

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.12.013

X 射线双相位光栅干涉仪占空比对可见度的影响

王天祥¹, 王志立¹, 顾瑶¹, 陈恒¹, 葛昕²

(1. 合肥工业大学 物理学院, 安徽 合肥 230601; 2. 中山大学 理学院, 广东 深圳 518107)

摘要: 条纹可见度是决定 X 射线双相位光栅干涉仪应用前景的关键参数, 而光栅占空比显著影响 X 射线光栅干涉测量的条纹可见度。文章推导了单色 X 射线、任意占空比以及多色 X 射线、任意占空比的对称双相位光栅干涉仪的条纹强度表达式, 并通过数值计算分析光栅占空比对 X 射线双相位光栅干涉仪条纹可见度的影响。结果表明: 对于实验上常用的双 $\pi/2$ 相位光栅情形, 在单色照明和多色照明下, 光栅占空比为 $2/3$ 的条纹可见度比光栅占空比为 $1/2$ 的分别高 83%、77%; 且在给定的系统参数下, 总能找到最佳的占空比使双相位光栅干涉仪条纹可见度达到最大。文章研究结果可以为 X 射线双相位光栅干涉仪的性能优化提供一定的指导。

关键词: X 射线成像; 光栅干涉仪; 条纹可见度; 占空比

中图分类号: O434.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)12-1665-06

Influence of grating duty cycle on visibility in X-ray dual phase grating interferometer

WANG Tianxiang¹, WANG Zhili¹, GU Yao¹, CHEN Heng¹, GE Xin²

(1. School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. School of Science, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

Abstract: In X-ray dual phase grating interferometer, the fringe visibility has always been a figure of merit to determine its application prospects. Meanwhile, in X-ray grating interferometry, the fringe visibility can be significantly improved by optimizing the grating duty cycle. This paper presents simplified expression of intensity fringes in a symmetric geometry with an arbitrary grating duty cycle. The monochromatic illumination is considered firstly, and then the polychromaticity of the X-ray beam is taken into account. The influence of the grating duty cycle on the fringe visibility in X-ray dual phase grating interferometer is analyzed by numerical calculation. Results show that in case of a $\pi/2$ phase shift, the fringe visibility with a grating duty cycle of $2/3$ is 83% and 77% higher than that with a grating duty cycle of $1/2$ under monochromatic and polychromatic illumination, respectively. Under a given set of system parameters, one can always find an optimal duty cycle to maximize the fringe visibility. The presented results can be used as guidelines for further optimizations of X-ray dual phase grating interferometers.

Key words: X-ray imaging; grating interferometer; fringe visibility; duty cycle

在众多 X 射线成像方法中, X 射线光栅干涉仪成像是具有应用潜力的方法之一, 在医学成像和材料科学^[1-3]等众多领域展现出重要的应用价

值。双相位光栅干涉仪由于无需分析光栅并能实现大视场、高剂量效率的 X 射线相衬和暗场成像而备受关注^[4-10]。

收稿日期: 2023-08-14; **修回日期:** 2023-08-26

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(2208085MA18)

作者简介: 王天祥(1998—), 男, 河南周口人, 合肥工业大学硕士生;

王志立(1984—), 男, 山西吕梁人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: dywangzl@hfut.edu.cn.

在 X 射线光栅干涉仪成像中,总是希望能够得到高可见度的强度条纹,以提高测量灵敏度,获得高信噪比的图像^[11]。目前,X 射线双相位光栅干涉仪通常使用占空比为 1/2 的相位光栅,实验测量的条纹可见度比较低。文献[4]使用尺寸为 9.5 μm 的钨靶 X 射线源对相位光栅占空比均为 1/2 的双相位光栅干涉仪进行成像实验,获得的最大条纹可见度约为 16%;2023 年,文献[5]使用尺寸为 3 μm 的钨靶 X 射线源对相位光栅占空比均为 1/2 的双相位光栅干涉仪进行成像实验,获得的条纹可见度不超过 15%;文献[6]使用占空比均为 1/2 的相位光栅组成的常规 X 射线源双相位光栅干涉仪系统进行成像实验,获得的最大条纹可见度仅为 7.5%,低于推广应用的经验阈值 10%。因此,有必要探索如何进一步提高 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度,以指导光栅干涉仪的优化设计,促进其在生命医学成像等领域的推广应用。本文注意到在 X 射线 Talbot-Lau 干涉仪中,通过优化光栅占空比能够明显提高条纹可见度^[12-13]。鉴于此,本文提出光栅占空比对 X 射线双相位光栅干涉仪条纹可见度影响的研究。

