

用于高分辨 X 射线显微镜的相衬方法研究进展

陈剑钊 林丹樱 黄建衡 刘振伟 牛憨笨

(深圳大学光电工程学院教育部和广东省光电子器件与系统重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 X 射线显微镜具有很高的分辨率,但随着光子能量的增加和研究物体尺寸的减小,物体对 X 射线的吸收减少,X 射线穿透物体后携带出来的信息很弱,成像对比度很低,因此对生物样品等轻元素组成的物质进行显微成像时需要借助相位衬度成像方法。介绍了近年来新发展的几种应用于高分辨 X 射线显微镜的相衬方法,主要包括泽尼克(Zernike)相衬法、微分干涉法和离轴全息法。着重介绍了这几种相衬显微成像方法的基本原理和主要研究进展,并比较了各自的优缺点,力图通过 X 射线相衬显微成像技术的发展历程呈现其在生物样品内部结构检测中的潜在优势和主要问题。

关键词 X 射线光学;X 射线显微镜;相衬成像;泽尼克;微分干涉;离轴全息

中图分类号 O434.1; O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.060004

Research Progress of Phase Contrast Methods for High-Resolution X-Ray Microscope

Chen Jianzhao Lin Danying Huang Jianheng Liu Zhenwei Niu Hanben

(Key Laboratory of Optoelectronics Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract X-ray microscope has the property of providing high resolution. However, it should employ phase contrast for imaging materials consisting of light elements, such as biological samples, because the signal obtained from the penetrating X-rays is very weak and as a result the image contrast is extremely low with increasing photon energy and decreasing object size. Several phase contrast methods for high-resolution X-ray microscope, including Zernike phase contrast mode, differential interference mode and off-axis holographic mode, are reviewed. Basic principles and main research progresses of these phase contrast microscopic techniques are presented, and their advantages and disadvantages are compared, in an attempt to show potential advantages as well as main challenges of X-ray phase contrast microscopic imaging techniques in detecting internal structures of biological samples.

Key words X-ray optics; X-ray microscope; phase contrast imaging; Zernike; differential interference; off-axis holography

OCIS codes 340.7460; 180.7460; 100.5070; 350.5030

1 引言

自从 16 世纪末显微镜登上研究物质细微结构的历史舞台,人类对各种物质和生物体的内部结构从未终止过探索,因此随着科技的发展,各种各样的显微成像技术应运而生。然而常规光学显微镜由于受到瑞利判据和可见光波长较长的限制,分辨率很难突破 200 nm,限制了人们对微观世界的认识。而电子显微镜虽然点分辨率可达 0.1 nm,但由于电子束的穿透能力很弱,因此只能对样品表面或很薄(不超过 300 nm)的样品进行成像,对

收稿日期: 2013-03-06; 收到修改稿日期: 2013-04-03; 网络出版日期: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(61001184,61108026,61101175)和国家重大科研仪器设备研制专项(61227802)资助课题。

作者简介: 陈剑钊(1989—),男,硕士研究生,主要从事 X 射线相衬显微成像方法方面的研究。

E-mail: 474828551@qq.com

导师简介: 林丹樱(1980—),女,博士,讲师,主要从事 X 射线相衬成像和 X 射线相衬显微方面的研究。

E-mail: dylin@szu.edu.cn(通信联系人)

生物样品内部结构的观测还需要一系列如脱水、切片和染色等处理,这样无疑又破坏了样品的内部结构。

X射线具有波长短、穿透能力强的特点,因此X射线显微镜具有对厚样品直接进行无损高分辨显微成像的潜力。近20年来,随着高亮度高相干性X射线源、高速高灵敏X射线探测器以及高效率高分辨X射线光学元件纳米加工技术等各方面的发展,基于物质对X射线吸收的X射线显微镜已经迅速发展起来并趋于成熟。但是,随着光子能量的增加和研究物体尺寸的减小,物体对X射线的吸收也在减少,X射线穿透物体后携带出来的信息很弱,因此其成像对比度很低。故X射线高分辨显微成像的潜力尚无法真正发挥出来,尤其是对于主要由轻元素组成的生物样品更是几乎无法成像。

