

基于莫尔条纹光刻对准中的二维 Hanning 自卷积窗

许非凡, 夏豪杰

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)

Email: 2021110003@mail.hfut.edu.cn

摘要: 本研究致力于探索一种易于实施的莫尔条纹频谱泄露抑制方法, 旨在实现高精度光刻对准。为此, 我们提出了一种的比现有窗函数性能更强的二维 Hanning 自卷积窗 (2D-HSCW), 研究了 1 到 4 阶 2D-HSCW 的主瓣和旁瓣特性。结果表明该方法成功地抑制了频谱泄露, 从而显著提高了相位提取的精确度, 实现了亚纳米级别的高精度光刻对准。

关键词: 光刻对准; 莫尔条纹; 频谱泄露; 自卷积窗

Two-dimensional Hanning self-convolution window in Moiré fringe-based lithography alignment

Feifan Xu, Haojie Xia

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This study is devoted to exploring an easy-to-implement method for spectral leakage suppression of Moiré fringes, aiming at high-precision lithography alignment. To this end, we propose a two-dimensional Hanning self-convolution window (2D-HSCW), which has better performance than the existing window functions, and investigate the main lobe and sidelobe characteristics of the 2D-HSCW from the 1st to the 4th order. The results show that the method successfully suppresses spectral leakage, which significantly improves the accuracy of phase extraction and enables high-precision lithography alignment at the sub-nanometer level.

Keywords: Lithography alignment; Moiré fringes; spectral leakage; self-convolution window.

1、研究背景

随着现代纳米加工和显微技术的不断演进, 基于莫尔条纹的测量技术逐渐成熟, 并在科学和工程领域得到广泛应用。近年来, 光刻领域为了实现高精度光刻对准的目标, 引入了一种基于莫尔条纹的高精度和高灵敏度的对准方法 [1], 从而提高了纳米加工的精度和效率。

为了适应下一代光刻制造的需要，对准必须达到亚纳米级的精度。然而，在应用中，莫尔条纹受到 CMOS 相机离散化捕捉、条纹图的非整数倍周期截断以及 FFT 非同步采样等影响，导致频谱泄露问题，从而对对准测量产生非常不利的影响 [2]。

为了有效抑制频谱泄露，加窗是一种可行的方法。在一维信号处理中，研究人员提出了自卷积窗，其具有低的峰值旁瓣电平 (PSLL) 和大的旁瓣衰减速率 (SLDR)，且其频谱泄露抑制能力随着卷积阶数的增加而迅速提高，因此可以为信号的参数精确测量提供良好的支持。然而，迄今为止，在二维信号处理领域，利用自卷积窗实现频谱泄露抑制的方法尚未被报道。

在本研究中，我们将自卷积窗技术扩展到了二维图像处理领域，即 2D-HSCW，旨在抑制莫尔条纹图的频谱泄露，从而实现更高精度的错位测量。与经典窗函数相比，具有合理阶数的 2D-HSCW 在频谱泄露抑制方面表现出更高的性能。

2、研究内容

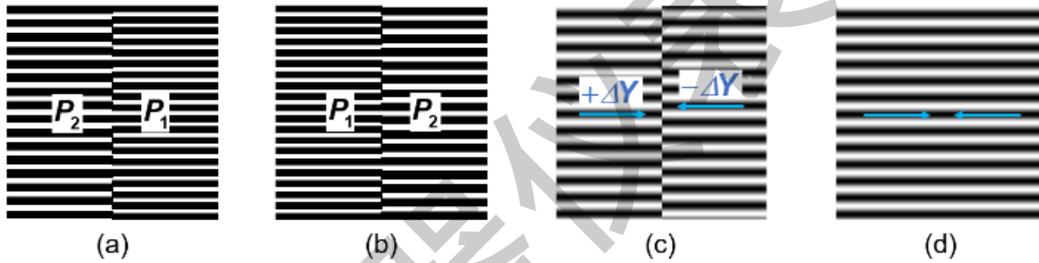


图 1. (a) 晶圆对准标记，(b) 掩膜对准标记，(c) 错位莫尔条纹，(d) 对准莫尔条纹

所使用的晶圆和掩膜对准标记如图 1 (a) 和 (b) 所示，均由两组周期略有不同的线光栅 P_1 和 P_2 组成。在对准过程中，均匀且准直的照明光穿过两个对准标记时，会形成如图 1(c) 和 (d) 分别表示发生错位和完全对准时的莫尔条纹，每个条纹图案都由左右两组莫尔条纹组成，具有相同的周期 P_m 可以表示为：

