

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.06

微结构三维形貌无损检测的双波段显微干涉技术

霍霄, 高志山*, 袁群, 郭珍艳, 朱丹

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 功能型微结构具有调控光场或调控电子导通等功能, 一般包含具有规则的几何形状, 基于深度和线宽的比值, 可以将其区分为高/低深宽比微结构。目前对微结构的检测, 多用有损检测中的扫描电镜 (SEM) 剖面成像技术, 而产线上迫切需要用于监测与改进制作工艺的无损检测技术。本文系统总结了作者所在研究团队十余年在微结构三维形貌无损检测方面的低相干显微干涉技术进展, 其中白光显微干涉仪用于超光滑表面、台阶、微光学元件、微机械元件等低深宽比微结构的三维形貌检测, 近红外显微干涉仪用于硅基高深宽比微结构的三维形貌检测。文章阐述了两波段显微干涉系统的关键技术与典型样品的检测实例, 结果表明: 白光显微干涉仪和近红外显微干涉仪是两种高精度的无损检测仪器, 前者检测高深宽比小于等于4, 后者检测高深宽比大于等于20的微结构三维形貌, 数据结果是可信的。显微干涉无损检测技术获取的三维形貌数据, 将有效优化微结构的制造工艺, 进一步提升有关器件的性能。

关键词: 无损测量; 显微干涉法; 低相干; 三维形貌; 微纳器件

中图分类号: TB9; TH741; O436.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)01-0070-11

Dual-band microscopic interferometry for nondestructive testing of three-dimensional morphology of microstructures

HUO Xiao, GAO Zhishan*, YUAN Qun, GUO Zhenyan, ZHU Dan

(Institute of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Functional microstructure has the function of regulating light field or electronic conduction, and generally contains regular geometric shapes. Based on the ratio of depth to line width, it can be divided into high/low-aspect-ratio microstructures. At present, the detection of the geometric characteristic parameters of the microstructure is mainly conducted by SEM, which belongs to the destructive detection. The production line urgently needs non-destructive testing technology to monitor and improve its manufacturing process. This article systematically summarizes the progress made by the author's research team in the low-coherence microscopic-interference technology for nondestructive testing of three-dimensional (3D) morphology of microstructures in the past ten years. The white light microscopic interferometer is used to detect the 3D topography of ultra-smooth surfaces, steps, micro optical elements, micro mechanical elements and other low aspect ratio microstructures. A near-infrared micro interferometer is used to detect the 3D morphology of silicon based high aspect ratio microstructures. In this paper, the key technologies of the two band microscopic interference

收稿日期: 2022-12-24; **修回日期:** 2023-01-10

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2005500); 国家自然科学基金(62175107, U1931120); 江苏省六大大人才高峰项目(RJFW-019); 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室基金(KLOMT190201); 上海在线检测与控制技术重点实验室基金(ZX2021102)

引用格式: 霍霄, 高志山, 袁群, 等. 微结构三维形貌无损检测的双波段显微干涉技术[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 70-80.

Citation: HUO X, GAO Z S, YUAN Q, et al. Dual-band microscopic interferometry for nondestructive testing of three-dimensional morphology of microstructures [J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1): 70-80.



system and the tests of typical samples are described. The results show that white light micro interferometer and near-infrared micro interferometer are two kinds of high-precision nondestructive testing instruments. They can detect the 3D morphology of the microstructures with aspect ratio ≤ 4 , and ≥ 20 , respectively. The 3D topography data obtained by the microscopic-interference nondestructive testing technology will effectively promote the optimization of the manufacturing process of the microstructure and the further improvement of the performance of related devices.

Key words: nondestructive measurement; microscopic interferometry; low coherence; three-dimensional topography; micro-nano device

0 引言

功能微结构器件是一种在深度方向（一维）与横向（二维）同时存在尺度在微米或亚微米量级的纹理组织结构，在空间上一般呈现三维分布。典型的天然微结构（例如荷叶表面的微米乳突和其上覆盖的微纳二元蜡质结构）形成了荷叶表面的疏水特征。三维微结构因特征尺度细微，在微光学（集成光学、光学超材料、微透镜）、微机械（摩擦副、机械密封、MEMS器件）、微电子（芯片、闪存）、生物医药（人工生物材料、关节）等领域具有广泛的应用，可显著地提高系统与器件的光学与物理性能^[1-2]。

