

偏振态对干涉条纹对比度的影响

勾鑫聪¹, 田爱玲^{1*}, 朱学亮¹, 王大森², 刘卫国¹

¹西安工业大学光电工程学院陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021;

²中国兵器科学院宁波分院, 浙江 宁波 310022

摘要 基于迈克耳孙干涉仪原理研究不同偏振态光的两偏振分量大小对干涉条纹对比度的影响。同时,为快速计算条纹图像的对比度,提出一种基于 Matlab 的干涉条纹对比度计算方法。最后通过分析实验数据获取不同偏振态光的两偏振分量和干涉条纹对比度间的关系。该研究成果可运用于干涉仪器或干涉实验中,通过在光源处引入偏振调制来获得对比度高的干涉条纹图像,以提高测量精度。

关键词 测量; 干涉; 偏振态; 条纹对比度

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP56.241202

Influence of Polarization State on Interference Fringe Contrast

Gou Xincong¹, Tian Ailing^{1*}, Zhu Xueliang¹, Wang Dasen², Liu Weiguo¹

¹ Shaanxi Provincial Key Laboratory of Membrane Technology and Optical Test, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

² Ningbo Branch, Ordnance Science Institute of China, Ningbo, Zhejiang, 310022, China

Abstract The effects of two polarization components of different polarization states on the interference fringe contrast are investigated based on the principle of Michelson interferometer. Simultaneously, a Matlab-based interference fringe contrast calculation method is used to quickly evaluate the fringe image contrast. Finally, the relationship between the polarization components of different polarization states and the interference fringe contrast can be obtained by analyzing the experimental data. The results demonstrate that this research can be applied to either interference instruments or interference experiments. Introducing polarization modulation at the light source to obtain high-contrast interference fringe images will improve the measurement accuracy.

Key words measurement; interference; polarization state; fringe contrast

OCIS codes 120.3180; 120.5410; 120.4530

1 引言

由光学检测可知,光波的频率、振幅、相位能够传递信息,其偏振态也可以传递信息。相位所传递的信息包含在干涉条纹的条纹间距和几何形状中;光强度和偏振态所传递的信息则包含在干涉条纹的对比度之中^[1-2]。在干涉测量技术中,干涉条纹对比度对测量精度的影响至关重要,它不仅和光源的单色性、发生干涉的两光束的振幅比、光源尺寸有关,还和相干光的偏振特性有关^[3-5]。

早在 20 世纪 80 年代就有学者就偏振态对条纹对比度的影响进行探讨。1988 年, Kersey 等^[6]将任意偏振态的偏振光输入到干涉仪,并发现通过控制输入偏振态总是可以获得最佳条纹可见性。1993 年,长春理工大学的孙柏忠^[7]设计了不同偏振态光干涉的物理模型,并推导出偏振光与偏振光干涉、部分偏振光与部分偏振光干涉、偏振光与部分偏振光干涉的强度公式及干涉条纹对比度公式。2004 年,山东大学的蔡履中^[8]分析了线线、圆圆及线圆偏振态组合所产生的干涉图样的对比度,研究结果表

收稿日期: 2019-06-04; 修回日期: 2019-06-12; 录用日期: 2019-06-14

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2016208A002)、激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1703)

* E-mail: ailintian@xatu.edu.cn

明,圆圆及线圆的干涉组合相比于单纯使用线偏振光可获得更大的条纹对比度。2006年,武汉军械士官学院李东等^[9]利用示波器观测输入光偏振态对干涉仪输出光强波形的影响,验证输入光偏振态对条纹可见度存在影响。

这些研究表明偏振态对干涉条纹对比度有影响,但目前还没有人对其进行过系统性的研究。这些研究只探究了两个不同偏振态的光相互干涉的情况,而没有探究不同偏振态光的两个偏振分量对条纹对比度的影响,或只指出偏振态对条纹对比度存在影响而并未探究具体是如何影响的,因此,有必要就不同偏振态光对干涉条纹对比度影响进行系统性研究。本文基于迈克耳孙干涉仪原理,设计不同偏振态两偏振分量相互干涉的实验。同时,为快速计算条纹对比度,基于 Matlab 设计了一种计算干涉条纹对比度的方法,最后通过分析实验数据获取不同偏振态光的两个偏振分量和干涉条纹对比度间的关系。

