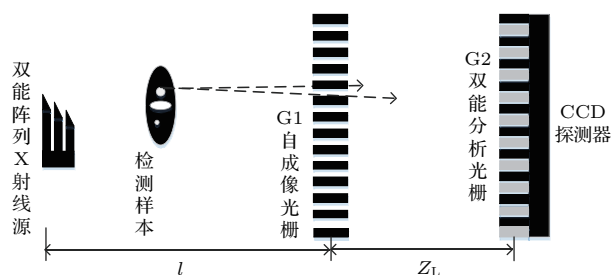


图1 双能X射线光栅相衬成像系统

Fig. 1. Dual energy X-ray grating imaging system.

文献^[15]提出了一种阵列X射线源, 并进行了实验研究. 阵列X射线源可以替代X射线光栅相位成像系统的X射线源和源光栅, 简化了成像系统, 避免了源光栅不能完全吸收高能X射线的问题. 双能X射线源是指可以发出两种能级的X射线源, 在骨密度检测、物质识别等仪器上已经大量应用. 基于以上两种X射线源, 本文提出一种双能阵列X射线源, 光源靶结构与文献^[15]一样, 只是可以调节管电压发出两种不同能级的X射线结构光. 根据X射线光栅相衬成像理论可知, X射线波长决定了光栅自成像Talbot距离, 双能阵列X射线成像系统中需要精确控制两种能级的X射线的波长同时满足光栅自成像Talbot距离.

大面积、适合硬X射线成像应用的分析光栅制作工艺非常复杂, 且成本很高. 文献^[16]利用制作X射线转换屏的荧光材料制作分析光栅, 提出了一种无吸收光栅的X射线光栅相衬成像系统. 本文将该种材料制作的栅条称之为单能栅条, 该种栅条制作的光栅称之为单能分析光栅, 其光栅结构如图2(a). 这种分析光栅可以克服光能利用率由于多级耦合而降低的缺点, 更适合硬X射线相衬成像. X射线转换屏的制作材料有很多种, 有些材料适合高能级X射线成像, 有些材料适合低能级X射线成像. 双能X射线成像系统中同时采用两种转换屏, 实现不同能级的X射线成像. 基于以上研究, 本文提出了一种双能分析光栅, 光栅由高能栅条和低能栅条交错分布而成, 结构如图2(b). 高能栅条可以将高能X射线转换为可见光, 对于低能X射线相当于不透光栅条; 低能栅条可以将低能X射线转换为可见光, 对于高能X射线相当于不透光栅条. 双能分析光栅替代传统X射线光栅相衬成像系统中的分析光栅和CCD探测器转换屏.

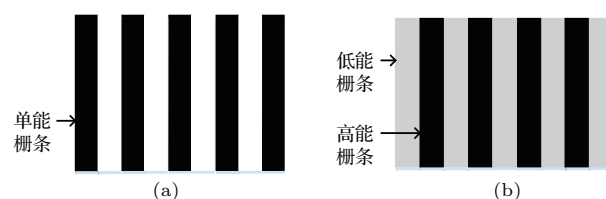


图2 (a) 单能分析光栅; (b) 双能分析光栅

Fig. 2. (a) Single energy analysis of grating; (b) dual energy analysis of grating.

双能X射线光栅相衬度成像系统的成像过程如下: 双能阵列X射线光源发出低能X射线结构光, CCD探测器记录一幅图像; 双能阵列X射线光源发出高能X射线结构光, CCD探测器记录一幅图像. 根据两幅图像提取相位信息, 生成相衬图像.

2.2 双能X射线光栅相衬成像原理

本文提出的双能X射线光栅相衬成像系统依然利用Talbot-Lau效应设计成像光路. Talbot效应的自成像有确定的成像距离和成像周期, 提出的成像系统必须在高能、低能两种能级下有共同的成像距离和成像周期才能成像.