1 X 射线双相位光栅干涉仪强度

1.1 单色照明下的强度分布

X 射线双相位光栅干涉仪的示意图如图 1 所示。

图 1 中:干涉仪第 1 个相位光栅 G1 的周期为 p_1 、相移为 φ_1 、占空比为 γ_1 ;干涉仪第 2 个相位光栅 G2 的周期为 p_2 、相移为 φ_2 、占空比为 γ_2 ; R_1 为 X 射线源到相位光栅 G1 的轴向距离; R_2 为相位光栅 G1 到相位光栅 G2 的轴向距离; R_4 为相位光栅 G2 到探测器的轴向距离。

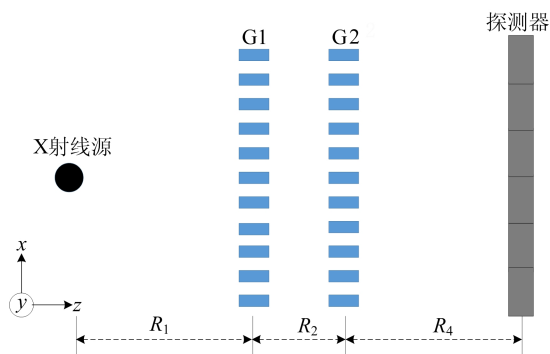


图 1 X 射线双相位光栅干涉仪示意图

根据双相位光栅干涉仪的理论模型^[7],单色

照明下,探测器可分辨条纹的强度分布可表示为:

$$I(x) = \frac{I_0}{M_5^2} \sum_{l,n,s \in \mathbf{Z}} \mu_{in} \left(\frac{l\lambda R_4}{M_1 p_{fr}} - \frac{l\lambda R_2}{M_1 p_1} \right) \text{sinc} \left(\frac{l p_D}{p_{fr}} \right) \times \\ a_{l+n} a_n^* b_{-l+s} b_s^* \exp \left[-i\pi \frac{l(l+2n)\lambda R_2}{M_1 p_1^2} \right] \times \\ \exp \left[i\pi \frac{l(l+2n)\lambda R_4}{M_1 p_1 p_{fr}} \right] \exp \left[i\pi \frac{l(-l+2s)\lambda R_4}{p_2 p_{fr}} \right] \times \\ \exp \left(-i2\pi \frac{lx}{p_{fr}} \right) \quad (1)$$

其中: I_0 为入射到相位光栅 G1 平面的 X 射线强度; μ_{in} 为入射到 G1 平面、波长为 λ 的 X 射线的空间相干因子; p_{fr} 为条纹周期; a_n 和 b_s 分别为相位光栅 G1、G2 的复振幅透过率函数的傅里叶展开系数,上标 * 表示复共轭; $\text{sinc}(l p_D / p_{fr})$ 表示探测器的像素平均效应, p_D 为探测器像素尺寸。

对于微焦点 X 射线源,其强度分布可用一维高斯函数近似^[5],根据 Van Cittert-Zernike 定理, μ_{in} 表达式为:

$$\mu_{in} \left(\frac{l\lambda R_4}{M_1 p_{fr}} - \frac{l\lambda R_2}{M_1 p_1} \right) = \\ \exp \left[\frac{-2(\pi\sigma l)^2}{R_1^2} \left(\frac{R_4}{M_1 p_{fr}} - \frac{R_2}{M_1 p_1} \right)^2 \right] \quad (2)$$