2 基本原理

干涉条纹对比度即干涉条纹光强的最大值 I_{\max}

和最小值 I_{\min} 之差与最大值和最小值之和的比值^[10-11],即

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2A_1A_2}{A_1^2 + A_2^2}, \quad (1)$$

式中, K 表示干涉条纹对比度, A_1 、 A_2 表示两光波的振幅大小。

对于偏振光的干涉,线偏振光和椭圆偏振光都可用两个振动方向相互垂直、相位差满足一定关系的电矢量来表示,线偏振光在两个垂直方向上的电矢量相位差为 $\pi/2$ 的偶数倍,椭圆偏振光在两个垂直方向上的电矢量相位差为 $\pi/2$ 的奇数倍。

线偏振光可由一束自然光经检偏器,再经一个 $1/2$ 波片来获得,转动波片快轴可使线偏振光的振幅大小不变,振动方向发生改变。现假设光线传播方向为 z 轴正方向,平行于波片、偏振片并竖直向上的方向为 x 轴正方向,并使起偏器的起偏角度为 x 轴正方向,这样就会产生振动方向为 x 轴正方向的线偏振光。假设在起偏器后摆放的 $1/2$ 波片的快轴方向与 x 轴的夹角为 $\alpha/2$,则线偏振光经过起偏器后振动方向与 x 轴夹角变为 α ,一束自然光经起偏器和 $1/2$ 波片后的示意图如图 1 所示。

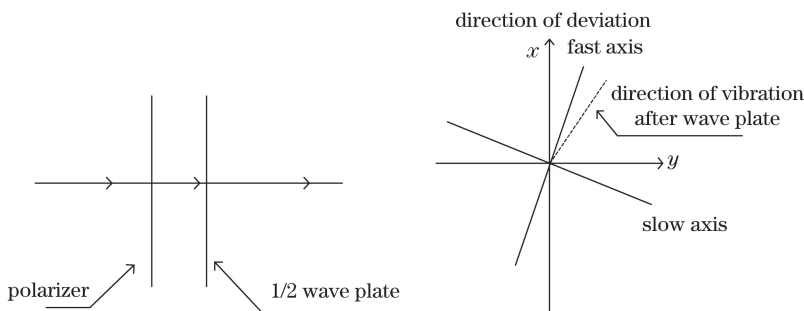


图 1 入射光经起偏器和 $1/2$ 波片后振动方向改变

Fig. 1 Vibration direction changes of incident light after passing through polarizer and $1/2$ wave plate

再在 $1/2$ 波片后放置一个 $1/4$ 波片,则线偏振光会变为椭圆偏振光。现假设 $1/4$ 波片的慢轴方向沿 x 轴,则线偏振光经过该 $1/4$ 波片后,在 x 和 y

方向的振幅大小无改变,相位差发生了变化,慢轴方向的电矢量相位增加了 $\pi/2$ 。线偏振光在经过 $1/4$ 波片后的示意图如图 2 所示。

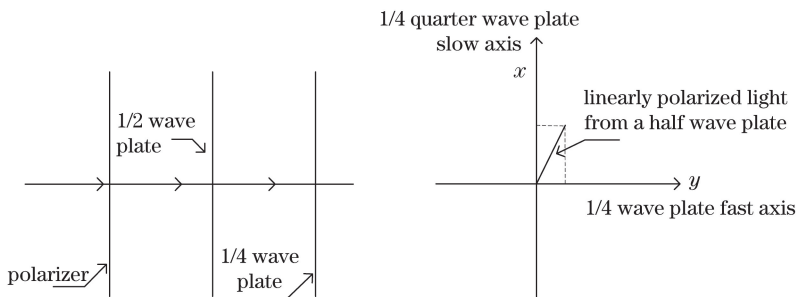


图 2 线偏振光经 $1/4$ 波片后变为椭圆偏振光

Fig. 2 Linearly polarized light becomes elliptically polarized light after passing through $1/4$ wave plate

在偏振光后面放置一个检偏器,则偏振光的两个相互垂直的电矢量就能发生干涉。假设检偏器的检偏方向与 y 轴夹角为 β ,则不管是线偏振光干涉还是椭圆偏振光干涉,其条纹对比度 K 可表示为