双能阵列X射线源发出低能X射线的波长表示为 λ_l , 发出高能X射线的波长表示为 λ_h , λ_l 和 λ_h 为两种不同管电压下的中心波长. 光栅自成像

Talbot 距离表示为^[17]

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

(1) 式中 d_m 为成像距离, m 和 ζ 为整数, p 为光栅周期, λ 为波长.

当图 1 成像系统的自成像光栅采用振幅光栅时, m 须为偶数, ζ 为 1, 自成像周期为振幅光栅周期. 由 (1) 式可知, 当 $\lambda_l = 2\lambda_h$ 时, 高能 X 射线成像 Talbot 距离和低能 X 射线成像 Talbot 距离一致, 并且成像周期一样. 当成像光栅为 $\pi/2$ 相位光栅时, m 为奇数, ζ 为 1, 自成像周期为相位光栅周期; 当成像光栅为 π 相位光栅时, m 为奇数, ζ 为 2, 自成像周期为相位光栅周期一半. 当两种能级 X 射线波长满足 $\lambda_l = 3\lambda_h$ 时, 由 (1) 式可知, 两种能级下相位光栅自成像在同一位置.

出于光能利用率和光栅的衍射效率考虑, 自成像光栅一般选择 π 相位光栅. 相位光栅的相位值和光栅的厚度、X 射线波长有关. 相位光栅的材料和厚度一定并且两种能级 X 射线波长满足 $\lambda_l = 3\lambda_h$ 时, 对于低能 X 射线, 相位光栅为 π 相位, 则对于高能 X 射线, 相位光栅为 3π 相位, 由文献 [18] 可知 π 相位和 3π 相位光栅的自成像成像周期一致.

由以上分析可见, 两种能级 X 射线波长满足一定条件时, 可以在同一 Talbot 成像距离上出现 Talbot 效应自成像, 且成像周期一致. 结合上文对于双能分析光栅的设计可知, 无论是低能还是高能 X 射线曝光成像, 成像过程和传统的 X 射线光栅相衬成像的成像过程一样, 肯定可以获得条纹图像. 下面的问题是如何利用条纹图像提取相位信息.

3 双能 X 射线光栅相衬成像系统相位提取方法

相位步进法是 X 射线光栅相衬成像相位信息提取最通用的方法^[19], 其原理如图 3 所示. 在没有被测物体的情况下, 多次步进分析光栅得到背景位移曲线; 放置被测物体后, 多次步进分析光栅, 得到物体位移曲线. 两条位移曲线的幅值变化蕴含被测物体对 X 射线的衰减信息; 相位变化 (图 3 中 $\Delta\phi$) 蕴含被测物体对 X 射线的折射信息.

早期一般采用多步位移法提取相位信息, 导致曝光时间和成像时间比较长. 随着研究的深入,

2008 年陈博等^[11]提出了两步位移法, 实质是得到位移曲线左右两个半腰的值就可以确定位移曲线, 进而提取相位信息. 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.

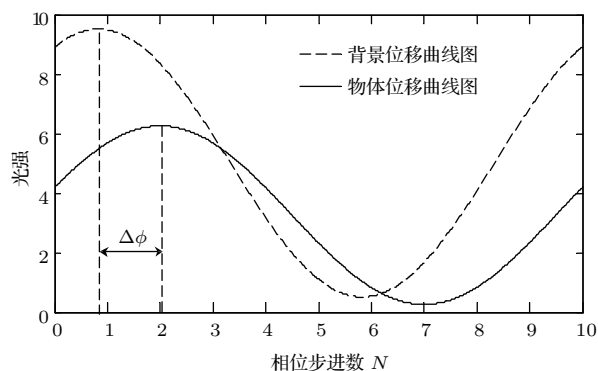


图 3 相位步进法原理示意图

Fig. 3. Schematic diagram of X-ray phase stepping method.