目前，微结构特征几何参数的检测技术可以分为非光学检测和光学检测。非光学检测一般为扫描电子显微术（Scanning Electron Microscope, SEM）和探针式轮廓仪技术等。其中，SEM技术能够精确检测出结构的关键尺寸，但是需要将样品沿剖面切开，破坏了样品的结构，其检测精度能够达到亚纳米级^[3-4]；机械探针轮廓仪技术能够检测结构的一根线上表面轮廓，但是需要探针接触到检测对象表面，容易损伤结构表面，且当微结构的特征尺寸线宽小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时，对机械探针的头部尺寸是一个极大挑战^[5]。光学检测一般有明场/

暗场显微成像法、光谱反演与过焦扫描法、共聚焦显微检测法与低相干显微干涉法等^[6]。其中明场/暗场显微成像法主要检测振幅型微结构或微缺陷；光谱反演与过焦扫描法是应高深宽比微结构检测需求发展起来的一种组合技术，可以获取微结构（如沟槽）的深度、线宽与侧壁角；共聚焦显微检测法与低相干显微干涉法，能够检测结构表面的相位信息，获得结构表面的三维形貌，前者是针孔点或点阵扫描检测后合成得到三维形貌，后者是基于显微镜宽场成像和轴向扫描干涉获取图纹合一信息得到三维形貌。

本文总结作者所在研究团队在国家级、省级等多个项目资助下，适应微光学、MEMS传感器微结构等方面的无损检测技术需求，十余年来在低相干白光显微干涉仪和低相干近红外显微干涉仪关键部件与核心技术方面的研究进展。

1 宽光谱低相干显微干涉检测技术原理

1.1 低相干干涉场光强函数

低相干显微干涉检测技术一般采用宽带光源，干涉信号可看作光源光谱范围内所有波长对应单色光发生双光束干涉，所形成干涉信号的非相干叠加结果。宽带面光源在一定数值孔径下的低相干显微干涉信号可表示为^[7-8]

$$I(z) = \int_{k_1}^{k_2} \int_{\theta_0}^{\theta_1} S(k) U(\phi) I_{bg} \gamma \times \cos[2k(z - h_0) \cos \phi + \alpha_{add}] \times \sin \phi \cos \phi d\phi dk \quad (1)$$

式中： k_1, k_2 为光源光谱范围对应的波数区间； $\theta_1 = \arcsin(NA)$ 为物镜最大入射角； θ_0 为最小入射角，在Mirau型结构中对参考板遮挡的入射光角度，在Michelson型与Linnik型结构中， $\theta_0 = 0$ ； z 为检测样品的位置； h_0 为参考板与分光板之间的距离； $U(\phi)$ 为光瞳面强度分布函数； I_{bg} 为背景光强； γ 为干涉信号的对比值； ϕ 为某数值孔径范围下的测试光孔径角； α_{add} 为系统中因反射引起的附加相

位； $S(k)$ 为归一化的光源光谱分布函数。

$S(k)$ 的表达式为

$$S(k) = \frac{\sqrt{\pi}}{c(k_1 - k_2)} \times \exp\left[-\left(\frac{k - k_0}{2k}\right)^2\right] \quad (2)$$

式中： c 为真空中光传播速度， $c = 3 \times 10^8\text{ m/s}$ ； k_0 为系统中心波长对应的波数。

根据式（1）可知，影响低相干显微干涉信号的因素主要有以下几点：光源的光谱分布 $S(k)$

(对应时间相干性); 光瞳面的强度分布 $U(\phi)$ (对应光源的照明均匀性); 干涉显微物镜的 NA (对应空间相干性); 参考平板和待测样品的反射率。

1.2 超光滑表面检测的PSI模式

显微干涉系统一般按照表面高度量值大小的起伏变化采取两种检测模式: 移相干涉法模式或垂直扫描干涉法模式。其中, 移相干涉法模式 (Phase-Shifting Interferometry, PSI) 采用单色光光源^[9], 适用于光滑及超光滑表面, 其检测样品表面的微观形貌起伏变化小于四分之一波长。检测过程中, 在参考光或测试光中引入已知相移量, 通过干涉仪改变两束光束相对相位, 并记录一系列干涉图, 利用系列移相干涉图的光强值, 按照移相法的相位计算模型, 来求解该点的相位与高度信息。

计算相位的移相算法分为定步长移相算法和等步长移相算法。若采用定步长移相算法中的 Sandoz 七步法, 则以移相量 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 对应的定步长进行垂直相干扫描, 光强信号由式 (3) 给出, 其中, I_0 为背景光强; 以相移量为 α 进行 7 步移相, 每步对应的干涉图像光强为 I_1-I_7 ; φ 为相位, 由式 (4) 计算得出; M 为对比度, 由式 (5) 计算得出。

$$I_i = I_0 [1 + M \cos(\varphi + i\alpha)] \quad (3)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{(3I_3 + I_7 - I_1 - 3I_5)}{(4I_4 - 2I_2 - 2I_6)} \quad (4)$$

$$M = \begin{cases} \frac{3I_3 + I_7 - I_1 - 3I_5}{\sin \varphi}, & \sin \varphi \geq \cos \varphi \\ \frac{4I_4 - 2I_2 - 2I_6}{\cos \varphi}, & \sin \varphi < \cos \varphi \end{cases} \quad (5)$$

