

基于皮米梳的皮米测量技术

周常河*, 金戈

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 511443

摘要 介绍一种基于皮米梳的皮米测量技术。在实验中,通过采用两次曝光全息技术制出皮米梳,其两次曝光的干涉场周期具有 200 pm 的差值。当激光照射到皮米梳上,将产生随着传播方向不变的干涉条纹。该干涉条纹的周期与皮米梳的周期差值成反比,由此建立了一种新型皮米尺度位移或变化的测量原理和方法。以皮米梳及其应用为基础,将会发展出一系列新的皮米光学元件、技术及装置。

关键词 测量; 皮米光学; 皮米测量; 皮米光学元件; 皮米梳

中图分类号 O438 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1712003

Picometer Measurement Technology Based on Picometer Comb

Zhou Changhe*, Jin Ge

Institute of Photonics Institute, Jinan University, Guangzhou 511443, Guangdong, China

Abstract This paper introduces a picometer measurement technology based on picometer comb. In the experiment, picometer comb is made by using twice exposed holography with a difference of 200 pm between the periods of two interference fields. When picometer comb is illuminated with a laser beam, it will produce interference fringes along the propagation. Since the period of the interference fringe is in reverse relation with the picometer difference of picometer comb, it implies a new principle of measuring the picometer displacement or variation. Based on the picometer measurement technique proposed in this paper, a new series of picometer-level optical elements, technique, and apparatus will be established in the near future.

Key words measurement; picooptics; picometer measurement; picometer optical element; picometer comb

1 引言

皮米尺度的测量是测量技术的前沿。目前,先进的半导体光刻技术已经达到几纳米的节点,需要使用更高精度的测量技术——皮米级别的光学测量技术对其进行测量,而先进的精密光学测量技术是皮米测量的关键。

精密光学测量技术一直是当今科学技术的学科前沿和驱动力。例如,获得 2017 年诺贝尔物理学奖的激光引力波技术,该技术利用激光干涉技术实现引力波的测量,但仅能获得单点的测量结果,不能在运动方向上实现高精度测量。传统的法布里-珀罗(F-P)干涉镜能够测量到单点的光场变化,但同样无法实现在运动方向上的高精度测量。另外,获得 2018 年诺贝尔物理学奖的啁啾脉冲放大技术的核心就是通过光栅实现激光脉冲的展宽与压缩。在大功率激光脉冲装置中需要

使用大尺寸、高精度的光栅,而这种光栅的制作同样需要皮米测量技术。

利用透镜可以实现显微测量,透镜的分辨率可由阿贝公式计算得到,分辨率与所用的照明光波长成正比,与透镜的数值孔径成反比。其中,可实现超过衍射极限的成像技术——超分辨技术,一直是科学家迫切追求的目标。目前有两类超分辨技术最为突出:一类是由 Stephen Hall 提出的激发发射损耗(STED)显微成像技术,该技术和结构光照明超分辨技术获得了 2014 年诺贝尔化学奖;另一类技术是表面等离子体(Surface Plasmon)技术,它通过激发表面的等离基元实现超分辨。但是,这两类技术目前都局限在纳米量级。

综上所述,发展皮米光学有以下 3 个驱动力:

1) 在大规模集成电路中,目前国际领先的实验室已经达到 1 nm 的工艺节点,所需要的测量分辨率达到

收稿日期: 2022-05-25; 修回日期: 2022-06-20; 录用日期: 2022-07-11

基金项目: 国家自然科学基金珠江人才计划项目(2019ZT08Z779)、广州市科技计划项目(202007010001)

通信作者: *zhouchanghe@jnu.edu.cn

皮米级别。在可以预见的未来,需要发展出相应的光学技术来处理皮米尺度的信息。

2) 在大尺寸光栅制造中,光栅是脉冲啁啾放大技术的核心器件,尤其是大尺寸高精度的光栅。大尺寸高精度光栅的制造需要利用皮米精度的光栅制造技术,因此皮米光学是光栅制造的重要发展方向之一。