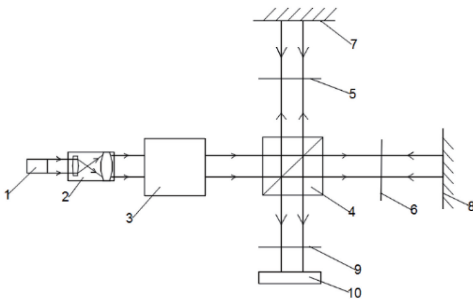
$$K = \frac{2\cos\alpha\sin\beta \cdot \sin\alpha\cos\beta}{(\cos\alpha\sin\beta)^2 + (\sin\alpha\cos\beta)^2} \quad (2)$$

3 实验与分析

基于迈克耳孙干涉仪的原理提出实验方案,用以研究各种偏振态的偏振光干涉。在激光器前放置起偏器和波片来改变激光的偏振态,分别产生线偏振光及椭圆偏振光,并由采集到的干涉条纹图案,求出干涉条纹对比度。

3.1 实验装置

迈克耳孙干涉仪是一种典型的双光路干涉仪,这种干涉仪结构较简单,采用的光源是单色激光光源^[12]。将干涉仪中的普通分束器换成偏振分束器,则可将一束光分别反射和透射为 S 光和 P 光。利用偏振分束器可将偏振光中的两个相互垂直的电矢量分成两个光路,但是经全反镜反射后就不能再次通过偏振分束器。针对该问题,可让第一次通过偏振分束器的光经过两次 1/4 波片,这样就能再次通过偏振分束器,再让两束光通过一个检偏器便可在光屏上形成偏振干涉条纹。整个装置原理图如图 3 所示。



1: light source; 2: collimation system;
3: polarizer and wave plate to be placed;
4: polarization beam splitter;
5, 6: 1/4 wave plate; 7, 8: mirror;
9: polarizer; 10: receiving system

图 3 实验装置原理图

Fig. 3 Schematic of experimental device

由激光光源 1 发出的光束经扩束准直系统 2 后,再经过摆放在 3 处的起偏器和波片变为偏振光。该偏振光正入射偏振分束器 4 后分别被反射和透射为振动方向相互垂直的 S 光与 P 光。其中被反射的 S 光经过 1/4 波片 5 和全反镜 7 后发生反射,再经过 1/4 波片 5 后变为 P 光,然后经偏振分束器 4

透射;同样,第一次从偏振分束器 4 中透射的 P 光经过 1/4 波片 6,再由全反镜 8 发生反射,反射后的光波再次通过 1/4 波片 6 后变为 S 光,然后由偏振分束器 4 反射。此时被反射的 S 光和被透射的 P 光经过检偏器 9 后,两光束具有相同的振动方向且频率一致、相位差恒定,因此可在接收面上产生干涉条纹。

假设平行于波片或偏振片并垂直于纸面向上的方向为每个波片或偏振片的 x 正方向,光线传播方向为 z 正方向。因此 1/4 波片 5 的放置是以慢轴与 x 轴夹角为 45° 放置,波片 6 以快轴与 x 轴夹角为 45° (以第一次入射方向为 z 轴) 放置。

3.2 实验方案

为探究不同偏振态光的两个偏振分量大小对条纹对比度的影响,设计 3 组实验。

第 1 组为探究非偏振光经偏振分束器产生的两偏振光干涉对条纹对比度的影响。实验时,在 3 处不放置起偏器与波片,转动检偏器 9 的检偏方向分别与 x 轴夹角成 5° 、 10° 、 15° 、 \dots 、 85° ,用 CCD 将干涉图采集到计算机中。

第 2 组为探究不同偏振态的线偏振光的两偏振分量对条纹对比度的影响。实验时,首先在 3 处放置一个起偏器,起偏角度为 x 轴正方向,这样便可获得振动方向沿 x 轴正方向的线偏振光,再在起偏器后放置一个 1/2 波片,转动 1/2 波片的快轴分别与 x 轴夹角成 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 \dots 、 85° ,这样以每次 5° 的变化来改变线偏振光的振动方向,但不会改变振幅大小。每改变一次振动方向,相应地转动检偏器 9 的检偏方向分别与 x 轴夹角成 5° 、 10° 、 15° 、 \dots 、 85° ,用 CCD 将干涉图采集到计算机中。

第 3 组为探究不同偏振态的椭圆偏振光的两偏振分量对条纹对比度的影响。实验时,首先在 3 处放置一个起偏器,起偏角度为 x 轴正方向,这样便可获得振动方向沿 x 正方向的线偏振光,再在起偏器后放置一个 1/2 波片,转动 1/2 波片的快轴分别与 x 轴夹角成 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 \dots 、 85° ,这样以每次 5° 的变化来改变线偏振光的振动方向而不会改变振幅大小。然后再在 1/2 波片后放置一个 1/4 波片,使其慢轴沿 x 轴方向,这样便可获得不同椭圆度的椭圆偏振光。每改变一次 1/2 波片快轴方向,相应地转动检偏器 9 的检偏方向分别与 x 轴夹角成 5° 、 10° 、 15° 、 \dots 、 85° ,用 CCD 将干涉图采集到计算机中。

