

低成本高效率 X 射线相衬成像技术研究

杜 杨 刘 鑫 雷耀虎 黄建衡 赵志刚 林丹樱 郭金川 李 冀* 牛憨笨

深圳大学光电工程学院, 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 X 射线光栅微分相衬成像技术对由轻元素构成的物质的内部探测具有传统吸收成像无法比拟的优势, 在材料领域、安检领域以及医疗领域具有广阔的应用前景。吸收光栅是系统中的关键光学器件, 其制作难度大、成本高, 并且吸收光栅不能完全吸收高能 X 射线而导致图像衬度和检测灵敏度下降, 限制了该技术的发展应用。针对上述问题, 基于自主研制的低成本铍材料源光栅和能够克服高能 X 射线限制的具有分析光栅功能的结构化转换屏, 提出了低成本、高效率的 X 射线光栅微分相衬成像方法, 在实验上获得了高质量的相衬图像。

关键词 射线光学; 铍光栅; 结构化转换屏; X 射线微分相衬成像

中图分类号 O434.19

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0334001

Low Cost and High Efficiency Method for X-ray Phase Contrast Imaging

Du Yang Liu Xin Lei Yaohu Huang Jianheng Zhao Zhigang
Lin Danying Guo Jinchuan Li Ji Niu Hanben

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

Abstract Grating-based X-ray differential phase contrast imaging has great advantages of detecting the low-Z materials compared with conventional X-ray absorption imaging. It has potential applications in the field of materials, security and medical diagnostics. The fabrication process of absorption grating which is a critical optical component in the system is difficult and costly, and the absorption grating cannot completely absorb high-energy X-rays that results in the decrease of image contrast and detection sensitivity, which has been a great obstacle for the practical application. In view of above problems, a low cost and high efficiency approach based on Bi-source grating and structured scintillator is proposed. The scintillator overcomes the limitation of high-energy X-rays and proposes the function of analyzer grating. This approach obtains high quality phase contrast image experimentally.

Key words X-ray optics; Bi-grating; structured scintillator; X-ray differential phase contrast imaging

OCIS codes 340.7440; 180.7460; 050.1950

1 引 言

X 射线成像技术在医学检查、工业无损探伤、安检等领域一直发挥着重要的作用。传统 X 射线成像的物理机制是利用 X 射线透过物体后的衰减差异而形成图像衬度。然而, 对于由轻元素为主要成分构成的物质, 例如材料领域中光纤材料、碳纤维材料及器件、硅材料及器件和有机材料及器件等, 医疗领域中人体的软骨、血管、软组织和早期肿瘤等, 它们对 X 射线的吸收差异很小, 很难形成清晰的图像。X 射线相衬成像技

收稿日期: 2015-09-09; 收到修改稿日期: 2015-10-19

基金项目: 国家 973 计划(2012CB825804)、国家自然科学基金科学仪器基础研究专款(61227802)、国家自然科学基金(11074172)、国家自然科学基金青年科学基金(11404221)、中国博士后面上基金(2014M562204)、中国博士后基金特别资助(2015T80914)、深圳市科创委基础研究项目基金(JCYJ20150525092941019)

作者简介: 杜 杨(1983—), 男, 博士, 主要从事 X 射线光栅微分相衬成像方面的研究。E-mail: wolfdyuyang@163.com

*通信联系人。E-mail: lij@szu.edu.cn

术是近年来发展较快的一种新的成像方法,是对常规X射线成像技术的重大发展。它利用X射线透过物体后产生的相位变化对物体进行成像,由于X射线对轻元素物质的相位因子 δ 改变量要比吸收因子 β 改变量大1000倍以上^[1],就轻元素而言,X射线相衬成像技术要比传统的吸收成像技术更加灵敏。