其中: $p_{fr} = \frac{M_5 p_2}{M_1 - p_2 / p_1}$; $\sigma = \frac{a}{2\sqrt{\ln 4}}$, a 为光源尺寸。

a_n 和 b_s 的表达式为:

$$a_n = \begin{cases} 1 - \gamma + \gamma \exp(i\varphi), & n = 0; \\ \gamma [\exp(i\varphi) - 1] \text{sinc}(n\gamma\pi), & n \neq 0; \end{cases} \\ b_s = \begin{cases} 1 - \gamma + \gamma \exp(i\varphi), & s = 0; \\ \gamma [\exp(i\varphi) - 1] \text{sinc}(s\gamma\pi), & s \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

M_1 、 M_5 表示几何放大系数,定义式如下:

$$M_1 = \frac{R_1 + R_2}{R_1}, \quad M_5 = \frac{R_1 + R_2 + R_4}{R_1} \quad (4)$$

通常情况下,考虑空间紧凑性一般选择对称几何布置^[4,6-8],即

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma, \quad p_1 = p_2 = p, \\ \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi, \quad R_1 = R_4 = R \quad (5)$$

因此,单色照明下对称几何布置的条纹强度分布可表示为:

$$I(x) = \frac{I_0}{M_3^2} \sum_{l,n,s \in \mathbf{Z}} \exp \left[\frac{-2(\pi\sigma l)^2}{(M_4 p)^2} \right] \text{sinc} \left(\frac{l p_D}{M_4 p} \right) \times \\ a_{l+n} a_n^* b_{-l+s} b_s^* \exp \left[\frac{-i\pi\lambda l(l+2n)R}{p^2 M_4} \right] \times \\ \exp \left[\frac{i\pi\lambda l(-l+2s)R}{p^2 M_4} \right] \exp \left(-i2\pi \frac{lx}{M_4 p} \right) \quad (6)$$

其中: $M_3 = \frac{2R+R_2}{R}$; $M_4 = \frac{2R+R_2}{R_2}$ 。

1.2 多色照明下的强度分布

在实际应用中,X 射线双相位光栅干涉仪利用多色 X 射线源来实现多模式成像。因此,有必要研究多色照明下的强度分布规律。

在多色照明下,探测器记录的强度分布是单色照明下强度分布的非相干加权叠加,即多色强度的表达式为:

$$I_p(x) = \int I_e(x, \lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

其中: $I_e(x, \lambda)$ 表示某一波长为 λ 的单色 X 射线照明时的强度分布; $S(\lambda)$ 表示归一化等效谱分布。由于相位光栅的相移量与能量相关,对任意波长 λ ,其对应的相移量满足 $\varphi = \lambda\varphi^D/\lambda_D$, φ^D 是设计波长 λ_D 对应的相移量,则多色照明下对称几何布置的条纹强度分布可表示为:

$$I_p(x) = \frac{I_0}{M_3^2} \sum_{l,n,s \in \mathbf{Z}} \exp\left[-\frac{2(\pi\sigma l)^2}{(M_4 p)^2}\right] \text{sinc}\left(\frac{lp_D}{M_4 p}\right) \times \exp\left(-i2\pi\frac{lx}{M_4 p}\right) \int a_{l+n} a_n^* \exp\left[\frac{-i\pi\lambda l(l+2n)R}{M_4 p^2}\right] \times$$

$$b_{-l+n} b_s^* \exp\left[\frac{i\pi\lambda l(-l+2s)R}{M_4 p^2}\right] S(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

2 条纹可见度研究

X 射线光栅干涉仪中,条纹可见度是评价其成像性能的重要指标,将条纹可见度^[4-6]定义为:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (9)$$

其中: I_{\max} 为条纹强度最大值; I_{\min} 为条纹强度最小值。

根据文献[4-6,13]的报道,目前 X 射线光栅干涉仪测量使用的光栅相移为 π 、 $\pi/2$ 、 $2\pi/3$ 。因此,本文对光栅相移为 π 、 $\pi/2$ 、 $2\pi/3$ 的对称双相位光栅干涉仪进行光栅占空比优化。