3) 微纳光学的下一步发展方向,包括超分辨光学技术,也将随着技术的突破进入皮米尺度的世界。

光学的前沿研究从目前的微纳光学领域即将进入皮米光学领域,而皮米测量是皮米光学研究的关键。通常情况下,激光干涉仪是长行程、高精度移动测量的首选。通过不断提高激光干涉仪的分辨率,可以使测量精度达到皮米量级,例如多次反射 F-P 腔技术能够实现皮米的分辨率^[1]。但是,各种环境干扰和噪声如空气温度、湿度、气压等的变化都会影响激光波长和干涉信号的稳定性,因此,科研人员提出一种参考光和测量光共光路的结构,以提高激光干涉仪在皮米测量时的重复性和可靠性^[2-6]。

为了克服使用激光干涉仪进行皮米测量时的困难,本文提出一种基于皮米梳的皮米测量技术。在该技术中,使用扫描参考光栅法以皮米精度测量曝光干涉场的周期^[7-8],通过两次曝光技术做出皮米梳^[9-10]。皮米梳在激光照射下会产生随衍射传播方向不变的干涉条纹,通过该干涉条纹的周期可以反推出皮米梳两次曝光时的皮米级周期变化量。未来可以根据所提出的皮米光学测量技术开展皮米光学的相关研究,发现新的皮米光学效应,最终转化为皮米光学的应用^[11-12]。

2 皮米定义

如图 1 所示,皮米的定义是 $\frac{1}{1000}$ nm。现在有多种位移测量方法,其中激光干涉仪是被广泛使用的大量程、高精度的测量技术。对于目前商用的高精度激光干涉仪,在应用环境良好的情况下,可以达到 1 nm 的测量精度;对于能够达到皮米分辨率的激光干涉仪,其使用环境都极其苛刻,难以在实际环境中应用。

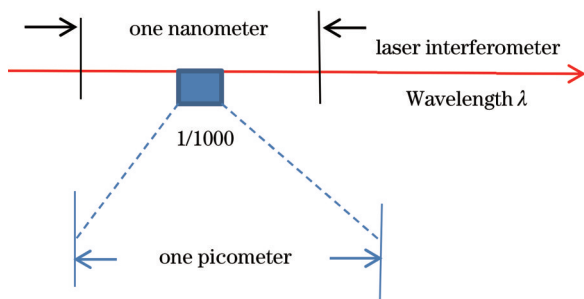


图 1 通过激光干涉仪可实现皮米精度的测量

Fig. 1 Picometer accuracy measurement using a laser interferometer

3 弱混沌原理

激光干涉仪在高精度的大范围测量中被广泛采

用,但是当使用激光干涉仪对于一个点进行测量,将产生弱混沌现象,其测量原理如图 2 所示。因此,站在皮米测量的角度,激光干涉仪给出测量精度有以下两个明显的物理特征:第一,对于相同测量点的位置测量,其每次测量的结果不同,即测量结果随测量时间的变化曲线是波动的;第二,虽然每次测量的数值结果是波动的,但测量结果的浮动局限在一个有限的范围内。将这种类型的测量特性定义为弱混沌效应^[11]。

采用激光干涉测量有两个明显的数学特征:

1) 通过激光干涉仪测量并锁定位置 $X(t_1)$, 其波动幅度在有限的范围内。

$$|X(t_1)| \leq M, \quad (1)$$

式中: M 为位置测量的摆动幅度。

2) 弱混沌的重要特点是,测量位置随时间的分布不重合,即

$$X(t) \neq X(t_1). \quad (2)$$

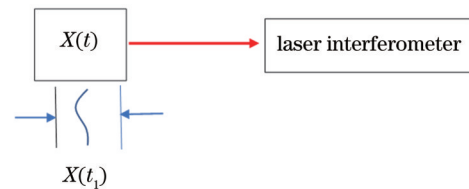


图 2 激光干涉仪的弱混沌测量原理

Fig. 2 Principle of weak chaos measurement using a laser interferometer

如果想实现高精度的移动控制,仅有一个维度是不够的,这就需要二维或者三维的位置测量与控制技术。二维平面锁定激光干涉仪控制技术如图 3 所示。平台的移动控制由二维正交多轴激光干涉仪测量并锁定,以此实现大范围移动的高精度测量。多轴锁定激光干涉仪是实现二维移动高精度测量的物理保证。另外,如果布置多轴正交激光干涉仪,将可以实现三维位置测量的锁定。在激光直写或测量中,将测量点与二维正交激光干涉仪的相交点重合,可以保证二维激光干涉仪在测量时最大限度地减少移动平台偏摆、震动等的影响,这是非常重要的一个基本测量原理。多轴激光干涉仪的最佳工作状态就是实现三维测量的弱混沌控制。

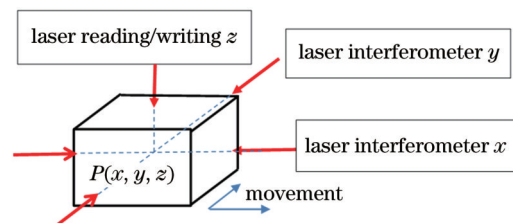


图 3 利用正交激光干涉仪实现高精度测量目标点的三维锁定原理
Fig. 3 Principle of 3D-locking using orthogonal laser interferometers for high precision measurement of targeted point $P(x, y, z)$ which is moved in two dimensions

4 基于光栅的皮米测量技术

在大尺寸光栅的研制过程中,采用激光直写技术制备的光栅测量精度达到了皮米量级。美国麻省理工学院提出一种纳米尺光刻技术(Nanoruler),其中干涉场的周期测量精度达到了皮米量级^[13]。周常河课题组对干涉场周期精度测量也达到了皮米量级^[7],特别是周常河课题组提出的扫描参考光栅技术,在全息干涉场测量中得到了皮米精度的实验结果^[8]。

基于光栅的皮米测量技术的基本原理如图 4 所示。使用激光干涉仪对光栅的周期进行测量,假设测量光栅的周期为 1000 个,激光干涉仪的测量精度为纳米量级,并假设所有的光栅周期都是一致的,则每个光栅周期的测量精度就可以认为达到了皮米量级^[7-8]。

目前激光干涉仪的测量精度已经达到纳米量级,

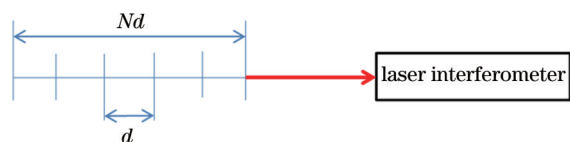


图 4 激光干涉仪测量 N 个周期为 d 的光栅或者激光干涉场
Fig. 4 Grating with N periods of d and laser interference field can be measured with a laser interferometer

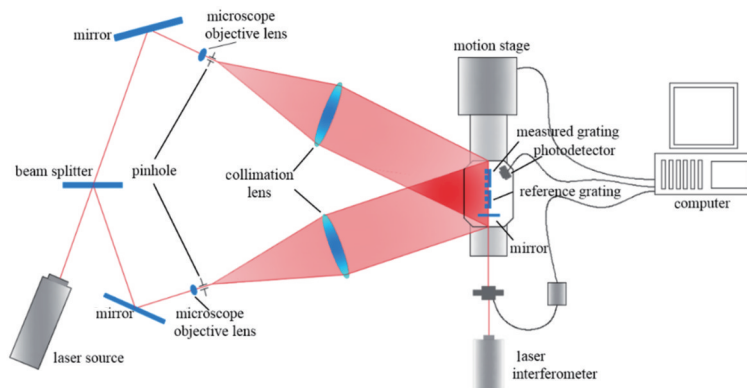


图 5 光栅周期测量系统装置示意图
Fig. 5 Schematic of configuration for grating period measurement system