目前,研究X射线相衬成像的方法主要有晶体干涉法^[2-4]、衍射增强法^[5-7]、同轴相位传播法^[8,9]和光栅微分相衬成像法^[10-24]。由于X射线相衬成像对光源的相干性和亮度提出很高要求,所以大部分实验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。其中,由Pfeiffer等^[12,13]提出的基于Talbot-Lau原理的光栅微分相衬成像法突破了同步辐射源和微焦点源的限制,可以在常规X射线源上实现,被认为是最有希望走向实际应用的方

法。尽管Pfeiffer等提出的新兴方法令人看到了广阔的应用前景,然而,该方法发展至今仍然没有真正进行实际应用。主要原因是受到符合使用要求的X射线光栅器件的限制。系统中所必需的光栅器件(源光栅和分析光栅)通常采用贵金属金(Au)作为吸收材料,尤其是分析光栅器件,由于目前工艺水平所制作的光栅深度有限,从而使分析光栅不能完全吸收高能X射线,导致图像衬度和检测灵敏度严重下降,只能在X射线能量不高的条件下才能得到质量较好的图像,不能满足实际应用中

对高能X射线的要求。本文针对以上问题,基于自主研制的铋材料源光栅和具有分析光栅功能的结构化转换屏,提出一种具有低成本和高效率特性的X射线光栅微分相衬成像方法,在理论上分析该方法的可行性,并在实验上进行验证。它不仅大大降低了光栅的制作难度和成本,而且有效克服了高能X射线的限制。

2 光栅微分相衬成像基本原理

光栅微分相衬成像系统原理如图1所示,其中 S_0 为常规X射线源, G_0 、 G_1 和 G_2 分别为源光栅、相位光栅和分析光栅,它们的周期分别为 p_0 、 p_1 和 p_2 ,占空比分别为 γ_0 、 γ_1 和 γ_2 。 S_0 到 G_0 的距离为 z_0 , G_0 到 G_1 的距离为 z_1 , G_1 到 G_2 的距离为 z_2 。

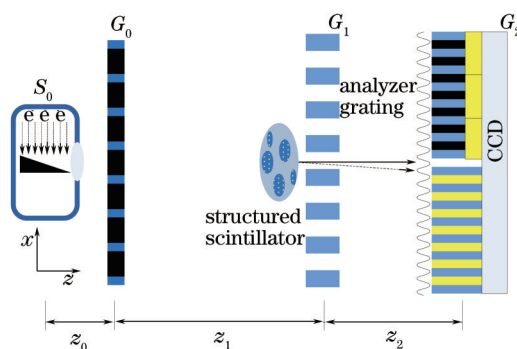


图1 基于铋材料源光栅和结构化转换屏的X射线微分相衬成像系统原理

Fig.1 Principle of X-ray differential phase contrast imaging system based on Bi-source grating and structured scintillator

G_0 的实质是振幅光栅,它起到分束器的作用,将X射线源分成周期阵列结构线光源,每个线光源的宽度为 $p_0\gamma_0$,需要满足相位光栅Talbot自成像对空间相干性的要求:

$$\xi = \frac{z_1}{p_0\gamma_0} \lambda_c \geq p_1, \quad (1)$$

式中 ξ 为空间相干长度, λ_c 为射线源的中心波长。而不同的线光源之间彼此相互独立,不具有空间相干性。线光源透过相位光栅之后,根据Talbot效应原理,在相位光栅后一阶分数Talbot距离位置会形成相位光栅的自成像条纹。当相位光栅的相位值为 π 时,相位光栅具有最大的衍射效率^[10],在锥束X射线源条件下,一阶分数Talbot距离和自成像的周期为:

$$z_2 = M \frac{p_1^2}{8\lambda_c}, p_2 = M \frac{p_1}{2}, \quad (2)$$

式中 M 表示几何放大倍率,其表达式为:

$$M = \frac{z_1 + z_2}{z_1}, \quad (3)$$

为了使不同线光源产生的自成像条纹产生叠加增强的效果,要满足特定的几何比例关系,该几何比例关系式为:

$$\frac{p_0}{p_2} = \frac{z_1}{z_2}, \quad (4)$$

由于相位光栅自成像的周期很小,传统的X射线探测器无法分辨。因此,在相位光栅自成像处放置和相位光栅自成像条纹周期和占空比相同的分析光栅来形成可探测的大周期叠栅条纹。当X射线透过物体后,产生的微小折射会引起叠栅条纹形变,采用多步相移算法,便可以同时得到物体的吸收、相位和暗场图像。