研究表明,X射线穿透生物样品后,其相位变化可远大于其振幅的衰减,并且随着X射线光子能量的增加这种现象更加明显。利用这类物质对X射线的相移信息来实现显微成像,对提高X射线显微镜的成像衬度及分辨率具有重大的意义。这种利用物质对X射线的相移来实现显微成像的技术称为X射线相衬显微成像技术^[1]。目前能够实现这个方法主要有泽尼克(Zernike)相衬法^[2~9]、剪切干涉法^[10~14]和离轴全息法^[15~18]等。这几种方法虽然均是可见光领域较为成熟的相衬成像技术,但是由于X射线的特殊性质,使得它们在应用于X射线显微镜时难度仍然很大,而且其原理和具体实现手段也均有所不同,发展历程颇为曲折,进展也较为缓慢。三种技术中发展较快的是Zernike法,已初步应用于生物样品的显微成像^[8];我国在北京同步辐射源(BSRF)上建立的Zernike法X射线相衬显微成像装置^[7],其分辨率达30 nm,已跻身国际先进行列。

本文主要介绍上述三种X射线相衬显微成像技术的基本原理及主要研究进展,并就其各自的优缺点进行比较。

2 Zernike法X射线相衬显微成像技术

Zernike相衬法是1935年德国科学家Zernike在可见光波段提出的一种将物体的相位分布转换成图像对比度的方法^[19]。研究人员把这种方法借鉴到X射线显微镜,发展了Zernike法X射线相衬显微成像技术。

2003年,法国研究人员Neuhäusler等^[2]利用同步辐射源作为成像光源提出了基于Zernike法的X射线相衬显微成像方案,其基本原理如图1所示。X射线透过聚光孔径形成空心锥束会聚于样品;菲涅耳波带片(FZP)作为显微物镜将透过样品的各级衍射光聚焦到像平面上形成像;位于菲涅耳波带片后焦面的相位环(材料通常为金)使聚焦的0级衍射光(非衍射光)发生衰减同时相移 $\pm\pi/2$,使样品的相位信息转化为光强分布,从而实现Zernike相衬成像。该方案可在传统的X射线显微镜上直接加入相位环进行升级,其他光路和结构保持不变。利用该相衬实验装置,Neuhäusler等对集成电路板进行显微成像,其衬度相当于不加相位环时纯吸收成像衬度的5倍。

然而同步辐射源一定程度上限制了这种方法的广泛应用,因此2006年美国研究人员Tkachuk等^[3]又进一步发展了采用实验室源的Zernike法X射线相衬显微成像装置,其基本原理与前述相同(由于实验室源的X射线单色性不强,源后需要加上滤光片来提高单色性)。利用该实验装置对集成电路板进行成像,当入射光子能量 $E=8\text{ keV}$ 时,分辨率为50 nm的吸收衬度只有0.07%,而相位衬度为5.7%,是吸收衬度的80倍。

不管采用何种光源,实验过程中相位环位置的精确调整应该说都是最大的难点,针对这个问题,科学家又提出了单元件Zernike相衬法^[4,5],如美国研究人员Sakdinawat等^[4]于2008年提出的方案,其基本思路如图2所示,即对于准直的入射X射线,可将作为空间滤波器(图2中的H)的相位环与普通波带片(RZP)的综

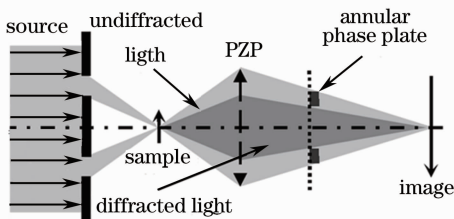


图1 Zernike法X射线相衬显微成像原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Zernike phase contrast mode X-ray microscope

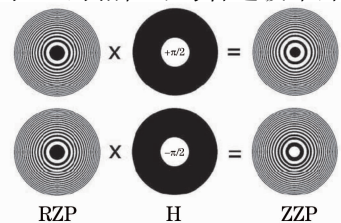


图2 Zernike波带片示意图^[4]

Fig. 2 Schematic diagram of Zernike zone plate^[4]

合效果用一个 Zernike 波带片 (ZFP) 来代替。这种方法虽然增加了光学元件的制作难度,但是却能使 Zernike 法 X 射线相衬成像的实验过程变得更加简便,大大提高了实验效率。

