

激光与光电子学进展

光束偏振对自参考干涉信号对比度的影响

徐孟南^{1,2}, 卢增雄^{1,2***}, 齐月静^{1,2**}, 李璟^{1,2*}, 马敬¹¹中国科学院微电子研究所, 北京 100029;²中国科学院大学, 北京 100094

摘要 相位光栅位置测量系统是实现超精密制造的核心, 自参考干涉信号对比度是影响相位光栅位置测量精度的重要因素之一, 而光束偏振特性直接决定了自参考干涉信号的对比度。采用琼斯矩阵和矢量形式反射定律, 对自参考干涉仪棱镜中的传输光束进行了偏振追迹, 构建了相位光栅位置测量系统的琼斯矩阵模型, 并用物理光场数值分析软件 VirtualLab 验证了该模型的准确性。基于该模型分析了偏振分光面消光比、入射光偏振态及棱镜光程差对自参考干涉信号对比度的影响, 结果表明, 在波长为 λ 的照明光束下, 为保证干涉信号对比度优于 0.98, 偏振分束镜的消光比需大于 122, 入射光椭圆偏角 ψ 和椭圆度 $\tan \epsilon$ 分别在 $(0.693 \text{ rad}, 0.878 \text{ rad})$ 和 $(-0.093, 0.093)$ 范围内, 棱镜光程差需控制在 $(-0.03\lambda, 0.03\lambda)$ 范围内。综合考虑后, 要求入射光椭圆度的取值范围为 $0.531\delta \pm 0.087$ (δ 为自参考干涉仪棱镜的相位差)。该分析结果可为相位光栅位置测量系统中光束偏振特性的调控补偿提供理论依据, 对提高自参考干涉信号对比度及相位光栅位置测量系统的精度具有重要意义。

关键词 物理光学; 偏振; 自参考干涉仪; 琼斯矩阵; 干涉信号对比度

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.2326002

Influence of Beam Polarization on Contrast of Self-Referencing Interference Signal

Xu Mengnan^{1,2}, Lu Zengxiong^{1,2***}, Qi Yuejing^{1,2**}, Li Jing^{1,2*}, Ma Jing¹¹Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract The phase grating position measurement system is the core of achieving ultraprecision manufacturing. The contrast of the self-referencing interference signal significantly influences the accuracy of measuring the position of phase gratings, which is directly determined by the polarization properties of beams. In this study, the Jones matrix and vector-form reflection law are used to trace the polarization of the transmitted beam in the self-referencing interferometer prism, and the Jones matrix model of the phase grating position measurement system is constructed; then, based on the physical light field numerical analysis software VirtualLab, the accuracy of the model is verified. Based on this model, the influence of the extinction ratio of the polarization beam splitter, the polarization state of the incident light, and the optical path difference of the prism on the contrast of the self-referencing interference signal is analyzed. The results show that to ensure that the contrast of the interference signal is better than 0.98 under the illumination beam of wavelength λ , the extinction ratio of the polarization beam splitter needs to be greater than 122; in addition, the incident light ellipticity ψ and ellipticity $\tan \epsilon$ are $(0.693 \text{ rad}, 0.878 \text{ rad})$ and $(-0.093, 0.093)$, respectively, and the prism optical path difference needs to be controlled within $(-0.03\lambda, 0.03\lambda)$. After

收稿日期: 2021-02-17; 修回日期: 2021-03-18; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家科技重大专项

通信作者: *lijing2018@ime.ac.cn; **qi Yuejing@ime.ac.cn; ***luzengxiong@ime.ac.cn

comprehensive consideration, the value range of the incident light ellipticity is required to be $0.531\delta \pm 0.087$ (δ is the phase difference from the reference interferometer prism). The analysis results can provide a theoretical basis for adjusting and compensating for the beam polarization characteristics in the phase grating position measurement system and are crucial for improving the contrast of the self-referencing interference signals and accuracy of the phase grating position measurement system.

Key words physical optics; polarization; self-referencing interferometer; Jones matrix; interference signal contrast
OCIS codes 260.2130; 120.3180; 050.1950

1 引言

相位光栅位置测量系统利用光栅移动产生多普勒频移光,通过解算频移光干涉信号实现精确的位置测量,在超精密制造领域具有重要应用^[1-3]。干涉信号对比度直接决定了位置解算能达到的精度,是相位光栅位置测量系统的关键指标。相位光栅的结构参数^[4-6]、传输光束的偏振特性^[7]等是影响干涉信号对比度的关键因素。

Keij 等^[8]提出了一种基于自参考干涉原理的相位光栅位置测量方案,用多波长偏振光照明相位光栅产生多级衍射光,然后通过自参考干涉仪产生干涉信号实现光栅位置测量。该方案采用自参考干涉方式,不需要提供额外的参考光,显著增强了位置测量系统的鲁棒性和测量精度^[9]。人们对该测量方案中相位光栅的结构参数^[4-6]、变形^[10-12]等研究较多,而对光路中光束偏振特性的定量分析较少。基于自参考干涉原理的相位光栅位置测量系统中,涉及多个偏振光学元件,入射光束偏振态、偏振光学元件对传输光束偏振特性的影响会进一步影响自参考干涉信号的对比度。因此,分析光束在相位光栅位置测量系统中传输时的偏振特性,可为光束偏振特性的调控补偿提供理论依据,对提高自参考干涉信号对比度具有重要意义。