假设光源发出的光经过起偏器后的电矢量的振

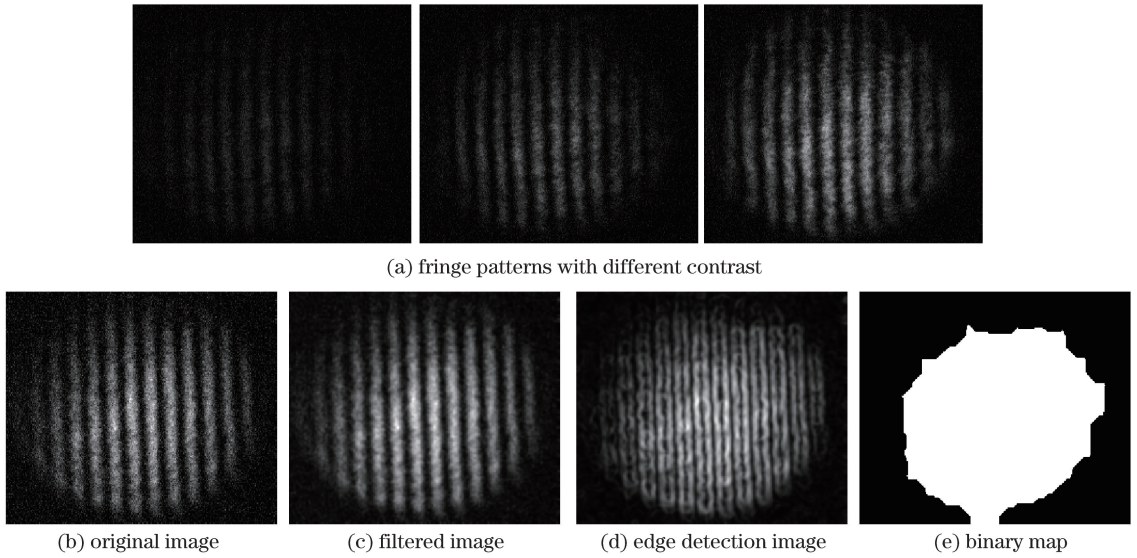
幅大小为 E_0 , $1/2$ 波片快轴与 x 轴夹角为 $\alpha/2$, 则经偏振分束器 4 反射的 S 光的振幅大小为 $E_0 \cdot \cos \alpha$, 经偏振分束器透射的 P 光的振幅大小为 $E_0 \cdot \sin \alpha$, 设检偏方向与 x 轴夹角为 β 时, 则由(2)式可计算出实验条件下干涉条纹对比度的理论值。

3.3 图像处理

当给出一幅干涉图时, 无法直接利用(2)式求出干涉条纹对比度。因此设计了一种可快速计算条纹对比度的方法。该方法分为两个过程, 首先是定位条纹区域, 然后再求出条纹对比度。

定位步骤为: 首先对条纹图进行高斯滤波; 然后进行边缘检测并二值化; 再对二值图像进行形态学处理, 使用闭运算, 先膨胀后腐蚀, 以平滑干涉图的

边界填充干涉图内细小的空洞。从处理后的二值图的第一行像素起, 若某一行像素灰度和为 0, 则该行像素不包含采集到的干涉条纹; 若某一行像素灰度值和大于 0, 则这一行像素包含有采集到的条纹。取灰度值大于 10 为有效行, 找出每一个有效行的第一个灰度值为 1 的点和最后一个灰度值为 1 的点, 这样就能定位出条纹所在区域的像素点坐标。实验所得条纹图中 3 个不同对比度的条纹图如图 4(a) 所示。由于干涉图边缘区域的光强较低、信噪比较低, 该区域对比度较低, 因此在对干涉图有效区域识别时需去掉边缘部分。其中条纹图的原图像、滤波后的图像、边缘检测图像及闭运算后的二值图分别如图 4(b)~(e) 所示。