首先研究单色照明下对称几何布置的双相位光栅干涉仪的条纹可见度随光栅占空比、光栅间距变化的规律,结果如图 2 所示。

图 2 中: β 表示条纹周期与像素尺寸的比值; φ 表示相移。

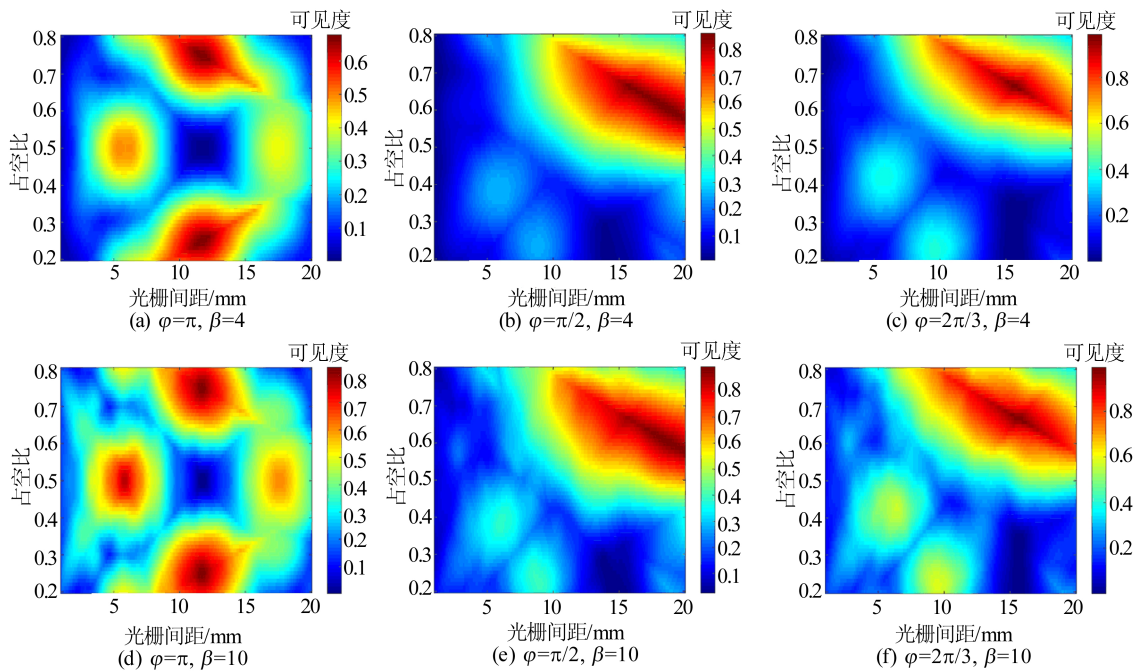


图 2 单色照明下条纹可见度随光栅占空比、光栅间距变化的规律

考虑到探测器的像素平均效应,设定条纹周期与像素尺寸的比值 β 为 4 和 10。计算参数^[4]选择如下:相位光栅周期 $p=1.3 \mu\text{m}$,相位光栅 G1 到相位光栅 G2 的距离 R_2 和 G2 到探测器的距离 R_4 相等且 $R_2=R_4=R=500 \text{ mm}$ 。X 射线能量 17 keV,光源尺寸 $9.5 \mu\text{m}$,光源强度分布取一维高斯函数近似。

分析图 2 单色照明下的实验结果,得到以下结论。

1) 由图 2a 和图 2d 可知:对于双 π 相位光栅,无论条纹周期与像素尺寸的比值 β 为 4 还是 10,当占空比为 0.75 或 0.25 时,条纹可见度取得最高,分别为 0.67 和 0.82;当占空比为 0.50 时, $\beta=4$ 和 $\beta=10$ 的条纹可见度分别为 0.49 和 0.77。

2) 由图 2b 和图 2e 可知:对于双 $\pi/2$ 相位光栅,无论条纹周期与像素尺寸的比值 β 是 4 还是 10,当占空比为 0.66 时,条纹可见度取得最高,分别为 0.84 和 0.86;当占空比为 0.50 时, $\beta=4$ 和 $\beta=10$ 的条纹可见度分别为 0.62 和 0.67。