本文首先采用琼斯矩阵和矢量形式的反射定律,对自参考干涉仪棱镜中的传输光束进行偏振追迹,建立相位光栅位置测量系统的琼斯矩阵模型。然后依据该模型分析偏振分光面消光比、入射光偏振态及自参考干涉仪棱镜光程差对干涉信号对比度的影响,为偏振光学器件的参数选择和光束偏振特性的调控补偿提供了理论依据。

2 理论模型

基于自参考干涉原理的相位光栅位置测量系统光路如图 1(a)所示,自参考干涉仪由下棱镜 P_1 和上棱镜 P_2 组成,周期为 d 的相位光栅 (PG) 第 n 级衍射光 E_n ($n = -m, \dots, -1, 0, +1, \dots, m$) 从 S_{11} 面入射后(刻线沿 X 方向),经 P_1 和 P_2 间的偏振分光面 S_0 分成 S 偏振分量 $E_{n,S}$ 和 P 偏振分量 $E_{n,P}$ 。棱镜 P_1 的传输光路如图 1(b)所示, $E_{n,S}$ 依次经 S_{12} 、 S_{13} 和 S_{14} 面反射后再次入射到 S_0 面上,分解成 S 偏振分量 $E_{n,SS}$ (杂光) 和 P 偏振分量 $E_{n,SP}$, $E_{n,SP}$ 经 S_{24} 面出射,偏振方向沿 Z 轴;棱镜 P_2 的传输光路如图 1(c)所示, $E_{n,P}$ 依次经 S_{21} 、 S_{22} 和 S_{23} 面反射后再次入射到 S_0 面上,分解成 S 偏振分量 $E_{n,PS}$ 和 P 偏振分量 $E_{n,PP}$ (杂光), $E_{n,PS}$ 经 S_{24} 面出射,偏振方向沿 Y 轴。 $E_{n,SP}$ 和 $E_{n,PS}$ 经二分之一波片 (HWP) 后,偏振方向旋转 45° ,经偏振分光棱镜 (PBS) 后, $E_{n,SP}$ 和 $E_{n,PS}$ 的 S 偏振分量 $E_{n,SPS}$ 和 $E_{n,PSS}$ (包括 $E_{m,SPS}$ 、 $E_{-m,PSS}$ 、 $E_{+m,PSS}$ 和 $E_{-m,SPS}$) 发生干涉并由透镜 (L) 会聚后到达探测器 (D),对 D 上的干涉信号进行处理可获得 PG 的位置信息。采用琼斯矩阵和矢量形式的反射定律进行偏振追迹,可分析 D 上干涉信号的对比度。

自参考干涉仪棱镜中,偏振分光面 S_0 透射和反射时的琼斯矩阵 $J_{S_0,T}$ 和 $J_{S_0,R}$ 以及反射面 i 的琼斯矩阵 J_i 可表示为

$$\begin{cases} J_{S_0,T} = \begin{bmatrix} t_{S_0,P} & 0 \\ 0 & t_{S_0,S} \end{bmatrix}, \\ J_{S_0,R} = \begin{bmatrix} r_{S_0,P} & 0 \\ 0 & r_{S_0,S} \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (1)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} |R_{i,P}| \exp(i\varphi_{i,P}) & 0 \\ 0 & |R_{i,S}| \exp(i\varphi_{i,S}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i,P} & 0 \\ 0 & r_{i,S} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, $t_{S_0,P}$ 、 $t_{S_0,S}$ 和 $r_{S_0,P}$ 、 $r_{S_0,S}$ 分别为 S_0 对 P、S 偏振分量的透射系数和反射系数, $R_{i,P}$ 、 $R_{i,S}$ 和 $\varphi_{i,P}$ 、 $\varphi_{i,S}$ 分别为