3 光栅器件

3.1 铋材料源光栅

在实际中,系统中的吸收光栅器件(G_0 和 G_2)成为限制光栅微分相衬成像方法应用的重要因素。吸收光栅通常采用LIGA技术在硅基光栅中电镀金的方法制作^[25],这种方法依赖于同步辐射源,并使用贵金属金作为X射线吸收材料,其制作工艺复杂,成本高昂,尤其制作对深宽比要求较高的分析光栅,目前仍然是一项巨大的挑战。

为此,本课题组提出了一种高温真空微填充技术制作吸收光栅的方法^[26-27]。采用金属铋代替金作为X射线吸收材料,它不依赖于同步辐射源,在普通实验室便可以实现,具有成本低、制作面积大的优点。实际上,金属金、铅和铋都是对X射线吸收较强的材料,根据对X射线的线性吸收系数可计算出它们对X射线的吸收特性,如图2所示。

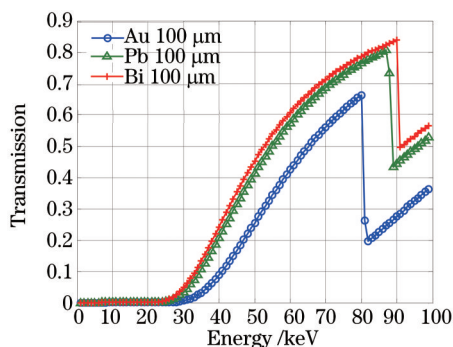


图2 金、铅和铋三种材料对X射线的吸收特性,图中金、铅和铋三种材料分别用蓝色、绿色和红色表示,它们的厚度均为100 μm。横坐标表示X射线的光子能量,纵坐标表示材料对X射线的透过率

Fig.2 X-ray absorption characteristic of Au, Pb and Bi. The thickness of the materials is 100 μm, and they are denoted by blue, green and red, respectively. The horizontal axis represents X-ray photon energies, and the ordinate axis represents the transmissivity of materials to X-rays

当X射线光子能量小于30 keV时,这三种金属对X射线的吸收系数相差不大,当高于30 keV时,金的优势明显,铅和铋的吸收性能相当,虽然在性能上铅和铋略逊于金,但它们价格低廉,性价比高。由于铋材料的熔点较低,相比铅材料更环保,所以采用铋作为X射线吸收光栅的材料,将熔化后的铋直接填入表面改性的硅基光栅结构中来制作源光栅,同金属材料源光栅的性能相当。

3.2 具有分析光栅功能的结构化转换屏

分析光栅的主要作用是和相位光栅自成像条纹形成可探测的大周期叠栅条纹,如图1所示,X射线透过分析光栅之后,经过X射线荧光屏转换为可见光,当X射线能量增大时,分析光栅的深度不足以吸收高能X射线,导致叠栅条纹对比度下降从而降低探测灵敏度和相衬图像质量,这也是影响图像衬度的重要因素之一。具有分析光栅功能的结构化转换屏将吸收型分析光栅的功能和X射线荧光屏集成到一个器件,通过在硅基深孔阵列结构中填充X射线荧光晶体材料(CsI:TI)来实现^[28]。首先,在硅片上设计分析光栅结构,并对分析光栅结构进行像素化处理,利用光辅助电化学刻蚀方法进行深刻蚀来形成硅基深孔阵列结构。其次,对硅基深孔阵列进行氧化,在深孔的侧壁形成SiO₂薄膜用来形成波导。最后,把CsI:TI填充到经过氧化的硅基深孔阵列中。其工作原理如图3所示。