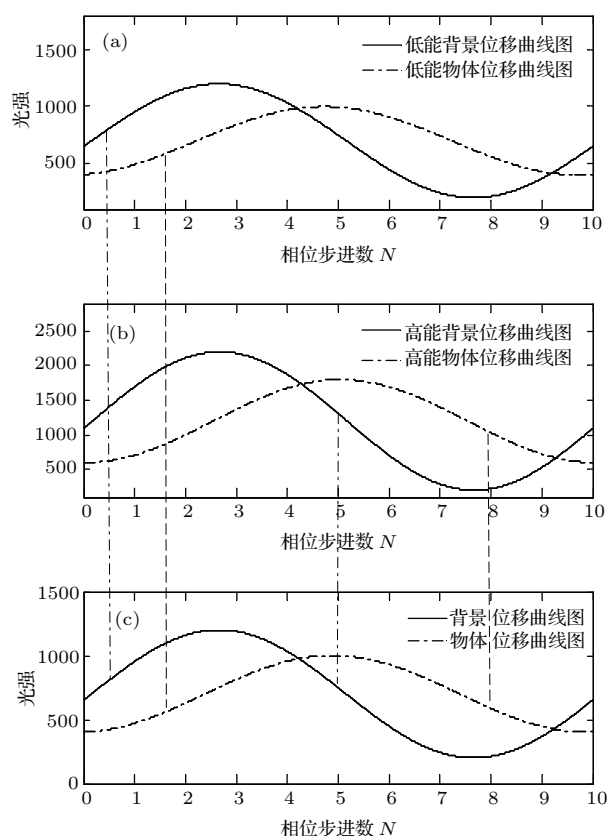


图 4 双能 X 射线相衬成像相位提取方法原理

Fig. 4. Dual energy X-ray phase stepping method.

借鉴上文所述的两步位移法, 本文提出了一种双能 X 射线光栅相衬成像系统的相位提取方法. 相位提取方法的原理如下: 如图 4(a), X 射线源发出低能 X 射线, 可以得到该能级下的背景位移曲线和

物体位移曲线;如图4(b), X射线源发出高能X射线, 同样可以得到该能级下的背景位移曲线和物体位移曲线. 对以上四条曲线做归一化处理, 采用低能X射线的背景位移曲线的左半腰的点和高能X射线的背景位移曲线的右半腰的点可以得到一条新的背景位移曲线, 如图4(c); 同样, 采用低能X射线的物体位移曲线的左半腰的点和高能X射线的物体位移曲线的右半腰的点可以得到一条新的物体位移曲线如图4(c). 这两条新的曲线同样存在相位位移, 可以提取相位信息. 在实际的成像检测过程中, 背景位移曲线为已知量, 因此只需要得到上面图4(c)中物体位移曲线两个半腰点的值就可以完成相位提取.

根据上文双能分析光栅的设计结构可知, 本文提出的成像系统不需要移动光栅就可以得到以上两个半腰点的值. 图5(a)表示低能X射线成像, 双能分析光栅的高能栅条相当于传统分析光栅的吸收栅条, 低能栅条相当于透光空隙; 图5(b)表示高能X射线成像, 双能分析光栅的低能栅条相当于传统分析光栅的吸收栅条, 高能栅条相当于透光空隙. 假如低能X射线曝光时分析光栅的位移曲线处

于左半腰位置, 则高能X射线曝光分析光栅的位移曲线必定处于右半腰位置. 因此只需要在成像系统搭建时将分析光栅定位到半腰位置, 在检测物体时就可以不用移动光栅, 低能、高能X射线分别两次曝光就可以得到物体位移曲线的两个半腰值.