P、S 偏振分量在第 i 个反射面的振幅反射率和相位变化, $r_{i,P}$ 、 $r_{i,S}$ 分别为第 i 个反射面对 P、S 偏振分量的

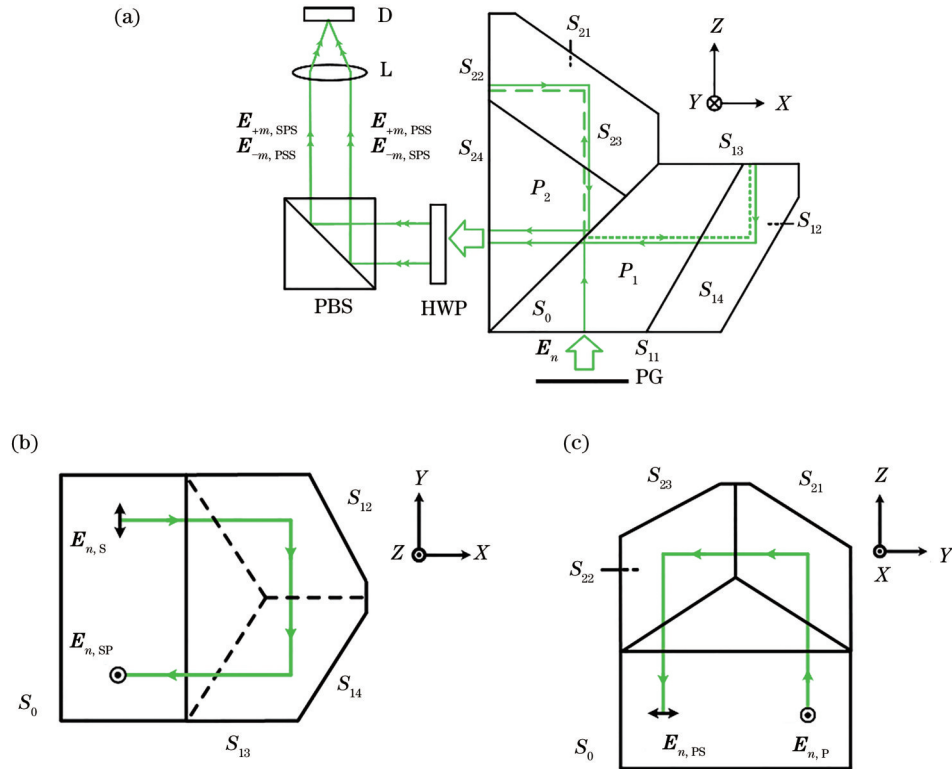


图 1 相位光栅位置测量系统的光路。(a)相位光栅位置测量系统的光路;(b)棱镜 P_1 的俯视图;(c)棱镜 P_2 的侧视图
Fig. 1 Optical path of the phase grating position measurement system. (a) Optical path of the phase grating position measurement system; (b) top view of prism P_1 ; (c) side view of prism P_2

反射系数。HWP 对 $E_{n,SP}$ 、 $E_{n,PS}$ 的琼斯矩阵 J_{HWP1} 、 J_{HWP2} 及 PBS 对反射光的琼斯矩阵 $J_{PBS,R}$ 可表示为

$$\begin{cases} J_{HWP1} = \begin{bmatrix} \cos[2(\phi - \pi/2)] & \sin[2(\phi - \pi/2)] \\ \sin[2(\phi - \pi/2)] & -\cos[2(\phi - \pi/2)] \end{bmatrix} \\ J_{HWP2} = \begin{bmatrix} \cos 2\phi & \sin 2\phi \\ \sin 2\phi & -\cos 2\phi \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (3)$$

$$J_{PBS,R} = \begin{bmatrix} r_{PBS,P} & 0 \\ 0 & r_{PBS,S} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, ϕ 为 HWP 快轴与 Z 轴正向的夹角, $r_{PBS,P}$ 、 $r_{PBS,S}$ 分别为 PBS 对 P、S 偏振分量的反射系数。

为对 S_{11} 面与 D 之间的光束进行偏振追迹, 还需给出 P_1 或 P_2 中第 i 个反射面到第 $i+1$ 个反射面之间的旋转矩阵。如图 2 所示, 设空间两反射面 i 和 $i+1$ 的单位法向量分别为 N_i 和 N_{i+1} , 反射面 i 和 $i+1$ 对应的入射光、反射光单位波矢量分别为 $k_{i,I}$ 、 $k_{i,R}$ 和 $k_{i+1,I}$ 、 $k_{i+1,R}$ 。将光矢量 K 分解成 P、S 偏振分量, 并与光矢量 K 构成局部坐标系。设反射面 i 上入射光和反射光的 P、S 偏振分量单位矢量分别为 $p_{i,I}$ 、 $s_{i,I}$ 和 $p_{i,R}$ 、 $s_{i,R}$, 反射面 $i+1$ 上入射光和反射光的 P、S 偏振

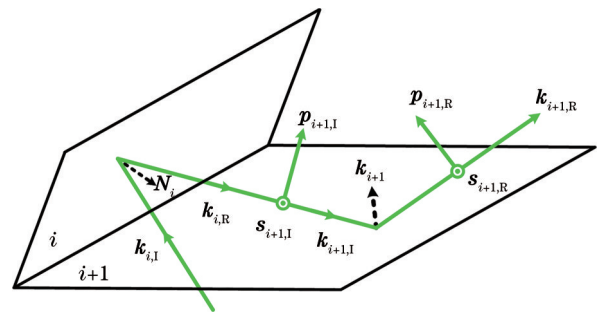


图 2 空间两相邻反射面间光矢量关系示意图
Fig. 2 Schematic diagram of light vector relationship between two adjacent reflecting surfaces in space

分量单位矢量分别为 $p_{i+1,I}$ 、 $s_{i+1,I}$ 和 $p_{i+1,R}$ 、 $s_{i+1,R}$ 。根据矢量反射定律可知

$$k_{i,R} = k_{i,I} - 2N_i(k_{i,I} \cdot N_i). \quad (5)$$

在局部坐标系下, P、S 偏振分量与波矢量的单位矢量和反射面 i 的单位法向量满足

$$s_{i,I} = s_{i,R} = \frac{k_{i,I} \times N_i}{\sqrt{1 - (k_{i,I} \cdot N_i)^2}} = \frac{k_{i,R} \times N_i}{\sqrt{1 - (k_{i,R} \cdot N_i)^2}}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} p_{i,I} = s_{i,I} \times k_{i,I} \\ p_{i,R} = s_{i,R} \times k_{i,R} \end{cases}. \quad (7)$$