在干涉仪中一般采用 PZT 来改变参考面或者测试面的位置, PZT 移动的微小位移量与显微干涉光束之间的光程差或相位差变化关系为

$$\Delta z = \frac{1}{2} \Delta p = \frac{1}{2} \times \frac{\lambda}{2\pi} \Delta \varphi = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta \varphi \quad (6)$$

式中: Δz 为测试面与参考面之间的高度差; Δp 为两束光之间的光程差; $\Delta \varphi$ 为两束光之间的相位差。一般情况下, 参考面为超光滑表面, 因此, Δz 即代表被测表面的轮廓高度信息。

1.3 其他微结构表面检测的VSI模式

垂直扫描干涉法模式 (Vertical Scanning Interferometry, VSI) 采用宽光谱光源^[10], 干涉条纹由

高斯分布的相干包络调制。垂直扫描过程中, 若记录检测视场每一采样点的干涉光强信号随扫描位置 (光程差) 的变化, 则变化曲线如图 1 所示。其中, 零光程差位置即等光程位置, 干涉光强得到包络极值, 利用包络极值点随扫描位置的关系, 得到相应采样点的表面高度值, 这是 VSI 模式的基本检测原理, 能够有效的消除 PSI 中的 2π 模糊问题。

基于 VSI 的基本检测原理, 在自研仪器中, 利用优化后的高分辨力垂直扫描干涉技术算法 (High Definition Vertical Scanning Interferometry, HDVSI)^[11], 对样品的三维形貌进行检测。

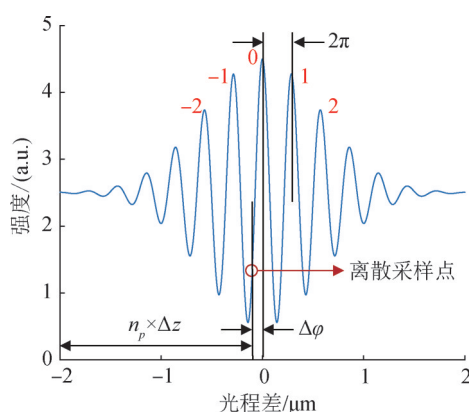


图1 VSI基本原理

Fig.1 Fundamentals of VSI

2 白光显微干涉仪及其关键技术

2.1 白光显微干涉仪系统原理

白光干涉系统的光路结构和模块化组成如图 2 所示, 主要由四个部分组成: ①宽谱低相干科勒照明系统, 光源采用 LED 白光光源; ②干涉显微物镜, 由显微物镜与干涉腔构成; ③图像采集与处理系统, 可采用数字 CCD, 空间像素为 1024×1024 , 灰度等级为 12 bit; ④轴向位移扫描装置, 即 PZT 及其驱动、控制系统, 其扫描分辨力为纳米级, 与图像采集系统配合为移相算法或垂直扫描算法提供多幅干涉图像。

白光显微干涉仪各部分协同工作的逻辑系统原理框图如图 3 所示。光源的出射光经随检测模式的切换选择, 可分成宽带光模式 (VSI 采用此模式) 和单色光模式 (PSI 采用此模式)。选定检测模式后, 由科勒照明系统提供照明, 经过显微物镜后分别进入干涉腔, 即到达参考平板和被测样

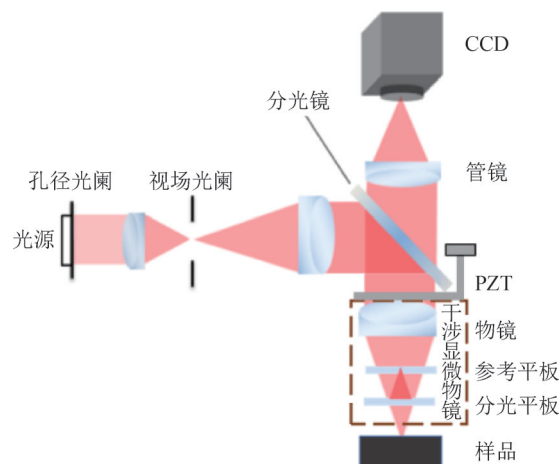


图2 白光显微干涉系统原理图
Fig.2 Schematic diagram of white light microscopic interference system