双能X射线光栅相衬成像系统相位信息提取具体的计算方法与两步位移法类似, 不同之处在于本文的成像系统两次曝光所使用的X射线能级不同, 需要根据两种能级下的背景曲线获得归一化参数, 对两次曝光值进行归一化处理. 归一化物体位移曲线左半腰的值表示为 I_L , 右半腰的值表示为 I_R , 相位位移量计算如下

$$\Delta\varphi(x, y) = \eta \frac{I_L - I_R}{I_R + I_L}, \quad (2)$$

其中 η 为常量, $\Delta\varphi(x, y)$ 为X射线穿过检测样本的相位移动量. 由光栅相位成像理论可知, $\Delta\varphi(x, y)$ 与X射线折射角成线性关系, X射线折射角为物体对射线相位调制量的一阶导数. 因此由 $\Delta\varphi(x, y)$ 可以得到相位调制量的一阶导数成像, 或者称之为样本相衬成像相位一阶导数分布.

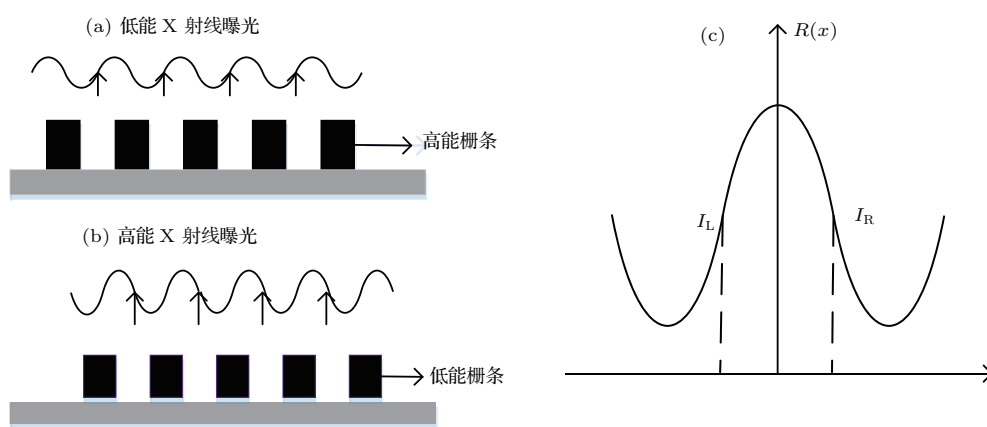


图5 左右半腰成像示意图 (a) 左半腰成像示意图; (b) 右半腰成像示意图; (c) 物体位移曲线示意图

Fig. 5. Schematic diagram of the left and right lumbar imaging: (a) Procedure for sampling fringe at the up-slope region; (b) procedure for sampling fringe at the down-slope region; (c) object shifting curve.

4 双能X射线光栅相衬成像系统成像模拟与分析

为了验证本文提出的成像系统的成像理论和相位信息提取方法, 对成像系统进行了仿真.

检测样本为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)小球, X射线低能和高能能级分别为20 keV和60 keV, 由 $\lambda = \frac{1.24 \times 10^{-9}}{\text{X射线能量(keV)}}$ 计算 λ_l , λ_h 的值, 成像距离为 $p_1^2/(8\lambda_h)$, P_1 为相位光栅, 周期为4 μm , 分析光栅周期为2 μm , CCD探测器像素尺寸为20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$.

仿真光路及其计算如下.

1) X射线透射检测样本, 检测样本的折射率函数表示为 $\exp(i \times k \times n_1 \times \text{thickness})$, 其中 $k = 2\pi/\lambda$, thickness 为X射线穿过的检测样本的厚度, $n_1 = n - 1$ 为检测样本折射率减去真空折射率.