设反射面 i 的出射光矢量 $E_{i,R}$ 为

$$\mathbf{E}_{i,R} = E_P \mathbf{p}_{i,R} + E_S \mathbf{s}_{i,R} = \begin{bmatrix} E_P \\ E_S \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中, E_P 、 E_S 为光矢量 $\mathbf{E}_{i,R}$ 中的 P、S 偏振分量。反射面 $i+1$ 的入射光矢量 $\mathbf{E}_{i+1,I}$ 即反射面 i 的出射光矢量 $\mathbf{E}_{i,R}$, 则

$$\mathbf{E}_{i+1,R} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{i,R} \cdot \mathbf{p}_{i+1,I} & \mathbf{s}_{i,R} \cdot \mathbf{p}_{i+1,I} \\ \mathbf{p}_{i,R} \cdot \mathbf{s}_{i+1,I} & \mathbf{s}_{i,R} \cdot \mathbf{s}_{i+1,I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_P \\ E_S \end{bmatrix} = \mathbf{G}_{i+1} \mathbf{E}_{i,R}, \quad (9)$$

式中, \mathbf{G}_{i+1} 为局部坐标系下反射面 i 到反射面 $i+1$ 的旋转矩阵。入射光 E_n 的琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{E}_n = A_n \begin{bmatrix} \cos \epsilon \cos \psi - i \sin \epsilon \sin \psi \\ \cos \epsilon \sin \psi + i \sin \epsilon \cos \psi \end{bmatrix} \exp \left[i \left(\varphi_{0n} + \frac{2\pi n \Delta y}{d} \right) \right], \quad (10)$$

式中, ϵ 的正切值 $\tan \epsilon$ 为椭圆度 ($-\pi/4 \leq \epsilon < \pi/4$), ψ 为椭圆角 ($0 \leq \psi < \pi$), A_n 和 φ_{0n} 分别为 n 级衍射光的振幅和初相位, Δy 为光栅在 Y 方向上的位移量。考

虑到实际加工误差, 棱镜 P_1 相对 P_2 存在光程差, 由此引入的相位差为 δ 。则 E_n 经棱镜 P_1 、 P_2 传输后, 到达 D 上的光矢量可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{n,PSS} = \exp(i\delta) \mathbf{J}_{PBS,R} \mathbf{J}_{HWP} \mathbf{J}_{S_0,R} \mathbf{G}_{S_0} \mathbf{J}_{S_{23}} \mathbf{G}_{S_{23}} \mathbf{J}_{S_{22}} \mathbf{G}_{S_{22}} \mathbf{J}_{S_{21}} \mathbf{G}_{S_{21}} \mathbf{J}_{S_0,T} \mathbf{E}_n \\ \mathbf{E}_{n,SPS} = \mathbf{J}_{PBS,R} \mathbf{J}_{HWP} \mathbf{J}_{S_0,T} (-\mathbf{G}_{S_0}) \mathbf{J}_{S_{14}} \mathbf{G}_{S_{14}} \mathbf{J}_{S_{13}} \mathbf{G}_{S_{13}} \mathbf{J}_{S_{12}} \mathbf{G}_{S_{12}} \mathbf{J}_{S_0,R} \mathbf{E}_n \end{cases}, \quad (11)$$

D 上的干涉信号可表示为

$$I = \sum_{n=-m}^m \left| \mathbf{E}_{n,PSS} + \mathbf{E}_{-n,SPS} \right|^2, \quad (12)$$

该干涉信号的对比度 V 可表示为

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (13)$$

式中, I_{\max} 和 I_{\min} 分别为 D 上干涉信号的最大值和最小值。

3 分析与讨论

3.1 理想干涉信号及仿真实验验证

在理想情况下, n 级 PG 衍射光 \mathbf{E}_n 为 XY 平面内的线偏振光, 且其偏振方向和一、三象限的角平分线重合, 此时, $\tan \epsilon = 0$, $\psi = \pi/4$; S_0 对 P、S 偏振分量的透射系数和反射系数满足: $t_{S_0,P} = r_{S_0,S} = 1$, $t_{S_0,S} = r_{S_0,P} = 0$, 即 S_0 与 PBS 的消光比 τ_{S_0} 、 τ_{PBS} 无穷大。其中, $\tau_{S_0} = t_{S_0,P}^2 / t_{S_0,S}^2$, $\tau_{PBS} = t_{PBS,P}^2 / t_{PBS,S}^2$; 且光在 P_1 和 P_2 中传输的光程一致, 即 $\delta = 0$ 。在上述条件下, 当 HWP 快轴与 Z 轴的夹角 $\phi = 22.5^\circ$ 时, $\mathbf{E}_{0,SP}$ 和 $\mathbf{E}_{0,PS}$ 合成为一束偏振方向沿 Z 轴的线偏振光, 经 PBS 后全部透射, D 上无 0 级衍射光, 可获得最佳干涉信号对比度。棱镜 P_1 和 P_2 中各反射面间的旋转矩阵如表 1 所示。

为验证理论模型的正确性, 采用物理光场数值分析软件 VirtualLab 进行仿真实验, 并对比了仿真模型与理论模型的计算结果。设 PG 的反射率为 0.5, 占空比为 0.5, 周期 $d = 16 \mu\text{m}$, 槽深为 166 nm, 在波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 振幅光的正入射下, 0 级、 ± 1