(a) fringe patterns with different contrast

(b) original image

(c) filtered image

(d) edge detection image

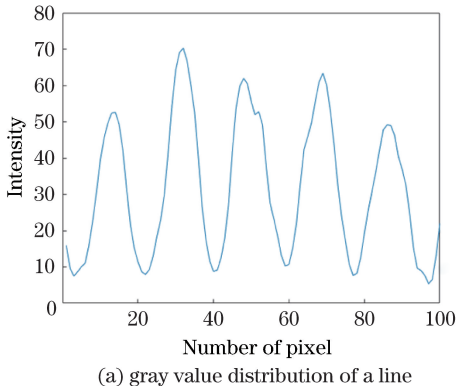
(e) binary map

图 4 定位条纹区域过程

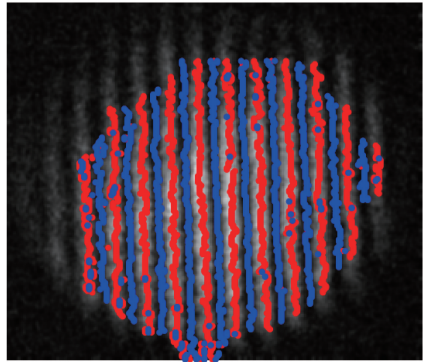
Fig. 4 Process of locating fringe regions

找到条纹区域后, 获取所有行像素灰度曲线图的波峰值和波谷值, 图像某一行的灰度曲线图如图 5(a) 所示, 取波峰均值和波谷均值分别代表干涉

条纹的最大和最小光强。但在实际灰度曲线图中会出现多个波峰波谷, 但这些波峰波谷不一定都表示条纹的最大或最小强度。针对该情况, 可采用如下



(a) gray value distribution of a line



(b) distribution of maximum peak and minimum valley

图 5 求条纹对比度过程

Fig. 5 Process of finding fringe contrast

方法:由干涉图每行像素点的灰度曲线图可知,条纹间距在 20 个像素左右,取每 20 个像素里的最大波峰值和最小波谷值,分布如图 5(b)所示,其中红色代表最大波峰所在区域,蓝色代表最小波谷所在区域。将取得的波峰均值表示干涉条纹的最大光强 I_{\max} ,波谷均值表示干涉条纹的最小光强 I_{\min} ,通过(1)式求出条纹对比度 K 。

4 数据处理与分析

将非偏振光干涉的条纹对比度绘制成散点图,如图 6 所示。因激光器发出的光混合各种偏振态,也可能包含有自然光的成分,属于比较复杂的部分偏振光,经偏振分束器后的 S 光与 P 光的振幅大小也难以推算。但根据偏振光干涉的理论值与测得值曲线趋势符合的程度可知,非偏振光干涉的对比度在两个振幅分量大小一致时最大。由图 6 可看出,旋转检偏器角度会改变参与干涉的两光束的振幅比;只有当振幅比为 1 时,条纹对比度才最大;振幅比相差越大,条纹对比度越差,这与理论一致。

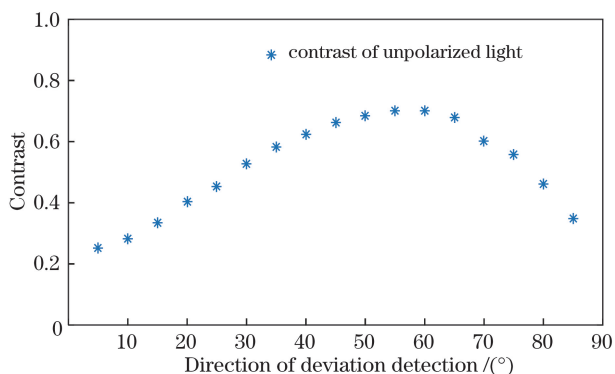


图 6 非偏振光干涉的条纹对比度散点图

Fig. 6 Scatter plot of unpolarized light interference fringe contrast

对于偏振光干涉,理论上只要当线偏振光的振动方向所表示的角度和椭圆偏振光的椭圆度所表示的角度相同,线偏振光干涉和椭圆偏振光干涉就有同样的条纹对比度,为方便描述,就可称为线偏振光和椭圆偏振光有同样的偏振态角度。而在该实验中,偏振光的偏振态角度由放置在激光器后面的 $1/2$ 波片的装调位置决定,将每一个偏振态角度的偏振光干涉的条纹对比度分别绘制在一个图中,部分图如图 7 所示,其中三角形为(1)式计算的理论值,星形为线偏振光在各个检偏角度下的干涉条纹对比度,方形为椭圆偏振光在各个检偏角度下的对比度。由图 7 可看出,偏振光的曲线趋势符合理论值,当参与干涉的两个振幅分量比值为 1 时,条纹对比度