2) 透射检测样本的X射线经过相位光栅, 相位光栅的传递函数为 $\exp(i \times \phi)$, ϕ 为相位光栅的相位值. 经过相位光栅后的波阵面表示为 $U_0(x_0, y_0)$, X射线在相位光栅后的传播符合菲涅耳衍射条件, 脉冲响应为^[20]

$$h(x, y) = \frac{\exp(ikd)}{i\lambda d} \exp\left[\frac{ik(x^2 + y^2)}{2d}\right]. \quad (3)$$

(3) 式中 d 表示传播距离; x, y 分别表示衍射 d 距离处的波阵面坐标. 衍射波阵面的计算在时域为卷积, 出于计算机处理速度的考虑, 采用抗欠采样能力较强的D-FFT算法变换到频域处理^[21]. 对(3)式进行傅里叶变换:

$$H(u, v) = \exp\left\{ikd\left[1 - \frac{\lambda^2}{2}(u^2 + v^2)\right]\right\}, \quad (4)$$

式中 u, v 分别代表 x, y 相对应的空间频率. 传播Talbot距离 (d_m) 后的波阵面为^[22]

$$\begin{aligned} U_1(x_1, y_1) &= \text{FFT}^{-1}\left\{\text{FFT}\left\{U_0(x_0, y_0)\right\}\right. \\ &\quad \times \exp\left\{ikd\left[1 - \frac{\lambda^2}{2}(u^2 + v^2)\right]\right\}\left.\right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

3) $U_1(x_1, y_1)$ 为包含检测样本信息的Talbot自成像, 经过分析光栅, 与分析光栅传递函数卷积. 分析光栅的传递函数透光部分为1, 不透光部分为0.

4) 计算经过分析光栅之后的波阵面在CCD探测器的成像, 成像值由分析光栅周期、CDD像素的尺寸、Talbot自成像条纹与分析光栅相对位置决定.

仿真步骤如下:

步骤1 采用传统多步位移法得到低能X射线下检测样本相衬成像相位一阶导数分布;

步骤2 采用传统多步位移法得到高能X射线下检测样本相衬成像相位一阶导数分布;

步骤3 以上两步分别得到了低能和高能X射线下背景位移曲线和检测样本的物体位移曲线, 根据上文图4示意的相位提取方法, 对低能X射线物体位移曲线左半腰值和高能X射线物体位移曲线右半腰的值进行归一化处理, 根据(2)式计算相位

移动量, 得到双能X射线成像时检测样本相衬成像的相位一阶导数分布.

仿真光源发出的柱面光在分数Talbot距离处的强度分布如图6. 从图中可以看出, 在成像距离处出现了干涉条纹, 条纹扭曲部分包含了检测样本的相位信息.

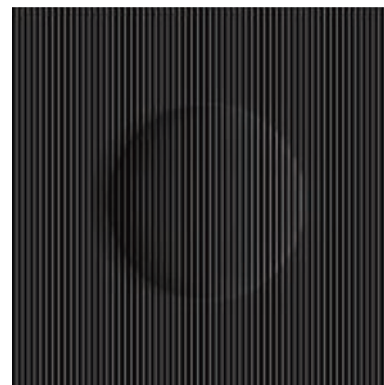


图6 分析光栅前获得的强度分布图

Fig. 6. Intensity distribution obtained before the analysis grating.

仿真结果如图7所示. 图7(a)和图7(b)是仿真步骤1的仿真结果, 图7(a)为低能X射线下多步位移法提取的小球相衬成像相位一阶导数分布, 图7(b)为图7(a)横线截面处的相位一阶导数分布. 图7(c)和图7(d)是仿真步骤2的仿真结果, 图7(c)为高能X射线下多步位移法提取的小球相衬成像相位一阶导数分布, 图7(d)为图7(c)横线截面处相位一阶导数分布. 以上仿真结果与文献[7]中PMMA小球的光栅相衬成像实验得到的结果进行对比, 相位一阶导数分布、小球截面处提取的相位的一阶导数的变化趋势都与实验结果一致, 由此可以证明本文的仿真方法是正确的.

图7(e)为采用本文提出的成像系统和相位提取方法获得的小球相衬成像相位一阶导数分布, 图7(f)为图7(e)横线截面处相位一阶导数分布. 由图7(e)和图7(f)可见: 1) 本文提出的成像系统可以正确地成像, 相位提取方法可以提取出检测样本的相衬成像相位一阶导数分布; 2) 提取的相位一阶导数分布能正确反映出检测样本对X射线相位改变的形态分布; 3) 小球截面处提取的相位的一阶导数的变化趋势与高、低能X射线成像仿真、文献[7]的实验结果一致. 以上三点可以证明本文提出的成像系统的成像理论是正确的, 相位信息提取方法是可行的.