表 1 棱镜 P_1 和 P_2 中各反射面间的旋转矩阵

Table 1 Rotation matrix between the reflective surfaces in prisms P_1 and P_2

\mathbf{G}_{S_0}	$\mathbf{G}_{S_{12}}, \mathbf{G}_{S_{21}}$	$\mathbf{G}_{S_{13}}, \mathbf{G}_{S_{22}}$	$\mathbf{G}_{S_{14}}, \mathbf{G}_{S_{23}}$
$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

级、 ± 3 级、 ± 5 级、 ± 7 级和 ± 9 级衍射光的衍射效率 $|A_n|^2$ 分别为 0.0519、0.1297、0.0145、0.0053、0.0027 和 0.0017, 仿真得到 Δy 在一个信号周期 ($-8 \sim 0 \mu\text{m}$) 内不同位置的干涉信号如图 3 所示。PG 沿 Y 方向从 $-16 \mu\text{m}$ 运动到 $16 \mu\text{m}$ 时理想情况下探测器 D 上的归一化干涉信号如图 4 所示。可以发现, 理论模型与仿真实验在 D 上采集的归一化干涉信号重合, 此时干涉信号的对比度 $V_e = V = 1$ 。其中, V_e 为仿真实验得到的干涉信号对比度。为验证本模型的正确性, 基于该理论模型分析了偏振分光面消光比、入射光偏振态及自参考干涉仪棱镜光程差对干涉信号对比度的影响。

3.2 偏振分光面消光比对干涉信号对比度的影响

实际情况中, 偏振分光面 S_0 及 PBS 存在漏光问题, 即 $t_P \neq 1$, $r_S \neq 1$, $t_S \neq 0$ 及 $r_P \neq 0$ 。当 $\tan \epsilon = 0$, $\psi = \pi/4$ 且 $\delta = 0$ 时, τ_{S_0} 对 D 上干涉信号对比度 V 及干涉信号峰值强度 I_{\max} 的影响如图 5 所示。可以发现, τ_{S_0} 不会影响干涉信号对比度, 但对干涉信号峰值强度的影响较大。若干涉信号强度较弱, 则易受探测器上噪声影响, 导致干涉信号的信噪比下降, 最终影响测量精度。当 τ_{S_0} 达到 1000 时, 干涉信

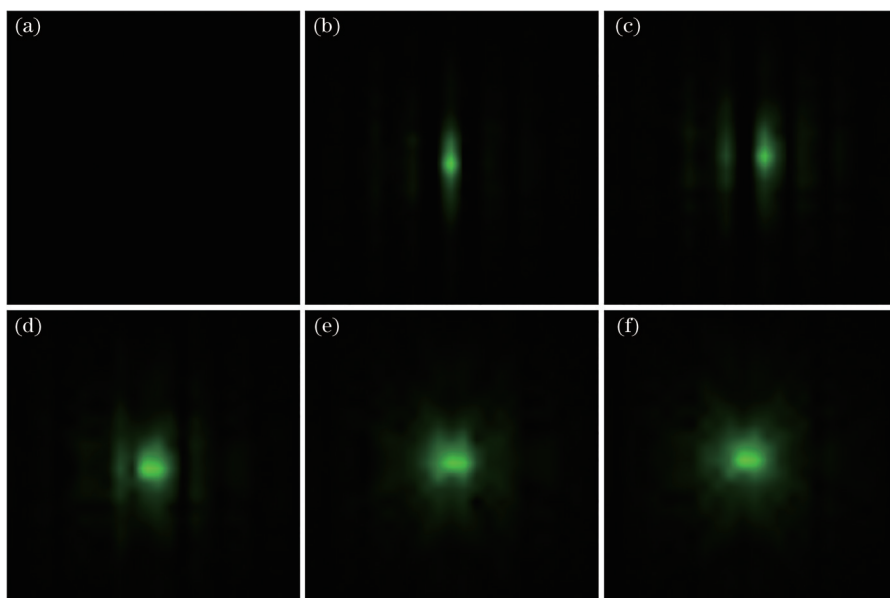


图 3 相位光栅不同位置的干涉信号(仿真实验)。(a) $\Delta y = -8 \mu\text{m} \& 0 \mu\text{m}$; (b) $\Delta y = -7.2 \mu\text{m} \& -0.8 \mu\text{m}$; (c) $\Delta y = -6.4 \mu\text{m} \& -1.6 \mu\text{m}$; (d) $\Delta y = -5.6 \mu\text{m} \& -2.4 \mu\text{m}$; (e) $\Delta y = -4.8 \mu\text{m} \& -3.2 \mu\text{m}$; (f) $\Delta y = -4 \mu\text{m}$

Fig. 3 Interference signals at different positions of the phase grating (simulation experiment). (a) $\Delta y = -8 \mu\text{m} \& 0 \mu\text{m}$; (b) $\Delta y = -7.2 \mu\text{m} \& -0.8 \mu\text{m}$; (c) $\Delta y = -6.4 \mu\text{m} \& -1.6 \mu\text{m}$; (d) $\Delta y = -5.6 \mu\text{m} \& -2.4 \mu\text{m}$; (e) $\Delta y = -4.8 \mu\text{m} \& -3.2 \mu\text{m}$; (f) $\Delta y = -4 \mu\text{m}$