3) 由图 2c 和图 2f 可知,对于双 $2\pi/3$ 相位光栅,无论条纹周期与像素尺寸的比值 β 是 4 还是

10,当占空比为 0.66 时,条纹可见度取得最高,分别为 0.97 和 0.98。

同样研究多色照明下对称几何布置的双相位光栅干涉仪的条纹可见度随光栅占空比、光栅间距变化的规律,结果如图 3 所示。

图 3 中: β 表示条纹周期与像素尺寸的比值; φ 表示相移。

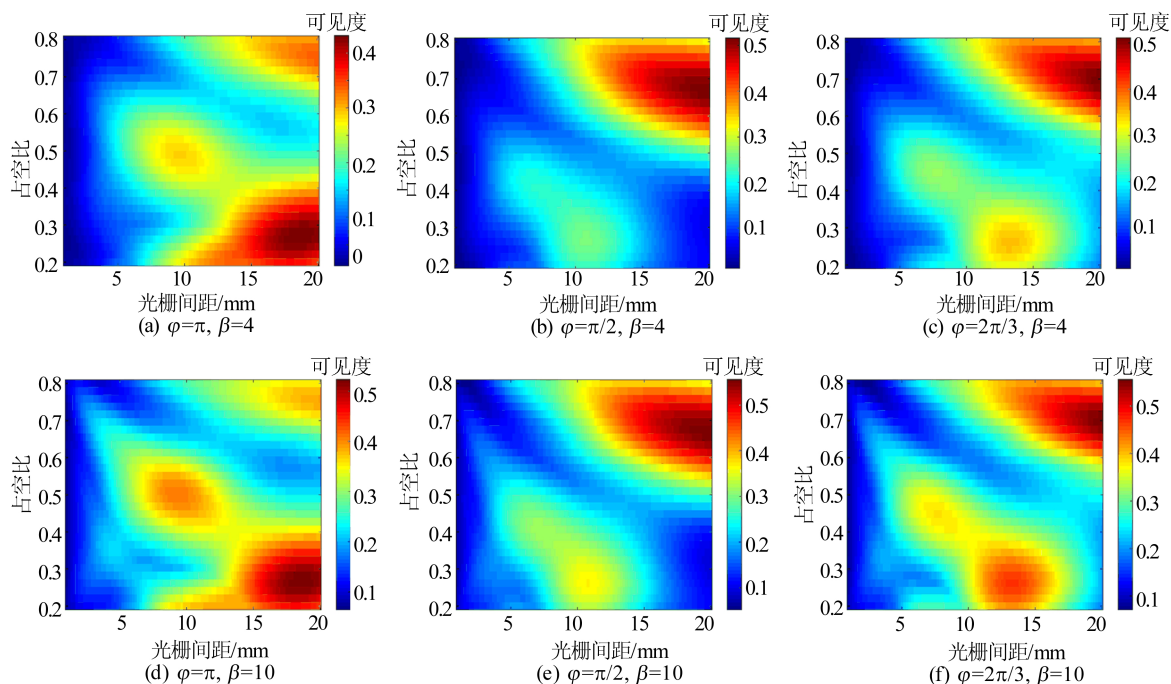


图 3 多色照明下条纹可见度随光栅占空比、光栅间距变化的规律

设定条纹周期与像素尺寸的比值 β 为 4 和 10。计算参数^[4,6]选择如下:多色照明模拟钨靶 X 射线源,峰值电压 55 kV,平均能量 28 keV;光源强度分布取一维高斯函数近似,光源尺寸 $9.5 \mu\text{m}$;相位光栅周期 $p=1.3 \mu\text{m}$,相位光栅 G1 到相位光栅 G2 的距离 R_2 和 G2 到探测器的距离 R_1 相等且 $R_2=R_1=R=500 \text{ mm}$ 。