最大。

由图 6 和 7 可知,非偏振光干涉的条纹对比度比偏振光干涉差。非偏振光干涉的对比度最大仅有 0.7023,而偏振光干涉的条纹对比度最大将近 0.8000。

对于线偏振光,由图 7 可知,不同振动方向的线偏振光发生干涉,只有当透过检偏器的振幅分量相同时,条纹对比度最好,这一点和理论相吻合。取不同振动方向的最佳条纹对比度发现,对比度还与线偏振光的振动方向有关。不同振动方向的最佳条纹对比度散点图如图 8 所示。图中横坐标表示 $1/2$ 波片与 x 轴的夹角,即线偏振光的振动方向与 x 轴的夹角,当 $1/2$ 波片与 x 轴的夹角为 $\alpha/2$ 时,线偏振光的振动方向与 x 轴夹角为 α ;纵坐标表示测得的线偏振光在各个偏振态下的最佳条纹对比度。由图 8 可知,线偏振光振动方向从与 x 轴夹角为 0° 到 45° ,条纹对比度递增;振动方向从 45° 到 90° ,对比度递减;振动方向 90° 到 135° ,对比度递增;振动方向 135° 到 180° ,对比度递减。总的来说,一束线偏振光的 S、P 分量越接近,参与干涉的两个振幅分量大小越接近,干涉条纹的对比度越好。实验测得的最佳条纹对比度在振动方向为 140° 时,其值为 0.7762。

对于椭圆偏振光,由图 7 可知,不同椭圆度的椭圆偏振光发生干涉,当透过检偏器的两束光的振幅分量相同时,条纹对比度最好,这一点和理论相吻合。图 9 给出不同椭圆度的椭圆偏振光干涉的最佳条纹对比度散点图。由图 7~9 对比可发现,椭圆偏振光干涉的条纹对比度总体比线偏振光干涉要好,特别是在参与干涉的两个振幅分量相差较大时。线偏振光干涉时,条纹对比度随线偏振光振动方向的变化而改变,且变化较大;而椭圆偏振光的干涉,对比度随椭圆度的变化相对来说不明显,在各个椭圆度下均能获得条纹对比度相对较好的干涉条纹,除去偏振态角度为 90° 的情况,因为此情况下两光矢量振动方向相互垂直,无法发生干涉。实验测得的最佳条纹对比度在椭圆度为 70° 时,为 0.7967。(椭圆度 0° 到 90° 属于左旋椭圆偏振光,椭圆度 90° 到 180° 属于右旋椭圆偏振光)。

综上,不管何种偏振态,当参与干涉的两光矢量的振幅大小相同时,在这一偏振态下所得的对比度最好。在参与干涉的两光矢量的振幅分量相同的情况下,偏振光干涉的条纹对比度优于非偏振光干涉;线偏振光干涉与椭圆偏振光干涉比较,在偏振光的 S、P 分量相差不大时,线偏振光的条纹对比度和椭