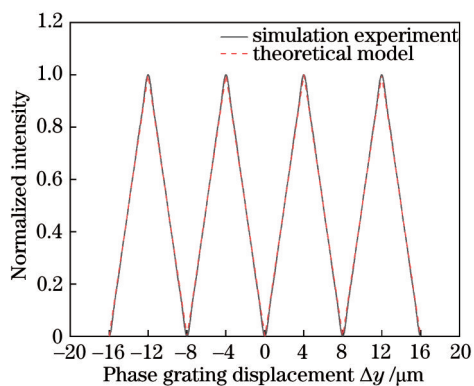


图 4 理想情况下探测器 D 上的归一化干涉信号

Fig. 4 Normalized interference signal on detector D under ideal conditions

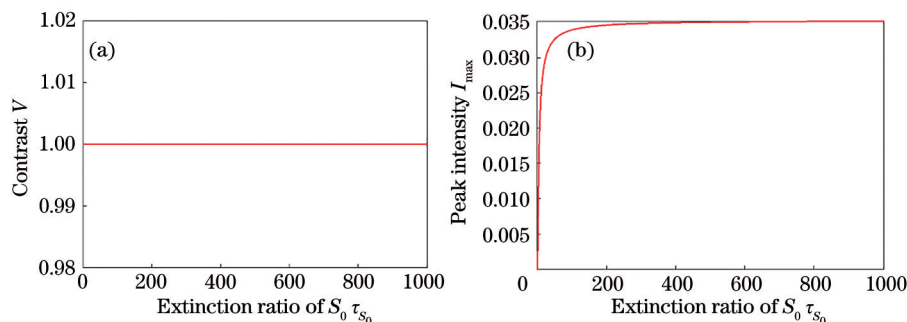


图 5 S_0 消光比对于干涉信号对比度及峰值强度的影响。(a) 信号对比度; (b) 峰值强度

Fig. 5 Influence of S_0 extinction ratio on the interference signal contrast and peak intensity. (a) Signal contrast; (b) peak intensity

号峰值强度达到最大值,为 0.035。

当 $\tau_{S_0} = 1000$ 时, τ_{PBS} 对 V 和 I_{max} 的影响如图 6 所示。可以发现,干涉信号对比度和峰值强度均随 τ_{PBS} 的增大而增大,当 τ_{PBS} 达到 1000 时,干涉信号对比度 V 达到最大值 1,峰值强度为 0.035。为保证干涉信号对比度优于 0.98,要求 $\tau_{\text{PBS}} > 122$ 。

3.3 入射光偏振态对干涉信号对比度的影响

当入射光为一般情况下的椭圆偏振光,且 $t_{S_0,P} = r_{S_0,S} = 1, t_{S_0,S} = r_{S_0,P} = 0, \delta = 0$ 时,干涉信号对比度 V 随入射光椭圆度 $\tan \epsilon$ 和椭圆角 ψ 的变化曲线如图 7 所示。可以发现,当且仅当椭圆度 $\tan \epsilon = 0$,椭圆角 $\psi = \pi/4$,即入射光为线偏振光且偏振方向

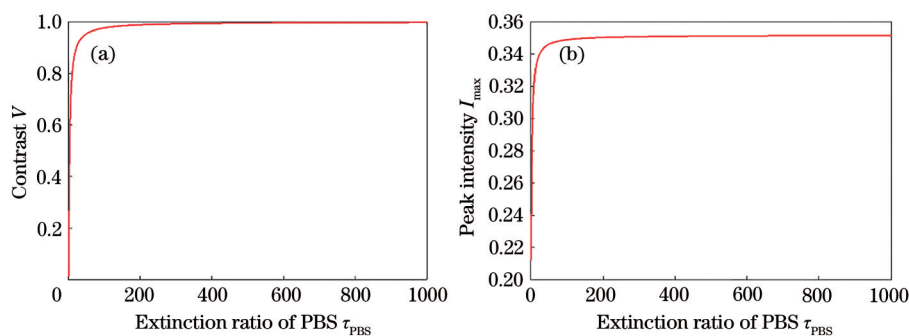


图 6 PBS 消光比对干涉信号对比度及峰值强度的影响。(a) 信号对比度; (b) 峰值强度

Fig. 6 Influence of PBS extinction ratio on interference signal contrast and peak intensity. (a) Signal contrast; (b) peak intensity

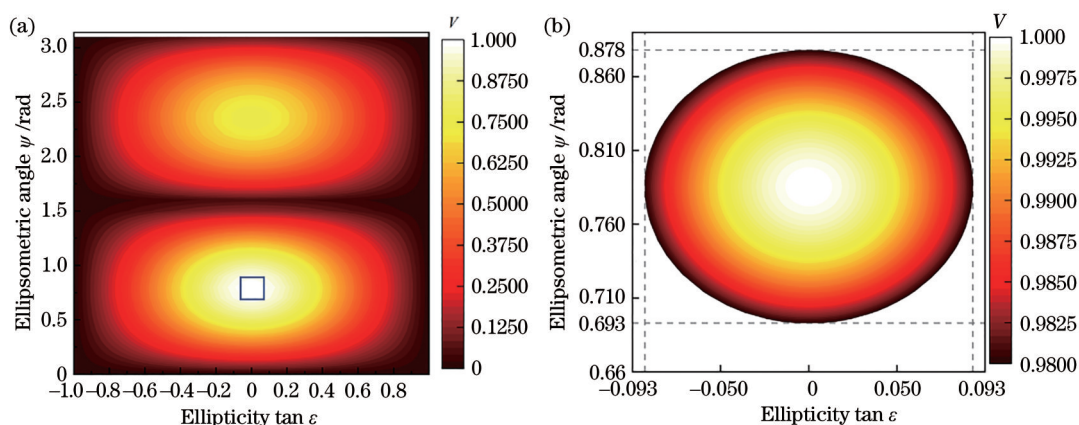


图 7 入射光偏振态对干涉信号对比度的影响。(a) 入射光椭圆度和椭偏角与干涉信号对比度的关系; (b) 局部放大图

Fig. 7 Influence of the polarization state of the incident light on the contrast of the interference signal. (a) Relationship between the ellipticity and ellipse angle of the incident light and the contrast of the interference signal; (b) partial enlargement