分析图 3 多色照明下的实验结果,得到以下结论。

1) 由图 3a 和图 3d 可知:对于双 π 相位光栅,无论条纹周期与像素尺寸的比值 β 是 4 还是 10,当占空比为 0.26 时,条纹可见度取得最高,分别为 0.43 和 0.52;当占空比为 0.50 时, $\beta=4$ 和 $\beta=10$ 的条纹可见度分别为 0.29 和 0.41。

2) 由图 3b 和图 3e 可知:对于双 $\pi/2$ 相位光栅,无论条纹周期与像素尺寸的比值 β 是 4 还是 10,当占空比为 0.66 时,条纹可见度取得最高,分别为 0.51 和 0.55;当占空比为 0.50 时, $\beta=4$ 和 $\beta=10$ 的条纹可见度分别为 0.27 和 0.30。

3) 由图 3c 和图 3f 可知,对于双 $2\pi/3$ 相位光栅,无论条纹周期与像素尺寸的比值 β 是 4 还是 10,当占空比为 0.69 时,条纹可见度取得最高,分别为 0.51 和 0.55。

根据图 2 和图 3 的实验结果以及光栅的实际实验参数^[12-14],本文将重点探索 $\varphi=\pi/2$ 和占空比为 $2/3$ 、 $\varphi=\pi$ 和占空比为 $1/4$ 、 $\varphi=2\pi/3$ 和占空比为 $2/3$ 这 3 种情形。作为对照,对于光栅占空比为典型值 $1/2$ 的双相位光栅干涉仪,光栅相移 φ 分别考虑 π 和 $\pi/2$ 。

分别考虑单色照明和多色照明情形,对比研究条纹可见度随光栅间距变化的规律。需要指出的是,无论是单色照明还是多色照明,为使占空比为典型值 $1/2$ 情形所得的结果与文献[7-8]的结果保持一致,需要令条纹强度公式中的空间相干因子 $\mu_m = \text{sinc}(la/p_{fr})$,这是由于文献[7-8]中将微焦点 X 射线源近似为均匀的发光圆盘。

单色照明下条纹可见度随光栅间距变化的规律如图 4 所示。为了更直观地展现条纹可见度的

变化规律,总结了单色照明下条纹可见度的峰值和条纹可见度曲线的半高全宽,见表 1 所列。图 4 和表 1 中: D_C 表示占空比; φ 表示相移。

单色照明的参数^[7]选择如下:相位光栅周期 $p=1\ \mu\text{m}$;相位光栅 G1 到相位光栅 G2 的距离 R_2 和 G2 到探测器的距离 R_4 相等且 $R_2=R_4=R=450\ \text{mm}$;X 射线能量 20 keV;光源尺寸 $40.0\ \mu\text{m}$;探测器像素尺寸 $25\ \mu\text{m}$ 。

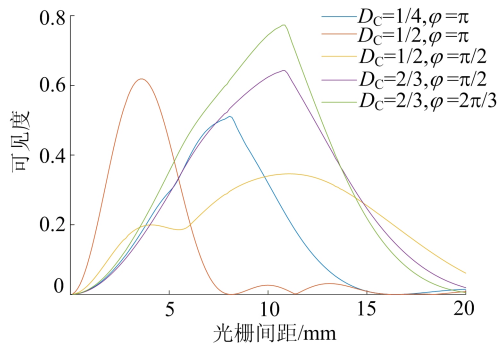


图 4 单色照明下不同占空比与相移组合的双相位光栅干涉仪的条纹可见度随光栅间距变化的规律

表 1 单色照明下条纹可见度峰值和可见度曲线的半高全宽

光栅参数	可见度峰值	半高全宽/mm
$D_C=1/4, \varphi=\pi$	0.51	6.2
$D_C=1/2, \varphi=\pi$	0.62	3.8
$D_C=1/2, \varphi=\pi/2$	0.35	10.9
$D_C=2/3, \varphi=\pi/2$	0.64	8.8
$D_C=2/3, \varphi=2\pi/3$	0.77	8.0