3 剪切干涉法 X 射线相衬显微成像技术

剪切干涉法是 40 年前 Nomarski^[20] 首次在可见光显微镜中采用的一种相衬成像方法,又称微分干涉法 (DIC),是指将光波波前分成彼此错开且相干的两个波前,并在像平面相遇形成干涉图样。近年来科学家也利用类似的原理,将剪切干涉法运用于 X 射线显微镜。该技术属于双光束干涉技术,具有纳米级的分辨能力,而且也可以直接在传统的 X 射线显微镜上进行升级。目前根据分束手段的不同,剪切干涉法 X 射线相衬显微成像技术有双波带片法、单元件法、Talbot 干涉仪法等多种形式。

3.1 双波带片法与单元件法

2001 年,德国研究人员 Wilhein 等^[10] 提出了基于双波带片法的剪切干涉 X 射线相衬显微成像方案,其基本原理如图 3 所示。波带片 ZP2 位于波带片 ZP1 后方,且其中心点错开的垂直距离为 a ,入射光经过 ZP1 后其 +1 级衍射光会聚于 P_1 点,而 0 级衍射光进入 ZP2 后其 +1 级衍射光会聚于 P_2 点,这两束光在像平面相遇形成干涉条纹。样品的相位分布会使这两束相干光的相位发生变化,进而使像平面的干涉条纹发生变化,从而实现将样品的相位信息转化为像平面光强分布的目的。

双波带片制作和调节的难度较大,因此研究人员也提出了单元件的方法^[11,12]。例如,2008 年瑞典研究人员 Von Hofsten 等^[12] 提出的方案中,利用全息方法制备了一个可以产生两个波前的衍射光学元件 (DOE) 来实现微分干涉相衬成像。该 DIC-DOE 元件的结构如图 4 所示,其图案由相差为 π (即图案正好相反) 的两部分波带片图案组成,其分割线 (称为相位切) 的位置决定了分束后两波前之间的剪切量。利用该 DIC-DOE 进行相衬显微成像的基本原理与双波带法的一样,但采用这种方法很大程度上降低了双波带片制作和调节的难度,提高了实验的效率。

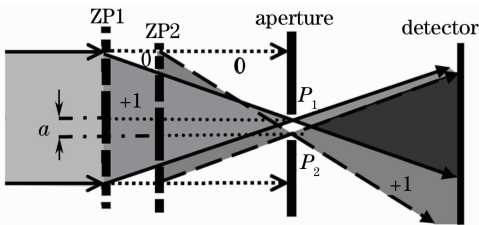


图 3 基于双波带片的微分干涉 X 射线相衬显微成像原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of differential interference mode X-ray microscope based on zone plate doublet



图 4 DIC-DOE 结构示意图^[12]

Fig. 4 Schematic diagram of DIC-DOE^[12]

3.2 Talbot 干涉仪法

Talbot 效应是 Talbot 在 1836 年发现的一项重要的光学效应。单色平面波垂直照明一个具有周期性透射率函数的图形,在图形一定距离后可以看到这个周期函数的像,这种不需要透镜对周期物体成像的现象便是泰伯效应。Talbot 干涉仪的方法最早在 2002 年由瑞士研究人员 David 等^[21] 引入 X 射线成像领域,并逐渐发展为对宏观物体进行 X 射线相衬成像的主要技术之一^[22~24]。

2008 年,日本研究人员 Takeda 等^[13] 将 Talbot 干涉仪的方法引入 X 射线显微镜,其基本原理如图 5 所示:相位物体位于波带片 FZP 前方;相位光栅 G1 置于波带片后方 $R+f$ 处,吸收光栅 G2 置于 G1 后方 Z_T 处 (即 G1、G2 距离满足 Talbot 距离整数倍),与 G1 的 Talbot 自成像形成莫尔条纹并由其后的探测器进行探测;最后通过条纹扫描法可以清晰地得到相位物体的相位分布。2009 年,该研究小组进一步对实验方案进行改进,通过

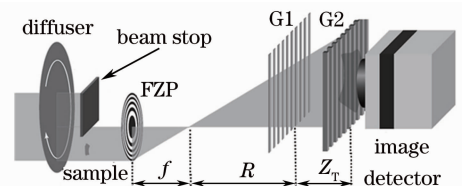


图 5 基于 Talbot 干涉仪的微分干涉 X 射线相衬显微成像原理示意图^[13]

Fig. 5 Schematic diagram of differential interference mode X-ray microscope based on Talbot interferometer^[13]