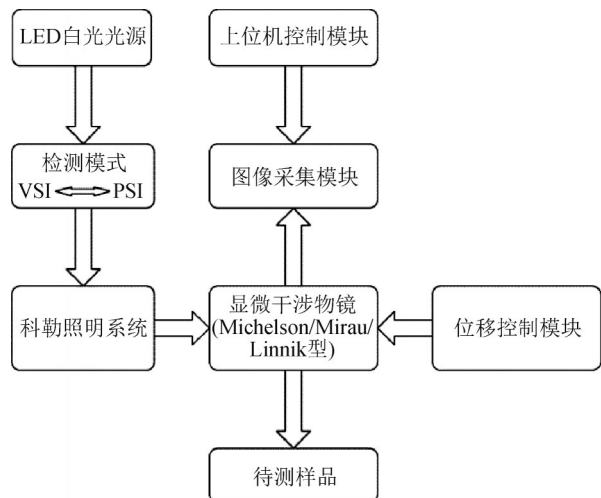


图3 白光显微干涉仪工作原理
Fig.3 Operating principle of white light microscopic interference system

品，干涉腔形成的干涉条纹被图像采集模块采集，为垂直扫描干涉（VSI 模式）或移相干涉（PSI 模式）提供多幅干涉图像的原始数据。

白光显微干涉仪实物照片如图4所示。图4（a）

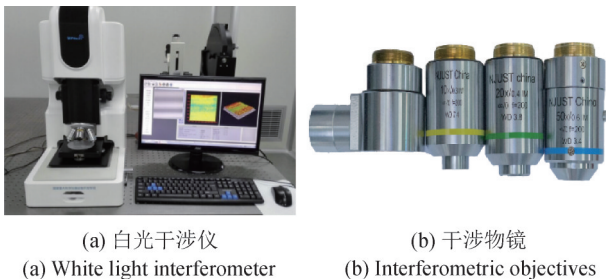


图4 白光显微干涉系统实物图
Fig.4 Photo of white light microscopic interference system

为光、机、电、算高度集成的白光显微干涉仪成套主机；图4（b）为完全国产化的4个干涉物镜部件。

2.2 长工作距干涉显微物镜设计

干涉显微物镜是白光显微干涉仪的核心部件，主要由显微物镜与干涉腔组成，如图5所示，干涉显微物镜有3种原理结构。

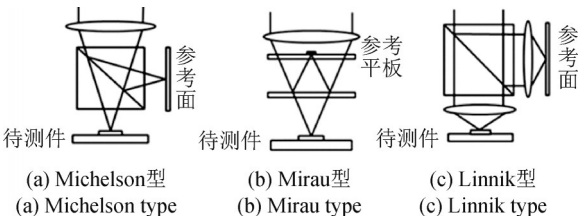


图5 三种典型物镜光路结构
Fig.5 Three typical optical configurations of objective lens

干涉显微物镜是在显微物镜中加入干涉腔，因此必须具有足够的工作距离。设计 CCD 的靶面大小为 25.4 mm，大于 Zygo 与 Veeco 公司常用的 16.9 mm；选型采用“+ -”光组组合，“-”远离物方，达到增大工作距离的效果。图6给出了 5 ×，10 ×，20 ×，50 ×四个倍率的设计结果平面图，将它们与 Zygo 公司、Veeco 公司的同类产品物镜性能指标做对比，结果如表1所示。

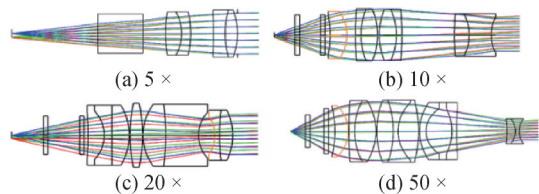


图6 干涉显微物镜设计结构平面图
Fig.6 Design structure plan of interference microscope objective

2.3 仪器软件设计

根据微结构的三维形貌复原算法，由多幅干涉光强数据得到样品结构的三维形貌，该过程通过软件工程实现，软件的界面如图7所示。软件主要模块包括：干涉图像采集与预处理、测量模式选择、微观形貌复原与计算、三维形貌图像显示、关键参数评估等。

2.4 典型样品检测结果与分析

使用白光显微干涉仪在 50 ×干涉物镜下检测 90.5 nm 台阶板，在 20 ×干涉物镜下检测 459 nm 台阶板，并与美国 Veeco 同类仪器检测结果对比，检测结果如图8，图9所示。通过计算台阶板上下表

表1 国外同类产品技术指标对比
Tab.1 Comparison of technical indicators of similar products abroad