从图 4 和表 1 可以看出:占空比均为 $2/3$ 的双 $2\pi/3$ 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度峰值为 0.77,比占空比均为 $1/2$ 的双 π 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度峰值 0.62 提高约 24%;对于双 $\pi/2$ 相位光栅情形,占空比均为 $2/3$ 时条纹可见度峰值为 0.64,比占空比均为 $1/2$ 时的条纹可见度峰值 0.35 提高 83%;对于双 π 相位光栅组成的双相位光栅干涉仪,占空比均为 $1/4$ 时的条纹可见度峰值为 0.51,比占空比均为 $1/2$ 时的条纹可见度峰值 0.62 低约 18%。

由表 1 可知:占空比均为 $2/3$ 的双 $2\pi/3$ 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度曲线半高全宽为 8.0 mm,比占空比均为 $1/2$ 的双 π 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度曲线半高全宽 3.8 mm 提高约 111%,比占空比均为 $1/2$ 的双 $\pi/2$ 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度曲线

半高全宽 10.9 mm 减少约 27%;占空比均为 $2/3$ 的双 $\pi/2$ 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度曲线半高全宽为 8.8 mm,比占空比均为 $1/2$ 的双 $\pi/2$ 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度曲线半高全宽 10.9 mm 减少约 19%。

在多色照明下,对比研究 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度随光栅间距变化的规律,如图 5 所示。为了更直观地展现条纹可见度的变化规律,总结了多色照明下条纹可见度的峰值和条纹可见度曲线的半高全宽,见表 2 所列。图 5 和表 2 中: D_C 表示占空比; φ 表示相移。

多色照明的参数^[8]选择如下:多色照明模拟铯靶 X 射线源,光源峰值电压 34 kV,平均能量 20 keV;相位光栅周期 $p=1.3\ \mu\text{m}$;相位光栅 G1 到相位光栅 G2 的距离 R_2 和 G2 到探测器的距离 R_4 相等且 $R_2=R_4=R=500\ \text{mm}$;探测器像素尺寸 $25\ \mu\text{m}$;光源尺寸 $40.0\ \mu\text{m}$ 。

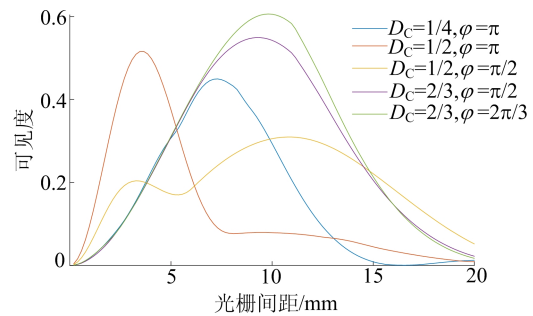


图 5 多色照明下不同占空比与相移组合的双相位光栅干涉仪的条纹可见度随光栅间距变化的规律

表 2 多色照明下条纹可见度峰值和可见度曲线的半高全宽

光栅参数	可见度峰值	半高全宽/mm
$D_C=1/4, \varphi=\pi$	0.45	6.5
$D_C=1/2, \varphi=\pi$	0.52	4.0
$D_C=1/2, \varphi=\pi/2$	0.31	11.2
$D_C=2/3, \varphi=\pi/2$	0.55	9.4
$D_C=2/3, \varphi=2\pi/3$	0.61	9.2

从图 5 和表 2 可以看出:占空比均为 $2/3$ 的双 $2\pi/3$ 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度峰值为 0.61,比占空比均为 $1/2$ 的双 π 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度峰值 0.52 提高约 17%;对于双 $\pi/2$ 相位光栅情形,占空比均为 $2/3$ 时的条纹可见度峰值为 0.55,比占空比均为 $1/2$ 时的条纹可见度峰值 0.31 提高 77%;对于双 π 相位光栅组成的双相位光栅干涉仪,占空比均为 $1/4$ 时的条