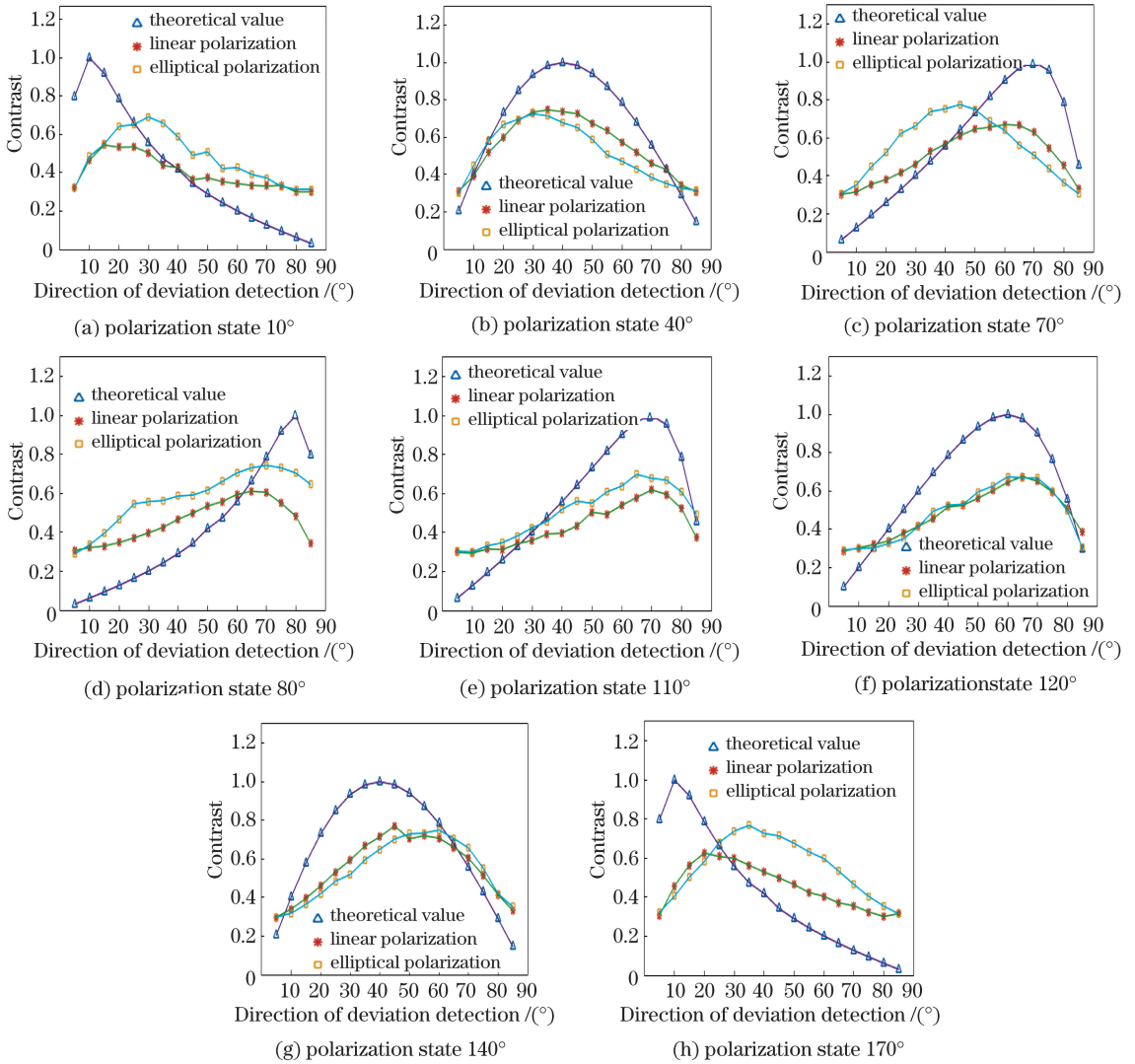


图 7 不同偏振态下干涉条纹对比度的测得值和理论值的曲线图

Fig. 7 Curves of measured and theoretical values of interference fringe contrast at different polarization states

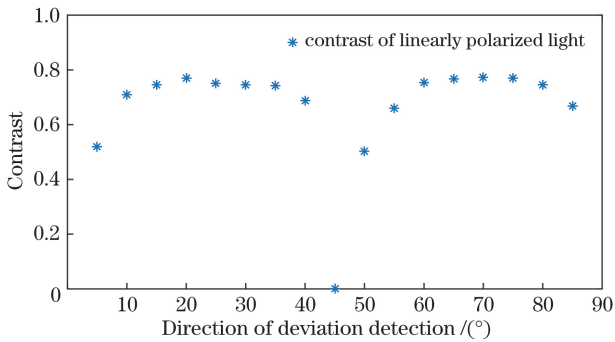


图 8 不同振动方向的最佳条纹对比度散点图
Fig. 8 Scatter plot of best fringe contrast in different vibration directions

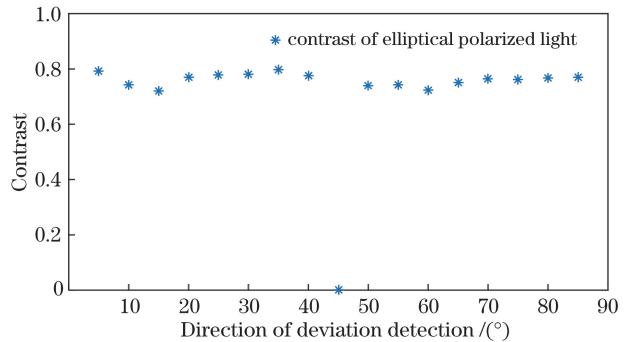


图 9 不同椭圆度的最佳条纹对比度散点图
Fig. 9 Scatter plot of best fringe contrast under different ellipticity