5 皮米梳

当光栅周期或等效干涉场能够以皮米精度测量,就可以对基板进行两次曝光,并且将两次曝光的周期差值控制在皮米精度,通过这种方式可以制备出一种全新的光学元件——皮米梳^[17]。

皮米梳实际上是一种激光全息场两次曝光产生的全息干涉元件,这两次曝光的干涉场的周期为一个皮米差值。皮米梳的制造原理如图 6 所示,一束激光被分束镜分成两束,两束光经反射镜反射后,经过显微物镜、针孔滤波器和准直透镜,在相交处产生一个全息干涉场,其中准直镜的口径为 300 mm,焦距为 1.5 m。系统的扩束倍率约 500 倍,可将激光束的束腰半径放大到 300 mm 以上,此时光束发散角小于 $1 \mu\text{rad}$,足以

如果利用激光干涉仪测量 1000 个光栅周期,总的测量精度也应当达到纳米量级。因此,只需保证光栅周期的一致性,就可以认为测量精度达到了皮米量级。

对此至少有两条途径可保证做出光栅的周期一致:其一是传统的激光全息系统^[8],干涉场由两束激光干涉产生,可以保证其干涉场中间部分的周期是均匀的;其二是扫描干涉技术^[7,14-15],同样可以保证其干涉场周期的一致性。实际上,如果光栅的周期不一致,这在光栅不同区域的扫描测量可以测量出来,即使用小光斑对光栅上的一个小范围进行测量,光栅周期平均值的测量精度就可达到皮米量级。当扫描光束移动到邻近区域,如果光栅周期平均值的测量结果在皮米尺度上一致,就可以认为光栅周期的均匀性在皮米尺度上保持一致。如果光栅周期在不同的区域有变化,则扫描光束在不同区域测量得到的光栅周期数值一定会发生变化。

图 5 所示为光栅周期测量系统,采用扫描光栅法,将待测光栅和一个等周期光栅安装在移动台上,使用激光干涉仪进行连续测量。采集光栅运动时产生的干涉信号,形成具有上千个周期的干涉图案,由于激光干涉仪可以进行纳米级的定位,因此可计算出皮米精度的单个周期。另外,通过实验数据也可以探测到多个光栅周期平均值在皮米尺度的变化^[16]。

保证干涉场的均匀性。在涂有光刻胶的基底上曝光一次,形成一个周期为 d 的全息干涉图,通过前文所述的皮米测量技术,可以对干涉场周期进行皮米精度的测量。然后通过调整透镜上的调整架,改变两束光的夹角,从而为光场周期引入一个皮米级的变化量 Δd ,光场周期变为 $d + \Delta d$,此时对基板进行二次曝光,这两次曝光的干涉场周期的差值即为一个皮米尺度,通过这样的两次曝光制备出的元件即为一维皮米梳。如果此时将基片旋转 90° ,再次进行同样的两次曝光,将得到一个二维皮米梳。

目前,本课题组已经在实验上做出了两次曝光干涉场周期差值为 200 pm 的一维、二维皮米梳。用激光照射一维、二维皮米梳,可产生一维、二维干涉场,该干涉场可沿着轴向传播,且样式和强度保持不变。利用

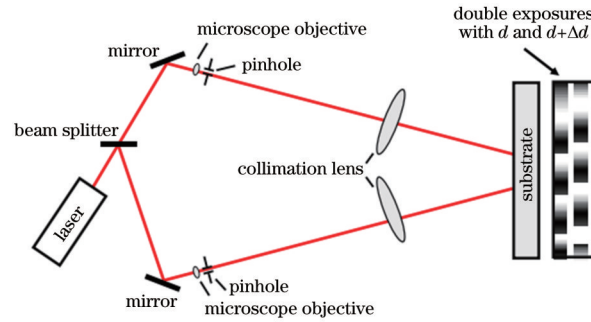


图 6 皮米梳由双光束干涉场经两次曝光产生,两次曝光干涉场周期的差值在皮米尺度范围

Fig. 6 Picometer comb is made by using twice-exposed holography with picometer difference between the periods of the two interference field