纹可见度峰值为 0.45,比占空比均为 1/2 时的条纹可见度峰值 0.52 低约 13%。

由表 2 可知:占空比均为 2/3 的双 $2\pi/3$ 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度曲线半高全宽为 9.2 mm,比占空比均为 1/2 的双 π 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度曲线半高全宽 4.0 mm 提高约 130%,比占空比均为 1/2 的双 $\pi/2$ 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度曲线半高全宽 11.2 mm 减少约 17%;占空比均为 2/3 的双 $\pi/2$ 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度曲线半高全宽为 9.4 mm,比占空比均为 1/2 的双 $\pi/2$ 相位光栅组成的 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度曲线半高全宽 11.2 mm 减少约 16%。

3 结 论

本文通过理论推导得到了单色 X 射线照明下几何对称装置的任意占空比的双相位光栅干涉仪的条纹强度公式,在此基础上给出了多色 X 射线照明下几何对称装置的任意占空比的双相位光栅干涉仪的条纹强度表达式;基于条纹强度表达式和条纹可见度的定义,通过数值计算得到双相位光栅干涉仪条纹可见度取得峰值时的占空比与相移的组合,对比研究了单色和多色照明下 X 射线双相位光栅干涉仪的条纹可见度随光栅间距变化的规律。结果表明:单色照明和多色照明下,占空比 2/3、相移 $2\pi/3$ 的情形与占空比 1/2、相移 π 的情形相比条纹可见度分别高 24%、17%;对于 $\pi/2$ 相移情形,占空比 2/3 与占空比 1/2 相比条纹可见度分别高 83%、77%。

[参 考 文 献]

[1] RAUCH T, RIEGER J, PELZER G, et al. Discrimination analysis of breast calcifications using X-ray dark-field radiography[J]. Medical Physics, 2020, 47(4): 1813-1826.
 [2] URBAN T, GASSERT F T, FRANK M, et al. Qualitative and quantitative assessment of emphysema using dark-field chest radiography[J]. Radiology, 2022, 303(1): 119-127.

[3] BLYKERS B K, ORGANISTA C, KAGIAS M, et al. Exploration of the X-ray dark-field signal in mineral building materials[J]. Journal of Imaging, 2022, 8(10): 282.
 [4] KAGIAS M, WANG Z, JEFIMOV K, et al. Dual phase grating interferometer for tunable dark-field sensitivity[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(1): 014105.
 [5] TANG R, ORGANISTA C, GOETHALS W, et al. Detailed analysis of the interference patterns measured in lab-based X-ray dual-phase grating interferometry through wave propagation simulation[J]. Optics Express, 2023, 31(2): 1677-1691.
 [6] GE Y, CHEN J, ZHU P, et al. Dual phase grating based X-ray differential phase contrast imaging with source grating: theory and validation[J]. Optics Express, 2020, 28(7): 9786-9801.
 [7] YAN A, WU X, LIU H. Quantitative theory of x-ray interferometers based on dual phase grating: fringe period and visibility[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23142-23155.
 [8] YAN A, WU X, LIU H. Predicting fringe visibility in dual-phase grating interferometry with polychromatic X-ray sources[J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2020, 28(6): 1055.
 [9] 朱佩平, 廖可梁, 何其利, 等. X 射线相位衬度成像的起源、发展和展望[J]. 中国体视觉与图像分析, 2022, 27(4): 334-354.
 [10] 杨君, 黄建衡, 单雨征, 等. 利用劳条件求取双相位光栅干涉仪灵敏度[J]. 光子学报, 2023, 52(1): 170-178.
 [11] COMAMALA J, ROMANO L, JEFIMOV K, et al. High sensitivity X-ray phase contrast imaging by laboratory grating-based interferometry at high Talbot order geometry[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2049-2064.
 [12] RIEGER J, MEYER P, PELZER G, et al. Designing the phase grating for Talbot-Lau phase-contrast imaging systems: a simulation and experiment study[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13357-13364.
 [13] GUSTSCHIN A, RIEDEL M, TAPHORN K, et al. High-resolution and sensitivity bi-directional X-ray phase contrast imaging using 2D Talbot array illuminators[J]. Optica, 2021, 8(12): 1588-1595.
 [14] MONGDAL P, KUMAR M, TIWARI P, et al. Experimental realization of talbot array illumination for a 2-dimensional phase grating[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 120(15): 153103.

(责任编辑 胡亚敏)