沿 XY 平面第一、三象限的角平分线方向时, V 可获得唯一极大值 1, 偏离该偏振态会使干涉信号对比度下降。若要使 V 达到 0.98 以上, 则 ψ 的取值范围为 $(0.693 \text{ rad}, 0.878 \text{ rad})$, $\tan \epsilon$ 的取值范围为 $(-0.093, 0.093)$ 。当入射光为线偏振光 ($\tan \epsilon = 0$), 椭偏角 ψ 在 $[0, \pi)$ 范围内时, 干涉信号对比度在 $\psi = \pi/4$ 和 $\psi = 3\pi/4$ 两个位置存在极大值 1 和 0.75; 当 $\psi = k\pi/2 (k=0, 1, \dots)$ 时, 干涉信号对比度下降到 0; 当入射光椭偏角 $\psi = \pi/4$ 时, 仅在 $\tan \epsilon = 0$ 时干涉信号对比度取得极大值 1; 当 $\tan \epsilon = \pm 1$, 即入射光为圆偏振光时, 干涉信号对比度为 0。

3.4 自参考干涉仪棱镜光程差对干涉信号对比度的影响

自参考干涉仪棱镜 P_1 和 P_2 在实际加工及胶合时均存在误差, 导致光束在 P_1 和 P_2 中传输时存在光程差 (OPD), 即相位差 δ 不为 0。此时, 即使入射光偏振态为理想情况, 也会导致 0 级衍射光进入 D, 从而降低干涉信号的对比度。干涉信号对比度

随 δ 的变化曲线如图 8 所示。可以发现, 当 $\delta = 0$ 时, 干涉信号对比度达到最大值 1; 当 $\delta = \pm \pi/2$ 时, 干涉信号对比度为 0。若要求干涉信号对比度达到 0.98 以上, 则相位差 δ 需控制在 $(-0.18 \text{ rad}, 0.18 \text{ rad})$ 范围内, 即 P_1 和 P_2 的光程差应控制在 $(-0.03\lambda, 0.03\lambda)$ 范围内。

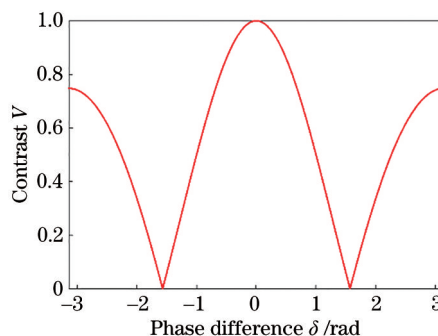


图 8 干涉信号对比度与相位差的变化关系

Fig. 8 Relationship between the contrast of the interference signal and the phase difference

3.5 自参考干涉仪棱镜光程差与入射光偏振态对干涉信号对比度的影响

为了在实际应用中保证干涉对比度达到一定要求,需结合实际加工水平对上述三种影响因素进行耦合,综合分析其对干涉信号对比度的影响。考

虑偏振分光面 S_0 或 PBS 不理想、入射光为非理想线偏光以及 P_1 和 P_2 之间的光程差等因素时, VirtualLab 仿真实验与理论模型计算得到的干涉信号对比度如表 2 所示。可以发现,仿真实验与理论模型的结果基本一致。

表 2 不同参数下仿真实验与理论模型的干涉信号对比度

Table 2 Contrast of interference signal between simulation experiment and theoretical model under different parameters

Serial number	Polarization state of incident light		Optical path difference OPD /nm	Extinction ratio		Interference signal contrast	
	ψ /rad	$\tan \epsilon$		τ_{S_0}	τ_{PBS}	V_e	V
1	0.7854	0	0	1000	1000	1	1
2	0.7854	1	0	1000	1000	0	0
3	0.7156	0.40	20	99	399	0.4387	0.4303
4	2.356	0.63	30	99	399	0.5735	0.5830
5	0.6997	0.10	15.38	1000	1000	0.9071	0.9045
6	0.8330	0.09	5.12	1000	1000	0.9874	0.9875
7	0.7759	0.09	5.12	1000	1000	0.9923	0.9924

在实际加工中,偏振分光面消光比可达到 1000 以上,因此,仅需综合分析自参考干涉仪棱镜光程差和入射光偏振态对干涉信号对比度的影响。在自参考干涉仪棱镜光程差分别为 $0, \pm 0.015\lambda$ 和 $\pm 0.03\lambda$ 时,干涉信号对比度达到 0.98 以上的入射光偏振态取值范围如图 9 所示。其中,同一椭圆表示相同的光程差,椭圆内各个点对应的 $\tan \epsilon$ 和 ψ 均能满足 $V \geq 0.98$;且在椭圆中心点处 V 取最大值 1,不同光程差对应的椭圆中心均位于 $\psi = \pi/4$ 的直线上。可以发现,当自参考干涉仪棱镜光程差在 $(-0.03\lambda, 0.03\lambda)$ 范围内时,为保证干涉信号对比度优于 0.98,入射光椭圆偏角的取值范围为 $(0.693 \text{ rad},$