这个干涉场照射待测物体,可以实现对物体的三维测量^[9-10]。

6 皮米光学效应

通过激光照射皮米梳会产生沿轴向传播的干涉场,其原理如图 7 所示。皮米梳的衍射也可以理解为两个小缝的远场干涉叠加结果,当这两个小缝的距离足够近,以至于这两个小缝的远场干涉角度小于照明光束的衍射极限角度,将产生一个干涉场。当这个干涉场沿着轴向传播时,条纹的样式和强度沿着传播方向在很长一段距离内不会发生改变^[9]。更重要的是,产生的干涉条纹的周期与皮米梳两次曝光时的周期皮米差值成反比,由此产生了一种全新的皮米测量技术——通过测量产生的干涉条纹周期的大小,精确地测量出皮米梳两次曝光时的周期皮米差值。

首先,搭建图 6 所示的双光束曝光系统,将一块涂有光刻胶的基底放置在干涉场周期为 d 的干涉平面上进行第一次曝光;其次,加载皮米尺度的位移信息 Δd ,引起干涉场的周期变化,接着将该基底进行第二次曝光得到皮米梳;然后,使用准直扩束的平面波照射皮米梳产生沿轴向传播不变的干涉条纹,并通过光电探测器采集该干涉条纹,计算出干涉条纹的周期 T ;最后,通过式(3)反推出待测皮米尺度的信息 Δd ,即可完成对于皮米尺度信息的测量。

图 8 所示为皮米梳产生的干涉条纹的仿真图形和通过光电探测器采集到的实际条纹。将光电探测器采

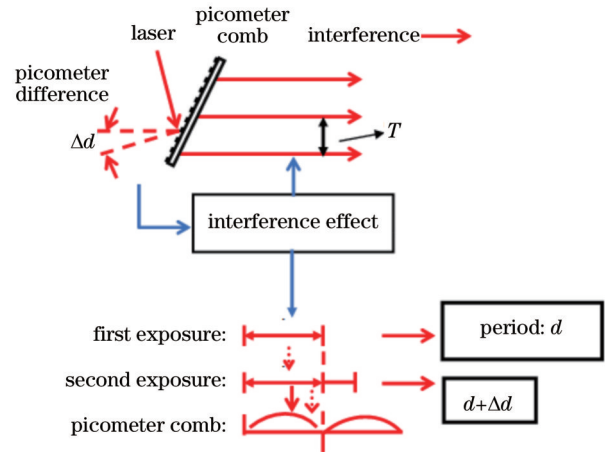


图 7 干涉条纹的周期 T 和皮米梳的干涉场周期差值 Δd 成反比,可以通过干涉条纹周期 T 测量皮米梳的干涉场周期差值 Δd

Fig. 7 Interference fringes can be used to measure the period difference of picometer comb due to the reverse relation between the period T of the interference field and the period difference Δd in picometer level

集到的干涉条纹传输到计算机中,可以快速得到条纹的周期 T ,结合第一次曝光干涉场的周期 d ,就能得到待测信息 Δd 。在实验中,测得干涉条纹的周期 T 为 6.945 mm,第一次曝光时干涉场周期 d 为 833.33 nm,通过式(3)可以得到曝光干涉场周期变化量 Δd 约为 100 pm。

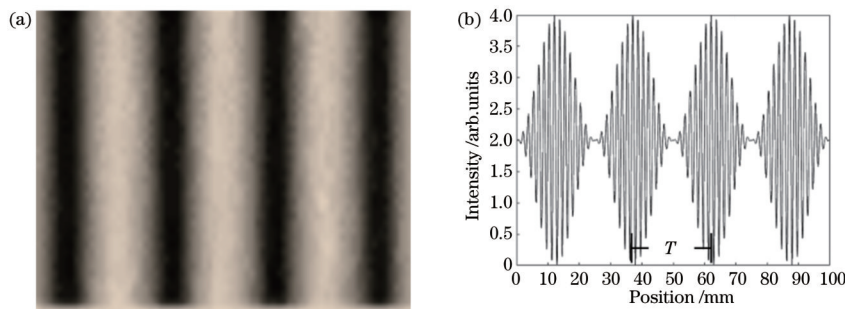


图 8 皮米梳产生的干涉条纹。(a)通过光电探测器采集到的实际图形;(b)仿真图形

Fig. 8 Interference fringes produced by a picometer comb. (a) Actual pattern collected by the photodetector; (b) simulation pattern