使相位光栅形成放大倍数较多的自成像从而可被直接探测,避免了 G2 的使用^[14]。然而值得一提的是,这种方法得到的是样品相位的差分图像,而不是传统意义上的微分图像。

4 离轴全息法 X 射线相衬显微成像技术

离轴全息技术是可见光领域应用得很早的一种方法^[25],它利用波前干涉的方法记录物体的振幅和相位的信息,然后再通过适当的方法进行波前重建来再现出物体。近年来,科学家将这个原理引入到 X 射线显微镜,即利用参考光与物光在像平面的相干叠加将样品的相位信息转化为强度信息记录在全息图中。目前主要有两种形式的离轴全息 X 射线相衬显微成像技术:一种是基于波带片的方法,另一种是基于折射和反射的方法。

4.1 波带片法

2004 年,日本研究人员 Koyama 等^[15]利用特殊设计的波带片组合来产生参考光和物光,实现了离轴全息法的 X 射线相衬显微成像,图 6 为其原理示意图。该方案中的波带片组合包括半月形波带片 ZP-A 和普通波带片 ZP-B[如图 7(a)所示],前者将参考光会聚于 S_A 点,后者将入射物光会聚于 S_B 点,而后参考光与物光继续向前传播并在像平面上发生相干叠加形成全息图,将样品的相位信息调制成强度信息记录在全息图中。利用该实验装置对聚苯乙烯小球进行显微成像,并通过条纹扫描法对相位进行解调后,可得到分辨率 160 nm 的清晰图像。

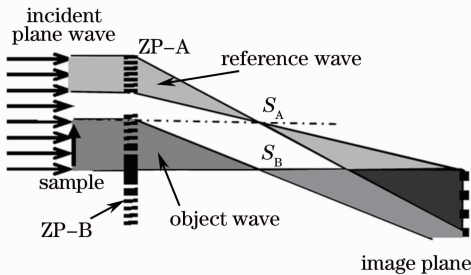


图 6 基于波带片的离轴全息 X 射线相衬显微成像原理示意图^[15]

Fig. 6 Schematic diagram of off-axis holographic mode X-ray microscope based on zone plates^[15]

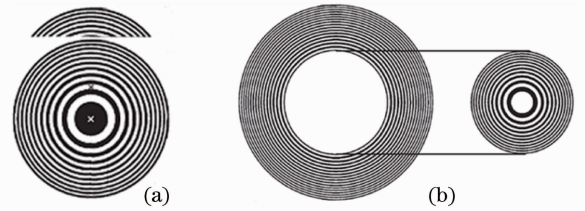


图 7 用于会聚参考光和物光的波带片组合^[15,16]。(a) 半月形波带片组合;(b) 环状波带片和普带波带片组合

Fig. 7 Zone plate combination for focusing reference and object waves^[15,16]. (a) Half-moon-shaped zone plate + regular zone plate; (b) annular zone plate + regular zone plate

然而图 7(a)中的波带片组合由于是制作在同一个基底上的,因此一旦制作好就不能再调整其间距,全息图的条纹周期也因此不能调整,故该小组于 2006 年又对其装置进行了改进^[16]。改进后产生参考光的波带片变成一个环形波带片,并且与会聚物光的普通波带片前后放置(焦平面重叠),如图 7(b)所示。成像原理与 2004 年的方案基本相同,但采用环形波带片的组合使得实验过程中可以方便地将干涉条纹的周期调整到无限大(超过探测器尺寸),因此成像时可直接看到样品的相位像。

4.2 反射折射法

除了采用特殊的波带片,日本研究人员 Suzuki 等^[17,18]还提出了另一种产生参考光的途径来实现离轴全息 X 射线相衬显微成像,即通过折射或全反射的方法。图 8 所示为该小组于 2005 年提出的利用 X 射线棱镜的折射来产生参考光的成像方案^[17]原理。

然而棱镜存在转折偏向角受限以及对 X 射线有严重吸收损耗等缺点,该小组于 2008 年又对实验装置进行了改进,利用全反射原理来产生参考光^[18]。改进后的实验装置在对聚苯乙烯小球进行相衬显微成像时获得了高达 30 nm 的空间分辨率。