单位	技术指标					
	倍率	型号	NA	工作距/mm	齐焦距/mm	视场
Zygo	5×	Michelson	0.13	9.3	56.5	1.41 mm × 1.06 mm
Veeco					45	1.76 mm × 1.32 mm
南京理工				15		2.54 mm × 1.92 mm
Zygo	10×	Mirau	0.30	7.4	56.5	0.70 mm × 0.53 mm
Veeco					45	0.88 mm × 0.66 mm
南京理工						1.27 mm × 0.96 mm
Zygo	20×	Mirau	0.40	4.7	56.5	0.35 mm × 0.26 mm
Veeco					45	0.44 mm × 0.33 mm
南京理工						0.64 mm × 0.48 mm
Zygo	50×	Mirau	0.55	3.4	56.5	0.14 mm × 0.11 mm
Veeco					45	0.18 mm × 0.13 mm
南京理工						0.25 mm × 0.19 mm

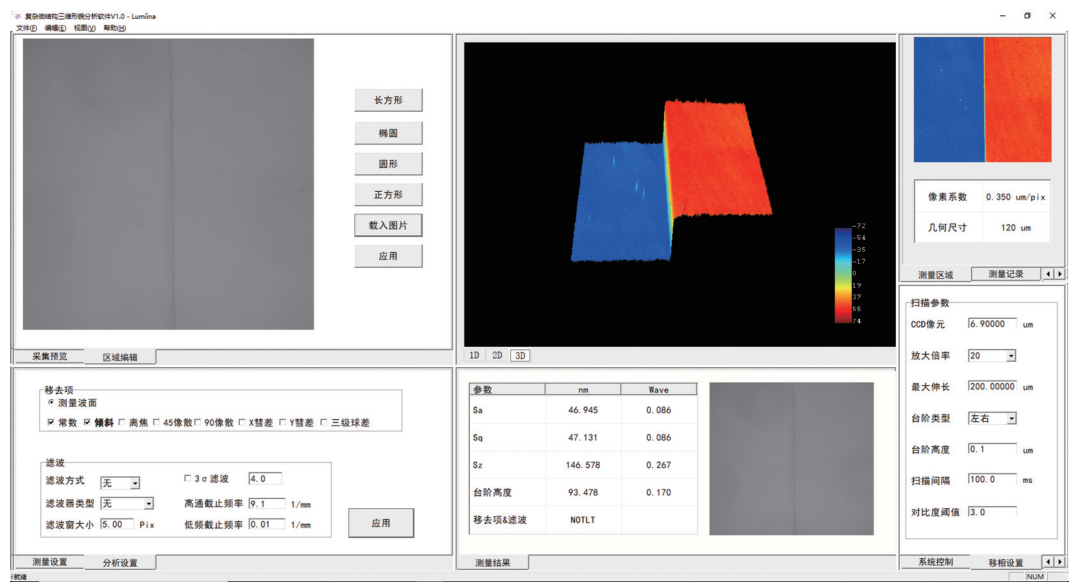


图7 仪器软件界面

Fig.7 Software interface of instrument

面的高度差值计算台阶高度，其中，白光显微干涉仪的检测结果分别为 93.48 nm 与 455.29 nm，Veeco 公司同类仪器的检测结果分别为 92.8 nm 与 448.8 nm，通过对比实验数据以及结果图像，二者的三维形貌与尺寸数据一致。

为了验证仪器的检测能力，使用自研仪器分别检测了我国中科院某所的微光栅、某公司通过光刻制作的激光电视用扩散片微结构、二元光学

元件表面结构、深孔 MEMS 器件，如图 10 所示。可以看出，表面微结构形貌清晰，周期结构锐度明显，数据准确^[13]。实验结果表明：白光显微干涉仪能够实现对低深宽比微结构三维形貌的高精度无损检测。