圆偏振光的条纹对比度都较好,且椭圆偏振光干涉条纹对比度稍优于线偏振光;在偏振光的 S、P 分量

相差较大时,椭圆偏振光的条纹对比度明显优于线偏振光。

5 结 论

基于迈克耳孙干涉仪的原理搭建不同偏振态光的两偏振分量相干涉的实验装置。为快速计算条纹图像的对比度,设计一种基于 matlab 的干涉条纹对比度计算方法。通过分析实验数据获取不同偏振态光的两偏振分量和干涉条纹对比度间的关系,发现偏振光干涉的条纹对比度优于非偏振光干涉;椭圆偏振光干涉的对比度优于线偏振光干涉,在偏振光的 S、P 分量相差不大时,线偏振光的条纹对比度和椭圆偏振光都较好,且椭圆偏振光干涉的条纹对比度稍优于线偏振光;在偏振光的 S、P 分量相差较大时,椭圆偏振光的条纹对比度明显优于线偏振光。该研究成果可运用于干涉仪器或干涉实验中,通过在光源处引入偏振调制来获得对比度高的干涉条纹图像,以此提高测量精度。

参 考 文 献

- [1] Zhu Z Q, Li Y, Feng S T, *et al.* Theoretical and experimental study on digital phase-shifting holography based on circular polarized light interference[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0409004.
朱竹青, 李杨, 冯少彤, 等. 基于圆偏振光干涉的相移数字全息术理论与实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0409004.
- [2] Yu R L, Liu Y, Wang A. Contrast of interference stripes in optical fiber Michelson interferometer[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(3): 231-235.
余瑞兰, 刘勇, 王安. 光纤 Michelson 干涉仪干涉条纹对比度的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3): 231-235.
- [3] Yu Y H, Li S H. Contrast of light interference streaks[J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry(Natural Science Edition), 1995, 9(4): 62-64.
于衍宏, 李淑华. 光的干涉条纹的对比度[J]. 山东轻工业学院学报(自然科学版), 1995, 9(4): 62-64.
- [4] Wang J. The measurement of crystal characteristic parameter and profile using low coherence light interference [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010: 20-21.
王军. 短相干光干涉在晶体特性参数和微观表面形貌测量中的应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010: 20-21.
- [5] Chen W L, Li J W, Sun Z Q, *et al.* Analysis of visible polarization characteristics of typical satellite surface materials[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1026001.
陈伟力, 李军伟, 孙仲秋, 等. 典型卫星表面材料可见光偏振特性分析[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1026001.
- [6] Kersey A D, Dandridge A, Tveten A B. Dependence of visibility on input polarisation in interferometric fiber-optic sensors[J]. Optics Letters, 1988, 13(4): 288-290.
- [7] Sun B Z. Theoretical analyses of the partially polarization light interference in interferometer [J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1993, 16(2): 12-17.
孙柏忠. 干涉仪中部分偏振光干涉的理论分析[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1993, 16(2): 12-17.
- [8] Cai L Z. Contrast of interference pattern with circular light involved[J]. College Physics, 2004, 23(1): 16-18.
蔡履中. 两圆偏振光以及线偏振光和圆偏振光干涉图样的衬比度[J]. 大学物理, 2004, 23(1): 16-18.
- [9] Li D, Huang W D, Zeng W F, *et al.* The influence of input polarization on fringe visibility of fiber interferometer[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(8): 703-706.
李东, 黄卫东, 曾文锋, 等. 输入光偏振态对光纤干涉仪条纹可见度的影响[J]. 激光与红外, 2006, 36(8): 703-706.
- [10] Han J, Liu J. Optical engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
韩军, 刘钧. 工程光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [11] Huang J H, Lei Y H, Du Y, *et al.* Quantitative calculation of fringe visibility in bismuth grating-based X-ray phase-contrast imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0434001.
黄建衡, 雷耀虎, 杜杨, 等. 铋光栅 X 射线相衬成像条纹对比度的定量计算[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0434001.
- [12] He W, Cui M H, Song D D, *et al.* Collinear autocorrelation measurement of ultrashort laser pulse based on Michelson interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1204001.
何伟, 崔明焕, 宋迪迪, 等. 基于迈克尔孙干涉仪的共线自相关超短光脉冲测量[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1204001.