$$P_m = P_1 P_2 / (P_2 - P_1) \quad \#(1)$$

通常，图 1(c) 或 (d) 中的左右连续条纹可以被 CMOS 相机捕获的离散条纹强度表示为：

$$I_{lef}(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [2\pi y(f_1 - f_2) + 2\pi f_1 \Delta y], \quad \#(2)$$

$$I_{rig}(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [2\pi y(f_1 - f_2) - 2\pi f_2 \Delta y], \quad \#(3)$$

其中， $a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 分别表示在条纹图像素点 (x, y) 处的背景光强和振幅调制。 $f_1 = 1/P_1$ 和 $f_2 = 1/P_2$ 分别表示两个线光栅的空间频率。左右两组条纹的相位差 $\Delta\varphi$ 为：

$$\Delta\varphi = \varphi_{left} - \varphi_{right} = 2\pi(f_1 + f_2)\Delta y \quad \#(4)$$

根据等式 (4)，实际错位可推导为：

$$\Delta y = \Delta\varphi / [2\pi(f_1 + f_2)] \quad \#(5)$$

考虑到条纹图的频率单一性和光刻的实时性要求，使用 FFT 获取条纹图的包裹相位，并通过解包裹算法得到连续相位 [3]：

$$\varphi(x, y) = \text{angle}[\mathcal{F}^{-1}(H_{-1}((\mathcal{F}(W_{HSCW} \cdot I_M))))] \quad \#(7)$$

其中， $\mathcal{F}(\cdot)$ 和 $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 分别表示正逆 FFT 算子， $H_{+1}(\cdot)$ 是选择包含错位信息负一级频谱的带通滤波器， $\text{angle}[\cdot]$ 是相位提取。 W_{HSCW} 为所提出的 2D-HSCW，表示为：

$$w_{2D-HSCW}^p(N_x, N_y) = \underbrace{\left\{ \begin{aligned} & [w_H(M_x) \cdot w_H(M_y)] * \dots \\ & * [w_H(M_x) \cdot w_H(M_y)] \end{aligned} \right\}}_p \quad \#(9)$$

其中， N_x, N_y 为 HSCW 纵横方向的尺寸， p 为自卷积的阶数， w_H 为 Hanning 窗时域表达， M_x, M_y 为其尺寸。1 到 4 阶的时域振幅和幅度频率响应分别如图 2 所示。