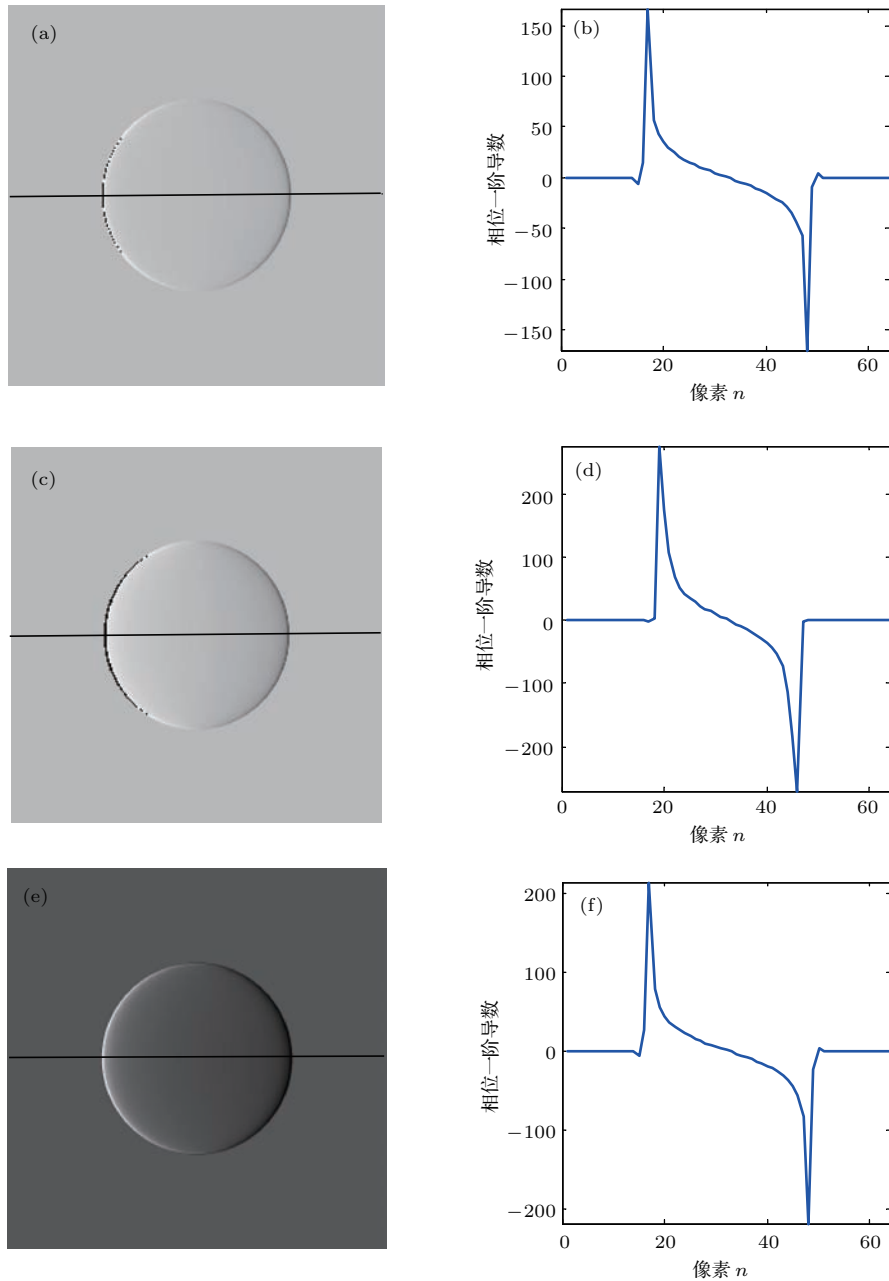


图7 仿真结果 (a) 低能 X 射线多步位移法提取的小球相位一阶导数分布; (b) 高能 X 射线多步位移法提取的小球相位一阶导数分布; (c) 双能 X 射线法提取的小球相位一阶导数分布; (b), (d), (f) 分别为 (a), (c), (e) 对应截面横线处的小球相位一阶导数分布