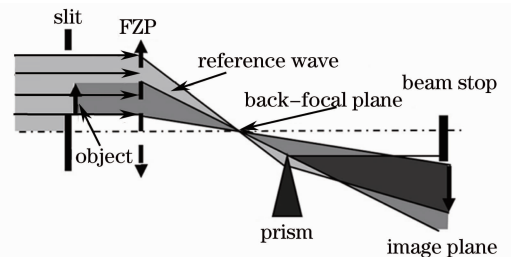


图 8 基于棱镜折射的离轴全息相衬显微成像原理示意图^[17]

Fig. 8 Schematic diagram of off-axis holographic mode X-ray microscope based on prism refraction^[17]

5 三种技术的优缺点比较

根据上述三种 X 射线相衬显微成像技术的基本原理和特点,可以看出每种方法均有其优缺点。

1) Zernike 相衬法:优点是对 X 射线源的相干性要求不高,对于弱相位样品,图像衬度与物质对 X 射线的相移信息成正比,因此图像比较直观;缺点是当物质对 X 射线的吸收不能忽略时,吸收衬度和相位衬度会相互干扰,并且较难在后期处理中分离出相位信息,另外对于强相位样品,图像衬度与物质对 X 射线的相移信息成非线性关系,图像的物理意义也较难解释。

2) 微分干涉法:优点是形式比较灵活多样,对光源相干性的要求也不高,物质对 X 射线的相移信息反映在干涉图样中,可以方便地通过傅里叶变换法或条纹扫描法恢复出相位信息;缺点是对波带片、光栅、衍射光学元件等 X 射线光学元件的性能要求较高,制作难度较大。

3) 离轴全息法:优点是形式灵活多样,物质对 X 射线的相移信息反映在全息图中,也可以方便地通过条纹扫描法对相位信息进行恢复;缺点是对光源的相干性要求很高,因此目前主要还局限在同步辐射源上应用。

6 结束语

X 射线相衬显微成像技术具有其他显微成像技术和吸收衬度 X 射线显微镜所无法比拟的优势。本文详细阐述了目前国际上研究较热的三种 X 射线相衬显微成像技术的基本原理及其发展情况,并比较了其各自的优缺点。

然而,目前上述技术只有 Zernike 法在生物样品内部结构的显微成像方面得到初步应用^[8,9],其他几种技术均尚无针对生物样品的应用报道。这几种方法的缺点也正是其难点所在,只有进一步改进这些技术和方法,降低 X 射线相干性要求和 X 射线光学元件制作难度,在提高成像衬度的同时兼顾高的成像分辨率,才有可能使 X 射线相衬显微成像技术真正走向应用。

除了本文介绍的这三种技术,科学家们还在做更多的尝试,例如 Salditt 等^[26]和 Pelliccia 等^[27]分别在同步辐射源和实验室源上,通过将照明光源聚焦成点光源,综合利用类同轴全息相衬的原理^[28]和投影放大的思路,实现了纳米级和亚微米级分辨的 X 射线相衬显微成像;Choi 等^[29]则利用傅科刀口扫描的方法得到了样品的微分信息,从而间接实现了 X 射线相衬显微成像。

随着各种相关技术的进一步发展,X 射线相衬显微成像技术必将取得更多发展成果,补偿其他显微成像技术在观测由轻元素物质组成的生物样品内部结构方面的不足,为显微成像提供更好的手段,使人们得以更进一步地了解生命的发展历程,进而推进人类文明的发展。

参 考 文 献

- 1 S. O. Mayo, T. J. Davis, T. Gureyev *et al.*. X-ray phase-contrast microscopy and microtomography[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(19): 2289~2302
- 2 U. Neuhäusler, G. Schneider, W. Ludwig *et al.*. X-ray microscopy in Zernike phase contrast mode at 4 keV photon energy with 60 nm resolution[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, **36**(10A): A79~A82
- 3 A. Tkachuk, M. Feser, H. T. Cui *et al.*. High-resolution X-ray tomography using laboratory sources[C]. *SPIE*, 2006, **6318**: 63181D
- 4 A. Sakdinawat, Y. W. Liu. Phase contrast soft X-ray microscopy using Zernike zone plates[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1559~1564
- 5 O. von Hofsten, M. Bertilson, M. Lindblom *et al.*. Compact Zernike phase contrast X-ray microscopy using a single-element optic[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 932~934
- 6 Y. T. Chen, T. Y. Chen, J. Yi *et al.*. Hard X-ray Zernike microscopy reaches 30 nm resolution[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(7): 1269~1271
- 7 Q. X. Yuan, K. Zhang, Y. L. Hong *et al.*. A 30 nm resolution hard X-ray microscope with X-ray fluorescence mapping capability at BSRF[J]. *J. Synchrot. Radiat.*, 2012, **19**(6): 1021~1028
- 8 J. Lim, S. Y. Park, J. Y. Huang *et al.*. Large-field high-contrast hard X-ray Zernike phase-contrast nano-imaging beamline at Pohang Light Source[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2013, **84**(1): 013707
- 9 H. Kishimoto, Y. Shinohara, M. Naito *et al.*. Visualization of nanoscale deformation in polymer composites with Zernike-type phase-contrast X-ray microscopy and the finite element method[J]. *Polym. J.*, 2013, **45**(1): 64~69
- 10 T. Wilhein, B. Kaulich, E. Di Fabrizio *et al.*. Differential interference contrast X-ray microscopy with submicron