以上样品微结构的高深宽比均很小，为了进一步研究白光显微干涉法对高深宽比微结构的测量能力，用自研的白光显微干涉仪和美国 Veeco 公

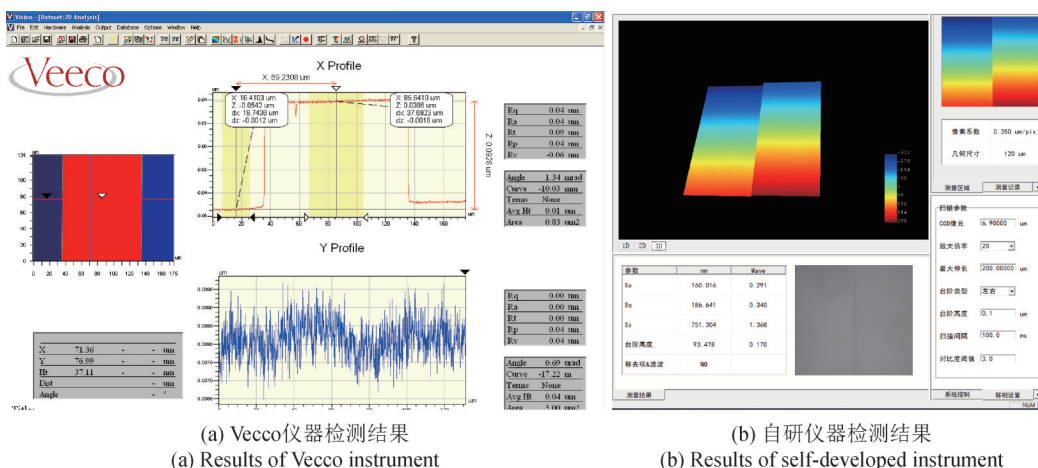


图8 90.5 nm台阶板检测结果
Fig.8 Test results of 90.5 nm step plates

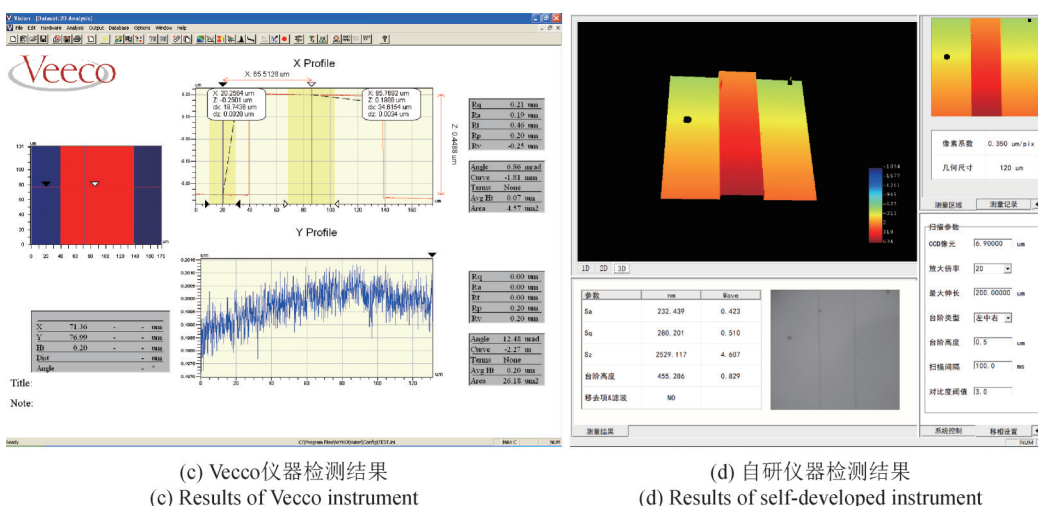


图9 459 nm台阶板检测结果
Fig.9 Test results of 459 nm step plates

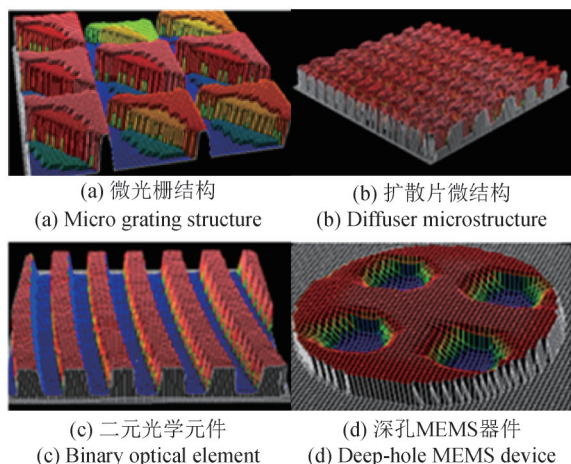


图10 典型样品检测结果
Fig.10 Test results of typical samples

司的同类仪器, 测量高深宽比值相同的同一样品, 对高深宽比值由低到高微结构样品反复测量, 发现高深宽比微结构底部几何拓扑对入射光的遮挡形成了耦合距离, 影响了微结构三维形貌的可信度^[14-16]。结果表明, 采用白光显微干涉仪检测微结构三维形貌, 能够得到可信三维形貌的高深宽比值不超过4。

图11是测量直径为20 μm 、深度为77 μm 、深宽比为3.85的TSV (Through Silicon Via) 孔顶、孔底部的干涉图, 分别测量10次, 深度平均值为76.62 μm , 与高精度的SEM测量结果比对, 深度测量相对误差为1%。由图11可以发现, 此时高深宽比为3.85, 底部可以清晰成像的可靠采样点仍