Fig. 7. Simulation results: (a) The first order derivative distribution of small ball phase extracted by low energy X-ray phase-stepping method; (b) the first order derivative distribution of small ball phase extracted by high energy X-ray phase-stepping method; (c) the first order derivative distribution of the sphere phase extracted by the dual energy X-ray method; the images are represented on a linear greyscale (b), (d), (f) section profiles through the corresponding image data of the PMMA sphere.

5 结 论

本文设计了一种双能阵列 X 射线源和双能分析光栅, 阐述了其结构和应用方法. 基于以上设计提出了一种双能 X 射线光栅相衬成像系统. 借鉴两

步位移相位提取法, 提出了该成像系统的相位信息提取方法. 提出的成像系统在成像的过程中不需要精密步进平台, 减少了成像时间, 降低了对检测样本的辐射剂量, 避免了步进误差导致的成像质量降低等问题. 对提出的成像系统及相位提取方法进行了仿真, 仿真结果表明成像系统可以正常成像, 提

取到的检测样本相位一阶导数分布及其分布趋势与其他文献实验所得结果一致. 理论分析和仿真证明了本文提出的成像系统的可行性, 但是在实际实现过程中还存在很多困难, 比如双能阵列 X 射线源出射光束波长的精确控制、双能分析光栅的加工工艺等, 需要进一步研究并解决.

参考文献

- [1] Momose A, Fukuda J 1995 *Med. Phys.* **22** 375
- [2] David C, Nöhammer B, Solak H H, Ziegler E 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3287
- [3] Schofield M A, Zhua Y 2003 *Opt. Lett.* **28** 1194
- [4] Wilkins S W, Gureyev T E, Gao D, Pogany A, Stevenson W 1996 *Nature* **384** 335
- [5] Pogany A, Gao D, Wilkins S W 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 2774
- [6] Zanette I, Weitkamp T, Donath T, Rutishauser S, David C 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 248102
- [7] Pfeiffer F, Bech M, Bunk O, Kraft P, Eikenberry E F, Brönnimann C, Grünzweig C, David C 2008 *Nat. Mat.* **7** 134
- [8] Thuering T, Modregger P, Grund T, Kenntner J, David C, Stampanoni M 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 041111
- [9] Pfeiffer F, Weitkamp T, Bunk O, David C 2006 *Nat. Phys.* **2** 258
- [10] Revol V, Kottler C, Kaufmann R, Straumann U, Urban C 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 073709
- [11] Chen B, Zhu P P, Liu Y J, Wang J Y, Yuan Q X, Huang W X, Ming H, Wu Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1576 (in Chinese) [陈博, 朱佩平, 刘宜晋, 王寓越, 袁清习, 黄万霞, 明海, 吴白玉 2008 物理学报 **57** 1576]
- [12] Liu X, Lei Y H, Zhao Z G, Guo J C, Niu H B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6927 (in Chinese) [刘鑫, 雷耀虎, 赵志刚, 郭金川, 牛憨笨 2010 物理学报 **59** 6927]
- [13] Li J, Liu W J, Zhu P P, Sun Y 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 421 (in Chinese) [李镜, 刘文杰, 朱佩平, 孙怡 2010 光学学报 **30** 421]
- [14] Donath T, Pfeiffer F, Bunk O, Grünzweig C, Hempel E, Popescu S, Vock P, David C 2010 *Invest. Radiol.* **45** 445
- [15] Liu X, Guo J C, Lei Y H, Du Y, Niu H B 2012 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **691** 86
- [16] Du Y, Huang J H, Lin D Y, Niu H B 2012 *Anal. Bioanal. Chem.* **404** 793
- [17] Bennett E, Kopace R, Stein A, Wen H 2010 *Med. Phys.* **37** 6047
- [18] Andre Y, Martin B, Guillaume P, Andreas M, Thomas B, Johannes W, Arne T, Markus S, Jan M, Danays K, Maximilian A, Juergen M, Pfeiffer F 2014 *Opt. Express* **22** 547
- [19] Christian K, Vincent R, Rolf K, Claus U 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 114906
- [20] Wen H, Bennett E, Kopace R, Stein F, Pai V 2010 *Opt. Lett.* **35** 1932
- [21] Li T T, Li H, Diao L H 2009 *J. Syst. Sim.* **21** 32 (in Chinese) [李涛涛, 李华, 刁麓弘 2009 系统仿真学报 **21** 32]
- [22] Stutman D, Finkenthal M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 091108