皮米梳的周期差值 Δd 和干涉条纹的周期 T 之间的关系为

$$\Delta d = \frac{d^2}{T - d} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,干涉条纹的周期 T 与皮米梳的周期差值 Δd 成反比。利用皮米梳进行测量有一个显著的优点,即皮米梳的周期差值越小,所产生的干涉条纹的周期越大,测量的灵敏度越高。而对于激光干涉仪,当测量位移越小,激光干涉仪的灵敏度越低,测量结果越不准确。因此,这种基于皮米梳的测量技术在皮米测量的应用上具有巨大的潜力。

7 结 论

皮米尺度的精确测量确实是一个难题,这也是皮米光学难以发展的重要原因。直接采用激光干涉仪测量,并使其精度达到皮米量级是一个严峻的挑战,所涉及的光学、机械、电子信号处理、反馈控制等技术的要求极高;测量时的环境因素,包括气压、温度、湿度等的变化,都有可能影响测量精度难以达到皮米量级。实现具有皮米精度的激光干涉仪的核心难点还是光学问题。采用多次反射的 F-P 谐振腔结构,有可能将测量的分辨率提高到皮米量级^[1];或者采用共光路结构的激光干涉仪^[2-6]来避免或降低环境因素的影响,可以得到皮米量级的测量分辨率。目前仅有美国、日本、德国等少数发达国家的顶级实验室报道了达到皮米量级的激光干涉仪的测量结果。

本文介绍了一种全新的皮米光学测量技术途径,过程如下:利用扫描参考光栅法可以对干涉场周期进行皮米精度的测量。因此,在双光束全息系统上,对涂有光刻胶的基板进行两次曝光,这两次曝光的干涉场的周期具有皮米尺度的差值,经显影、烘干后,就能得到皮米梳。使用激光照射皮米梳,产生几乎不随轴向传播距离改变的干涉条纹,对该干涉条纹的周期进行测量,通过公式计算可以得到皮米梳两次曝光时的周期差值。

干涉条纹的周期和皮米梳两次曝光的周期差值成反比,这为测量皮米尺度的变化提供了一个非常灵敏的测量手段。在实验中,制备出一个一维皮米梳,使用准直扩束的平面波照射皮米梳来产生相应的干涉条纹。利用光电探测器采集该干涉条纹并测量出条纹周期 T 为 6.945 mm,结合第一次曝光时干涉场周期 d 为 833.33 nm,将其代入式(3)可以得到曝光干涉场周期变化量 Δd 约为 100 pm。

对于激光干涉仪,测量尺度越小,测量误差就越大;对于皮米梳,两次曝光的干涉场的皮米尺度周期差值越小,干涉条纹的周期就越大,测量系统也就越灵敏。由此可见,本文报道了一种不同于激光干涉仪的皮米测量原理与技术。

在本文开展的皮米光学测量研究之前,已经完成了一系列逻辑关联的重要工作:首先,利用扫描参考光栅法对光栅周期和干涉场进行皮米精度的光学测量;