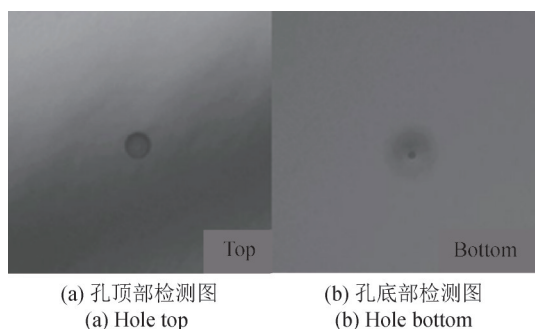


图 11 深宽比3.85TSV孔顶、孔底检测图

Fig.11 Test images of TSV hole top and bottom with depth to width ratio of 3.85

然存在,但数量稀少。

3 近红外显微干涉仪及其关键技术

3.1 近红外显微干涉仪原理

近红外显微干涉仪系统的主体光路结构型式采用Linnik型干涉显微物镜,系统的光路结构如图12所示,主要由四部分组成:①宽谱低相干科勒照明系统,光源采用近红外波段($1.25\sim 1.45\mu\text{m}$)SLD;②Linnik型干涉系统,参考臂与测试臂包含相同的光路型式,包含2个平面反射镜与一个大NA显微物镜;③主动补偿与光瞳像差监测系统,通过光瞳面CCD监测物镜出瞳像差,变形镜用于补偿测试臂上由高深宽比结构引起的调制像差;④干涉图采集与处理系统,成像面CCD空间像素为 640×512 ,灰度等级为14 bit;⑤轴向微位移扫描装置控制样品垂直移动,与干涉图采集系统配合,提供隐含微结构三维形貌信息的显微干涉图像。

图13为近红外显微干涉仪实物照片,图13(a)为近红外显微干涉仪主体部分,主要由光源、照明系统、参考光路、测试光路、位移台、PZT以及CCD组成;图13(b)为仪器整体封装图,上位机显示与控制部分包括装配于封装外壳上的计算机;封装外壳内分为上下两层,上层为干涉仪主体,下层为气浮隔振平台,干涉仪主体放置于气浮隔振平台上,气浮隔振平台的气泵放置于封装下层的窗口内部。近红外显微干涉仪是光、机、电、算高度集成的成套系统,除具备国内外商用显微干涉仪检测常规阶跃型微结构的能力之外,其最大优越性在于可用于检测高深宽比20:1的硅基MEMS沟槽结构、TSV硅通孔的三维形貌,并可在此基础上开展微结构特征参数线宽、深度、侧

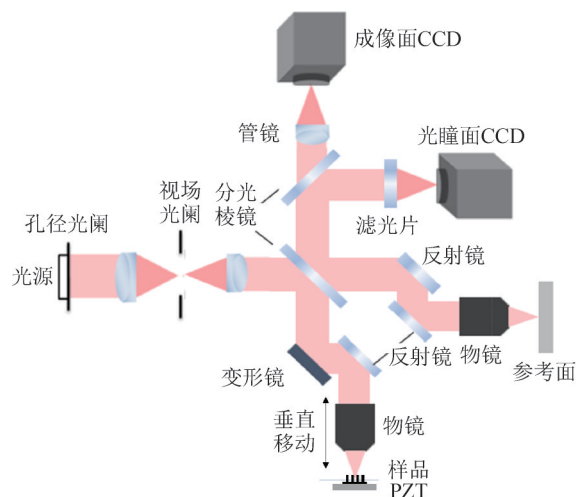


图 12 近红外显微干涉系统原理图

Fig.12 Schematic diagram of near-infrared microscopic interference system

壁角、粗糙度等参数的评定。

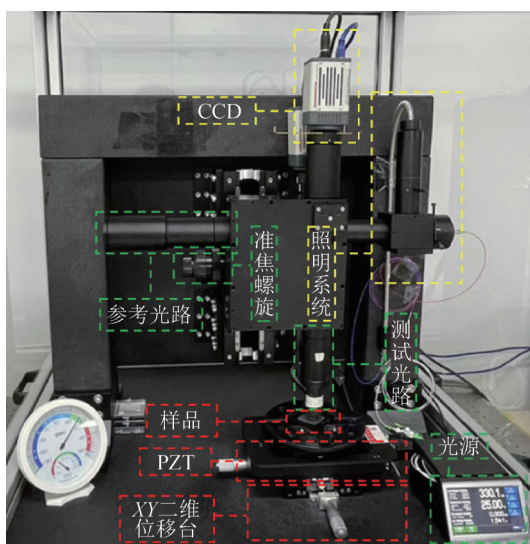
3.2 高深宽比结构底部信号增强方案

高深宽比结构的检测难度大,因结构自身遮挡探测光使探测光无法注入到结构底部,导致探测信号微弱,现有的检测方法失效。为了增强注入到结构底部的探测光,在近红外显微干涉仪中提出了系统的创新方案,包括:①检测光波长选择对硅材料透明的近红外波段,即波长 $1.25\sim 1.45\mu\text{m}$ 的光,避免了结构对探测光的遮挡;②选用大NA显微物镜,增大注入到底部的光通量;③系统在测试臂内置光瞳像差检测与变形镜的主动补偿功能子系统,用于探测光受结构调制散开后的重聚焦,确保注入到结构底部的探测光足够强,这些创新已经获得国家发明专利授权^[17-18]。