Research on dual energy grating based X-ray phase contrast imaging*

Rong Feng^{1)2)†} Xie Yan-Na¹⁾ Tai Xue-Feng²⁾ Geng Lei¹⁾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)

(Received 8 July 2016; revised manuscript received 8 September 2016)

Abstract

There exist some problems in a grating-based X-ray differential phase contrast imaging system, such as complex imaging system, low imaging efficiency and high requirements for step precision. The phase information extraction method of imaging system has been developed into an existing two-stepping phase shift method from the original phase stepping method, which improves the imaging efficiency and reduces the imaging radiation dose and imaging time. However, the method of two-stepping phase shift still needs to move the grating, and the requirement for accuracy of the step position is also very high. According to the problems mentioned above, in this paper we propose a dual energy multi-line X-ray source and a dual energy analysis grating. The dual energy multi-line X-ray source can emit two different levels of X-ray structure light, which can replace the X-ray source and source grating. The dual energy analysis grating is composed of two different types of scintillator materials, which are in staggered distribution. One is scintillator material that can transform high energy X-ray into visible light, and the other one can convert low energy X-ray into visible light. The dual energy analysis grating can replace traditional analysis grating and the conversion screen of X-ray CCD detector. By using the dual energy multi-line X-ray source and dual energy analysis grating in grating-based X-ray differential phase contrast imaging system, a dual energy grating-based X-ray phase contrast imaging system is proposed in this paper. In addition, in this paper we show the structure and imaging principle of the imaging system. The imaging system can achieve high and low energy X-ray imaging without moving grating. Two levels of X-ray imaging are equivalent to the analysis grating displacement π phase, which is in line with the traditional two-stepping method of two image phase shift requirements. Therefore, after the normalization processing of the two kinds of energies, the phase information can be extracted by the traditional two-stepping phase shift method. In order to validate the correctnesses of the imaging principle of the proposed imaging system and extraction method of phase information, the imaging system is simulated. The simulation is performed on the assumption that an X-ray beam passes through a polymethyl methacrylate sphere as a phase specimen, and the method is adopted by using the proposed dual energy X-ray about left and right lumbar imaging to extract phase information. The simulation result shows that the imaging system can realize normal imaging, and the first-order derivative distribution of the sphere phase extracted by the dual energy X-ray method is consistent with the experimental result.

Keywords: grating-based X-ray phase contrast imaging system, dual energy multi-line X-ray source, dual energy analysis grating

PACS: 87.59.-e, 07.60.Ly, 42.30.Rx, 87.57.-s

DOI: 10.7498/aps.66.018701

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61405144), the Young Scientists Fund of the Tianjin Municipal Science and Technology Commission, China (Grant No. 15JCQNJC42100), and the Tianjin Science and Technology Commissioner Project, China (Grant No. 15JCTPJC56300).

† Corresponding author. E-mail: shusheng677@163.com