其次,利用皮米测量技术制出具有皮米精度的光栅和皮米梳^[7-10];最后,基于皮米梳及其产生的干涉条纹,实现了高灵敏度的皮米测量。

利用本文提出的皮米测量技术,可以发展出例如皮米显微镜等一系列测量仪器和相关技术,可以预见,皮米光学极其丰富的研究内容将会在不久的未来得到迅速发展。

参 考 文 献

- [1] Pisani M, Giugni A. A portable picometer reference actuator with 100 μm range, picometer resolution, subnanometer accuracy and submicroradian tip-tilt error for the characterization of measuring instruments at the nanoscale[J]. Metrologia, 2018, 55(4): 541-557.
- [2] Lawall J, Kessler E. Michelson interferometry with 10 pm accuracy[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(7): 2669-2676.
- [3] Joo K N, Clark E, Zhang Y Q, et al. A compact high-precision periodic-error-free heterodyne interferometer[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2020, 37(9): B11-B18.
- [4] Weichert C, Köchert P, Köning R, et al. A heterodyne interferometer with periodic nonlinearities smaller than ± 10 pm[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(9): 094005.
- [5] Guan J, Köchert P, Weichert C, et al. A differential interferometric heterodyne encoder with 30 picometer periodic nonlinearity and sub-nanometer stability[J]. Precision Engineering, 2017, 50: 114-118.
- [6] Hori Y, Gonda S, Bitou Y, et al. Periodic error evaluation system for linear encoders using a homodyne laser interferometer with 10 picometer uncertainty[J]. Precision Engineering, 2018, 51: 388-392.
- [7] Xiang X S, Li M K, Wei C L, et al. Precision fringe period metrology using an LSQ sine fit algorithm[J]. Applied Optics, 2018, 57(17): 4777-4784.
- [8] Xiang X S, Jia W, Xiang C C, et al. Long-range *in situ* picometer measurement of the period of an interference field[J]. Applied Optics, 2019, 58(11): 2929-2935.
- [9] Li C, Zhou C H, Lu Y K, et al. Picometer-differential twice-exposed element for three-dimensional measurement with extremely long depth of field[J]. Applied Optics, 2020, 59(17): 5234-5239.
- [10] Ye J, Zhou C H, Yu J J, et al. Two-dimensional picometer comb for three-dimensional reconstruction[J]. Applied Optics, 2020, 59(33): 10547-10553.
- [11] Zhou C. From holography to picooptics[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11188: 111880N.
- [12] Zhou C H. From picometer comb to picooptics[C]// Frontiers in Optics/Laser Science, September 14-17, 2020, Washington, DC. Washington, D. C.: OSA, 2020: FTh2A.1.
- [13] Chen C G. Beam alignment and image metrology for scanning beam interference lithography: fabricating gratings with nanometer phase accuracy[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005.

- [14] Li M K, Xiang X S, Zhou C H, et al. Scan angle error measurement based on phase-stepping algorithms in scanning beam interference lithography[J]. Applied Optics, 2019, 58(10): 2641-2649.
- [15] 李民康, 向显嵩, 周常河, 等. 基于超精密激光直写系统制作二维光栅[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0905001.
Li M K, Xiang X S, Zhou C H, et al. Two-dimensional grating fabrication based on ultra-precision laser direct writing system[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0905001.
- [16] Xie Y F, Jia W, Zhao D, et al. Traceable and long-range grating pitch measurement with picometer resolution[J]. Optics Communications, 2020, 476: 126316.
- [17] 周常河. 皮米光梳、皮米光梳的制造装置和制造方法: CN110187424B[P]. 2021-06-01.
Zhou C H. Picometer comb, manufacturing device and manufacturing method of Picometer comb: CN110187424B[P]. 2021-06-01.

约稿专家简介:



周常河(1965—), 博士, 教授/博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 美国光学学会会士(OSA Fellow)。1982年考入浙江大学光学仪器工程学系光学仪器专业学习, 1992年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位; 德国洪堡学者, 美国哈佛大学访问学者。曾任中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室副主任, 研究员。现任暨南大学教授, SPIE/Photonics Asia: Holography、Diffractive Optics and Applications 会议主席。长期从事衍射光学、光计算、光栅制造等方面的教学及科研工作, 主要研究方向包括达曼光栅、深刻蚀石英光栅、大尺寸光栅制造、光计算、光学精密测量等。主持国家自然科学基金科学仪器研制项目等, 出版《达曼光栅原理及应用》专著。E-mail: zhouchanghe@jnu.edu.cn。