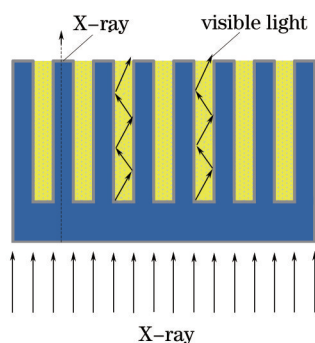


图3 具有分析光栅功能的结构化转换屏原理

Fig.3 Principle of structured scintillator with the function of analyzer grating

当X射线透过具有分析光栅功能的结构化转换屏时,由于侧壁的主要成分为Si和SiO₂,大部分X射线将会透过;当X射线透过填充CsI:TI部分时,CsI:TI会将X射线转换为可见光,由于SiO₂的折射率要大于Si的折射率,这样SiO₂薄膜相当于波导介质,根据全反射原理,转化的可见光可以从深孔中传输到外部。具有分析光栅功能的结构化转换屏和CCD探测器直接耦合,由于CCD探测器对X射线不敏感,因此透过侧壁Si部分的X射线不能被CCD探测器探测,而透过填充材料CsI:TI部分的X射线转换为可见光,可以直接被CCD探测器探测。对于具有分析光栅功能的结构化转换屏,它相当于具有100%传递特性的分析光栅,并且不受高能X射线的限制,对任何能量的X射线,理论上均可以获得100%对比度的叠栅条纹,结构化转换屏完全克服了吸收型分析光栅的限制,不仅可以使分析光栅器件的价格大大降低,在提高图像衬度和检测灵敏度方面也具有很大潜力。

4 实验结果

分别采用光辅助电化学刻蚀法和高温真空填充法制作了铋材料源光栅、相位光栅和具有分析光栅功能的结构化转换屏^[26-28],如图4所示。

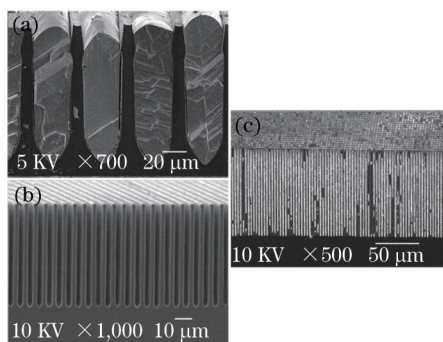


图4 系统中所采用光栅器件。(a) 铋材料源光栅;(b) 相位光栅;(c) 具有分析光栅功能的结构化转换屏

Fig.4 Grating components in the system. (a) Bi-source grating; (b) phase grating; (c) structured scintillator with the function of analyzer grating

铋材料源光栅的周期和占空比分别为 $p_0=42 \mu\text{m}$, $\gamma_0=0.25$,深度为 $h_0=150 \mu\text{m}$,满足X射线光子能量为30 keV的需求。相位光栅的周期和占空比分别为 $p_1=5.6 \mu\text{m}$, $\gamma_1=0.5$,深度为 $h_1=41 \mu\text{m}$,所对应X射线的中心波长 $\lambda_c=0.04 \text{ nm}$ 时的相移大小为 π 。具有分析光栅功能的结构化转换屏的周期和相位光栅的Talbot自成像的周期大小相等,周期和占空比分别为 $p_2=3 \mu\text{m}$, $\gamma_2=0.5$,深度为 $h_2=150 \mu\text{m}$ 。