- resolution[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(14): 2082~2084
- 11 C. Chang, A. Sakdinawat, P. Fischer *et al.*. Single-element objective lens for soft X-ray differential interference contrast microscopy[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1564~1566
- 12 O. Von Hofsten, M. Bertilson, U. Vogt. Theoretical development of a high-resolution differential-interference-contrast optic for X-ray microscopy[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 1132~1141
- 13 Y. Takeda, W. Yashiro, T. Hattori *et al.*. Differential phase X-ray imaging microscopy with X-ray Talbot interferometer [J]. *Appl. Phys. Express*, 2008, **1**(11): 117002
- 14 W. Yashiro, Y. Takeda, A. Takewchi *et al.*. Hard-X-ray phase-difference microscopy using a Fresnel zone plate and a transmission grating[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(18): 180801
- 15 T. Koyama, Y. Kagoshima, I. Wada *et al.*. High-spatial-resolution phase measurement by micro-interferometry using a hard X-ray imaging microscope[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(3B): L421~L423
- 16 T. Koyama, T. Tsuji, H. Takano *et al.*. Hard X-ray nano-interferometer and its application to high-spatial-resolution phase tomography[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, **45**(43): L1159~L1161
- 17 Y. Suzuki, A. Takeuchi. Hard X-ray holographic microscopy using refractive prism and Fresnel zone plate objective[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2005, **76**(9): 093702
- 18 Y. Suzuki, A. Takeuchi. X-ray holographic microscopy using total-reflection mirror interferometer[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, **47**(11): 8595~8599
- 19 Mu Guoguang, Zhan Yuanling. Optics [M]. Beijing: People's Education Press, 1978. 395~397
母国光, 站元令. 光学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978. 395~397
- 20 R. Allen, G. David, G. Nomarski. The Zeiss-Nomarski differential interference equipment for transmitted-light microscopy[J]. *Z. Wiss. Mikr.*, 1969, **69**(4): 193~221
- 21 C. David, B. Nöhammer, H. H. Solak *et al.*. Differential X-ray phase contrast imaging using a shearing interferometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(17): 3287~3289
- 22 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
- 23 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
- 24 Hua Wenqiang, Bian Fenggang, Song Li *et al.*. Fractional Talbot effect of phase gratings illuminated by partially coherent synchrotron radiation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(1): 0134001
滑文强, 边风刚, 宋 丽 等. 部分相干同步辐射照射下光栅分数塔尔博特效应[J]. 光学学报, 2013, **33**(1): 0134001
- 25 E. Leith, J. Upatnieks. Reconstructed wavefronts and communication theory[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, **52**(10): 1123~1128
- 26 T. Salditt, K. Giewekemeyer, C. Fuhse *et al.*. Projection phase contrast microscopy with a hard X-ray nanofocused beam: defocus and contrast transfer[J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(18): 184112
- 27 D. Pelliccia, A. Sorrentino, I. Bukreeva *et al.*. X-ray phase contrast microscopy at 300 nm resolution with laboratory sources[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 15998~16004
- 28 Xue Yanling, Xiao Tiqiao, Du Guohao *et al.*. Microscopic identification of panax quinquefolium and panax ginseng by X-ray phase contrast imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1828~1832
薛艳玲, 肖体乔, 杜国浩 等. 西洋参和高丽白参的 X 射线显微鉴定研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1828~1832
- 29 J. Choi, Y. S. Park. X-ray phase imaging microscopy with two-dimensional knife-edge filters[J]. *Appl. Phys. Express*, 2012, **5**(4): 042503