$0.878 \text{ rad})$,但椭圆度的取值范围跟自参考干涉仪棱镜的相位差 δ 有关,为 $0.531\delta \pm 0.087$ 。

4 结 论

采用琼斯矩阵和矢量形式的反射定律,对自参考干涉仪棱镜中的传输光束进行偏振追迹,推导了局部坐标系下相邻反射面间的旋转矩阵,构建了相位光栅位置测量系统的琼斯矩阵模型,并通过物理光场数值分析软件 VirtualLab 验证了理论模型的正确性。基于该模型分析了偏振分光面消光比、入射光偏振态及自参考干涉仪棱镜光程差对自参考干涉信号对比度的影响。结果表明,当 PBS 消光比大于等于 1000,入射光为线偏振光且偏振方向沿 XY 平面第一、三象限的角平分线方向,自参考干涉仪棱镜光程差为 0 时,干涉信号对比度达到最大值 1。为保证干涉信号对比度优于 0.98,要求 PBS 消光比 τ_{PBS} 大于 122,入射光椭圆偏角 ψ 和椭圆度 $\tan \epsilon$ 的取值范围分别为 $(0.693 \text{ rad}, 0.878 \text{ rad})$,自参考干涉仪棱镜的光程差需控制在 $(-0.03\lambda, 0.03\lambda)$ 范围内。以实际加工水平为依据,综合分析了自参考干涉仪棱镜光程差及入射光偏振态对干涉信号对比度的影响,为保证干涉信号对比度在 0.98 以上,入射光椭圆度需在 $0.531\delta \pm 0.087$ 范围内。该研究为相位光栅位置测量系统中光束偏振特性的调控补偿提供了理论依据,对提高自参考干涉信号的对比度具有重要意义。

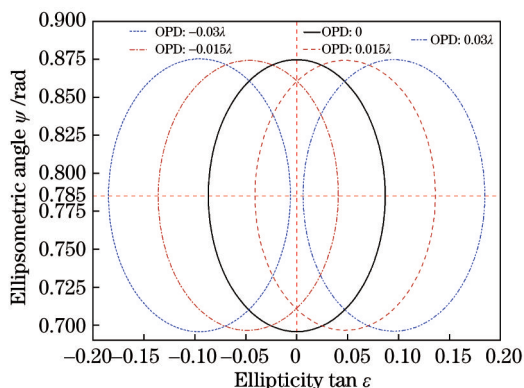


图 9 不同光程差下干涉信号对比度大于 0.98 的入射光偏振态取值范围

Fig. 9 Polarization value range of incident light with interference signal contrast greater than 0.98 under different optical path differences

参 考 文 献

- [1] Si X C, Tong J M, Tang Y, et al. Lithography alignment technology based on two-dimensional Ronchi grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0910001.
司新春, 佟军民, 唐燕, 等. 基于二维 Ronchi 光栅的纳米光刻对准技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0910001.
- [2] Liang Z X, Li M W, Zhang R, et al. Diffraction grating displacement sensor based on Twyman-Green interference[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0410002.
梁洲鑫, 李孟委, 张瑞, 等. 泰曼-格林干涉型衍射光栅位移传感器[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0410002.
- [3] Wang C, Zhou Y, Lu Q, et al. Research on reflective polarization phase-shifting dynamic point diffraction interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1004003.
王晨, 周游, 鲁棋, 等. 反射式偏振相移动态点衍射干涉技术的研究[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1004003.
- [4] Miyasaka M, Saito H, Tamura T, et al. The application of SMASH alignment system for 65-55-nm logic devices[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6518: 65180H.
- [5] Hinnen P, Depre J, Tanaka S, et al. Integration of a new alignment sensor for advanced technology nodes [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 652023.
- [6] Megens H, van Haren R, Musa S M, et al. Advances in process overlay: alignment solutions for future technology nodes[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6518: 65181Z.
- [7] Gou X C, Tian A L, Zhu X L, et al. Influence of polarization state on interference fringe contrast[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 241202.
勾鑫聪, 田爱玲, 朱学亮, 等. 偏振态对干涉条纹对比度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 241202.
- [8] Keij S, Setija I, van der Zouw G, et al. Advances in phase-grating-based wafer alignment systems[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5752: 948-960.
- [9] den Boef A J. Optical wafer metrology sensors for process-robust CD and overlay control in semiconductor device manufacturing[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2016, 4(2): 023001.
- [10] Menchtchikov B, Socha R, Raghunathan S, et al. Computational scanner wafer mark alignment[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10147: 101471C.
- [11] Du J Y, Dai F Z, Wang X Z. Calibration method for alignment error caused by asymmetric deformation of mark and its application in overlay measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704004.
杜聚有, 戴凤钊, 王向朝. 标记非对称变形导致的对准误差修正方法及其在套刻测量中的应用[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704004.
- [12] Bhattacharyya K, Noot M, Chang H, et al. Multi-wavelength approach towards on-product overlay accuracy and robustness[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10585: 105851F.