基于制作的光栅器件构建光栅微分相衬成像系统,并对塑料样品进行实验,采用普通固定钨靶X射线管,管电压和管电流为60 kV和4 mA,所产生X射线的中心波长为 $\lambda_c=0.04 \text{ nm}$,矩形焦斑大小为1 mm(水平) \times 0.8 mm(垂直)。G₀到G₁的距离为 $z_1=1.47 \text{ m}$,G₁到G₂的距离为 $z_2=105 \text{ mm}$ 。G₂通过光锥和CCD耦合,CCD的型号为ANDOR-DH436-F0-9HK,像素数为2048 pixel \times 2048 pixel,像素大小为13.5 μm 。实验过程中利用5步相移法得到物体的相位信息,移动G₁,每步相移的曝光时间为10 s,所得到的塑料样品的吸收和相衬图像如图5所示,图5(b)和5(c)分别表示塑料样品的吸收衬度图像和微分相位衬度图像,和吸收衬度图像相比,微分相位衬度图像对样品

的边缘信息更加敏感。尤其是塑料样品侧边缺陷部分,如图 5(d)和图 5(e)所示,它们分别表示吸收图像和相衬图像的局部放大图。图中塑料样品的缺陷表现在厚度差异,X 射线透过塑料样品之后的相位变化要比振幅变化更加敏感,因此,在缺陷位置的边缘处,相衬图像能够更加清楚地分辨。

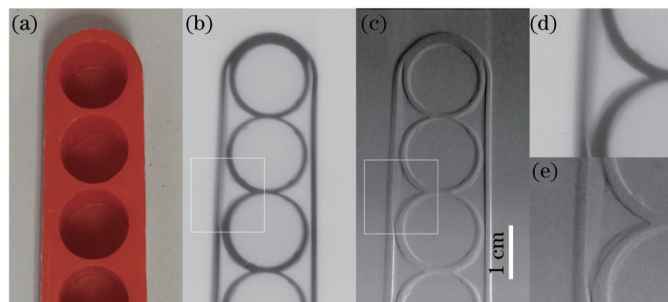


图 5 塑料样品的成像实验结果。(a) 塑料样品; (b) 吸收成像结果; (c) 微分相衬成像结果; (d) 图(b)中吸收图像局部放大图; (e) 图(c)中相衬图像局部放大图

Fig.5 Experimental results of a plastic sample. (a) Plastic sample; (b) absorption image; (c) differential phase contrast image; (d) partially enlarged absorption image; (e) partially enlarged differential phase contrast image

5 结 论

采用了铍光栅和具有分析光栅功能的结构化转换屏相结合的方式来实现低成本、高效率的 X 射线光栅微分相衬成像技术,理论和实验结果表明了本方法的可行性。采用铍材料源光栅代替目前国际上常用的金材料源光栅器件,可以大大降低源光栅器件成本;采用具有分析光栅功能的结构化转换屏代替金材料分析光栅器件,它不仅大大降低分析光栅的制作成本,而且能够克服高能 X 射线的限制。采用高温真空微填充技术制备铍材料源光栅可以在普通实验室实现,但仍然存在填充不均匀以及光栅局部变形的问题。光辅助电化学刻蚀方法可以制备高深宽比的(100 以上)结构光栅,但深宽比的增大,会导致光栅侧向腐蚀问题。随着工艺技术的进一步改良,通过光栅表面结构改性以及优化光栅结构设计等方法,可以使这些问题得到有效解决。该方法的发展对于实现低成本和高灵敏度的 X 射线光栅微分相衬成像具有重要的实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 Momose A, Fukuda J. Phase-contrast radiographs of nonstained rat cerebellar specimen[J]. *Medical Physics*, 1995, 22(4): 375-379.
- 2 Bonse U, Hart M. An X-ray interferometer with long separated interfering beam paths[J]. *Applied Physics Letters*, 1965, 7(4): 99-100.
- 3 Hosoya S, Ando M. X-Ray topographic observation of antiferromagnetic domain boundaries in chromium[J]. *Physical Review Letters*, 1971, 26(6): 321-323.
- 4 Momose A, Takeda T, Itai Y, *et al.* Phase-contrast X-ray computed tomography for observing biological soft tissues[J]. *Nature Medicine*, 1996, 2(4): 473-475.
- 5 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.
- 6 Chapman D, Thomlinson W, Johnston R E, *et al.* Diffraction enhanced x-ray imaging[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1997, 42(11): 2015-2025.
- 7 Gao Hongyi, Chen Jianwen, Xie Honglan, *et al.* Experimental results of X-ray diffraction enhanced phase contrast imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1151-1152.
- 高鸿奕, 陈建文, 谢红兰, 等. X 射线衍射增强相衬成像的实验结果[J]. *光学学报*, 2004, 24(8): 1151-1152.
- 8 Ingal V N, Beliaevskaya E A. X-ray plane-wave tomography observation of the phase contrast from a non-crystalline object[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, 28(11): 2314-2317.
- 9 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.
- 10 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.