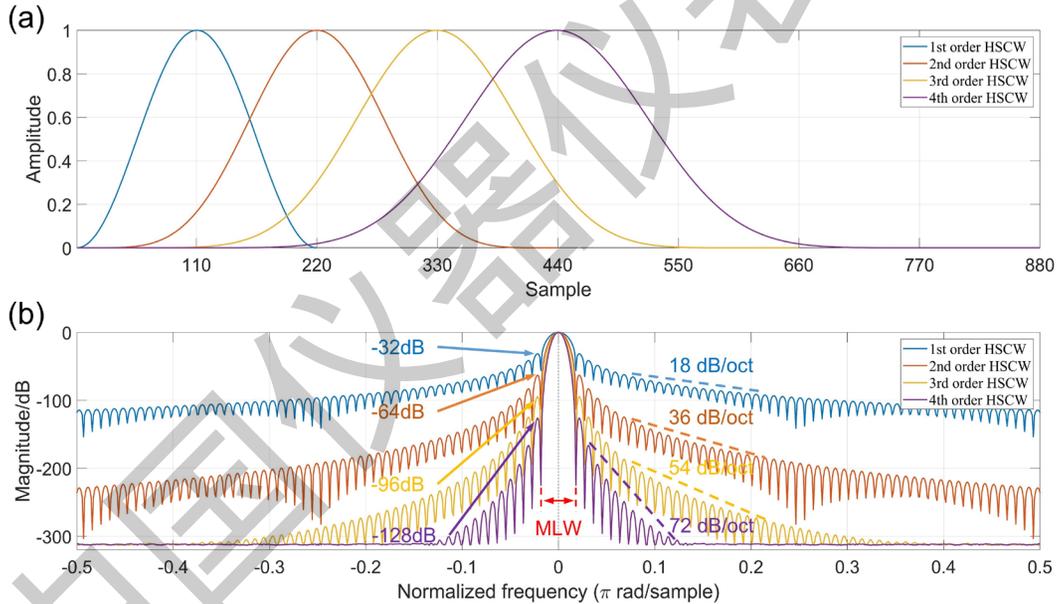


图 2. (a) 时域振幅，(b) 幅度频率响应

2D-HSCW 的 SLDR 和 PSLL 与卷积阶数成正比关系，即 SLDR 与 PSLL 随着卷积阶数的升高而得到加强，从而具备出色的旁瓣特性。这使得 2D-HSCW 能够有效减少频谱泄露影响，提高相位提取精度。

所提出的 2D-HSCW 方法与其他经典窗相比，如图 3 所示，由于 Hamming 窗的 PSLL 较小，在半周截断处泄露较大，造成测量误差达到 24.5nm，而 Harris 和 Nuttall 窗具有较低的 PSLL，频谱泄露较少，测量误差低至在 5nm 左右，但是与 2 阶或 4 阶 HSCW 相比，它们的 SLDR 偏低，其性

能受到一定限制。所提出的 2D-HSCW 可以在任何截断情况下都能实现较高的测量精度。这使得其
在实际应用中表现出更优越的性能，从而成为解决非整数倍周期截断带来频谱泄露问题的一种有
效方法。

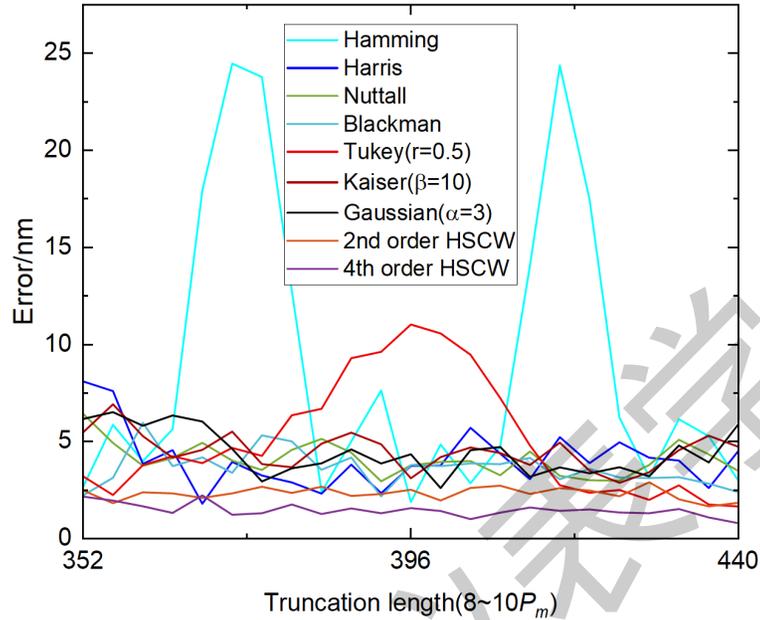


图 3. 基于 2、4 阶 HSCW 及经典窗的对准精度。

3、结论

为了消除频谱泄露对对准精度所带来的干扰，本研究提出了一种创新的解决方案—基于
2D-HSCW 的条纹图时域加权方法。经过对卷积阶数的精心选择，2D-HSCW 方法呈现出
出色的旁瓣特性，有效地实现了频谱泄露的抑制。随着卷积阶数的逐渐增加，该方法的
抑制能力也显著提升，最终实现了令人瞩目的亚纳米级对准精度。

参考文献

- [1] Xu F, Chang S, Zhao Y, Li W, Xia H. High-precision moiré alignment method using centrosymmetric grating for 3D interlayer interconnect. *Opt Lasers Eng* 2023;171:107815.
- [2] Xu F, Zhao Y, Ni L, Wu Q, Xia H. Two-dimensional Hanning self-convolution window for enhancing Moiré fringe alignment in lithography. *Mech Syst Sig Process* 2024;208:111052.
- [3] Huang L, Kemaq Q, Pan B, Asundi AK. Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry. *Opt Lasers Eng* 2010;48:141–8.