- 11 Momose A. Phase-sensitive imaging and phase tomography using X-ray interferometers[J]. Optics Express, 2003, 11(19): 2303-2314.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 Chen Xin, Sun Yi, Zhu Peiping. Reconstruction algorithm of cone-beam phase X-Ray computer-tomography based on grating imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1079-1084.
陈 欣, 孙 怡, 朱佩平. 光栅成像的锥束相位 CT重建算法[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1079-1084.
- 15 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.
- 16 Huang Jianheng, Lin Danying, Liu Zhenwei, *et al.*. Analysis and simulation of mid-energy X-ray grating phase contrast microscopy imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1034001.
黄建衡, 林丹樱, 刘振伟, 等. 中能 X 射线光栅相衬显微成像分析及模拟[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1034001.
- 17 Qi Juncheng, 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.
- 18 Xiao Tiqiao, Xie Honglan, Deng Biao, *et al.*. Progresses of X-Ray imaging methodology and its applications at shanghai synchrotron radiation facility[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0100001.
肖体乔, 谢红兰, 邓 彪, 等. 上海光源 X 射线成像及其应用研究进展[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0100001.
- 19 Du Y, Liu X, Huang J H, *et al.*. Sampling grating approach for X-ray differential phase contrast imaging[J]. Optics Express, 2015, 23(10): 12712-12719.
- 20 Zhu P P, Zhang K, Wang Z L, *et al.*. Low-dose, simple, and fast grating-based X-ray phase-contrast imaging[C]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(31): 13576-13581.
- 21 Du Y, Liu X, Lei Y H, *et al.*. Non-absorption grating approach for X-ray phase contrast imaging[J]. Optics Express, 2011, 19(23): 22669-22674.
- 22 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.
- 23 Han Yueping, Chen Zhiqiang, Zhang Li, *et al.*. Developments of X-ray grating imaging based on Talbot interferometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070002.
韩跃平, 陈志强, 张 丽, 等. 基于 Talbot 干涉的 X 射线光栅成像技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070002.
- 24 Jin Feifei, Zhu XiaoLi, Li Hailiang, *et al.*. Study on properties of 2000 lp/mm X-ray transmission varied line-space gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1857-1860.
靳飞飞, 朱效立, 李海亮, 等. 2000 lp/mm X 射线透射变栅距光栅的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1857-1860.
- 25 Noda D, Tsujii H, Takahashi N, *et al.*. Fabrication of high precision X-ray mask for X-ray grating of X-ray Talbot interferometer[J]. Microsystem Technologies, 2010, 16(89): 1309-1313.
- 26 Lei Y H, 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.
- 27 Lei Y H, 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 & Microengineering, 2014, 24(1): 015007.
- 28 Lei Y H, Liu X, Guo J C, *et al.*. Development of x-ray scintillator functioning also as an analyser grating used in grating-based x-ray differential phase contrast imaging[J]. Chinese Physics B, 2011, 20(4): 042901.

栏目编辑: 刘丰瑞