图14为深度 $200\mu\text{m}$ 下某硅基单沟槽微结构样品的显微成像补偿效果图,可见经过补偿过后,底部图像变清晰,同时扫描干涉信号在底部附近将出现在增强后的峰值位置。

3.3 针对高深宽比微结构的垂直扫描策略

用近红外显微干涉测量系统检测高深宽比微结构时,需对高深宽比结构进行垂直扫描,获取垂直扫描干涉信号,依据扫描干涉信号准确定位得到微结构的上、下表面采样点的高度差位置,或者说微结构上、下表面附近的扫描干涉信号对沟槽阶跃微结构的形貌复原价值最大。此时,若对沟槽微结构高度范围内做步长为 $\lambda/8$ 的精细有序扫描,当微结构高度超过 $100\mu\text{m}$ 甚至达到 $200\mu\text{m}$ 以上时,则扫



(a) 干涉仪主体
(a) Main part of interferometer



(b) 封装效果
(b) Packaging effect picture

图13 近红外显微干涉仪实物图

Fig.13 Physical map of near-infrared micro interferometer

描时间很长,获得的冗余数据量大,检测效率低。因此,面向结构上、下表面之间跨度大(数十至数百微米)的问题,需要设计粗精结合的快速扫描方法,压缩冗余数据,提高检测效率。

本文基于干涉图像灰度方差峰值的评价函数,结合大、中步长的跳跃式高效扫描,采用爬山法对结构上、下表面所对应的垂直扫描位置作快速判断,并记为 Loc_1 , Loc_2 ; 然后以此为中心分别划定(相干长度)的有效扫描范围,再对结构上、下表面按 $\lambda/8$ 的步进量进行小步长的垂直相干扫描,并同步采集干涉图像。实验中,垂直相干扫



(a) 未补偿
(a) Not compensated
(b) 补偿后
(b) Compensated

图14 深度为200 μm 的硅基单沟槽微结构
Linnik干涉显微镜成像结果

Fig.14 Images of single-groove on silicon-base with 200 μm depth imaged by Linnik-type interferometric microscope

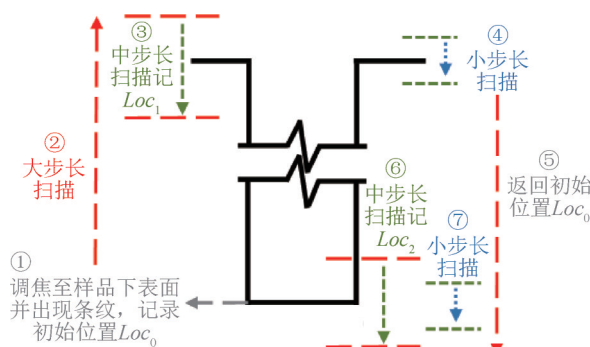


图15 高深宽比微结构的垂直扫描策略示意图

Fig.15 Schematic diagram of vertical scanning steps for experimental detection of high aspect ratio microstructures

描的具体步骤与策略如图15所示。因此,最终所提取的垂直扫描干涉信号为有效扫描范围内结构上、下表面对应信号分布的拼接结果^[19-20]。

3.4 仪器软件设计

近红外显微干涉仪的软件界面如图16所示,针对系统总体的硬件控制与待测样品的高精度三维形貌复原而开发。软件主要模块包括:干涉图像采集与处理、微观形貌复原与计算、三维形貌显示与分析、二维轮廓曲线显示与分析、待测结构关键参数评定等。

3.5 典型样品检测结果与分析

作者研究团队使用近红外显微干涉系统开展了近百种硅基高深宽比微结构样品的检测实验验证与不确定度评定工作,典型的高深宽比微结构型式有:单沟槽高深宽比标准复合样板、等宽沟槽、不等宽沟槽、梳齿状沟槽、TSV深孔^[16, 20-21]等。因篇幅有限,仅展示线宽12.7 μm 、深度235 μm 的等宽沟槽结构与线宽3 μm 、深度80 μm 的梳

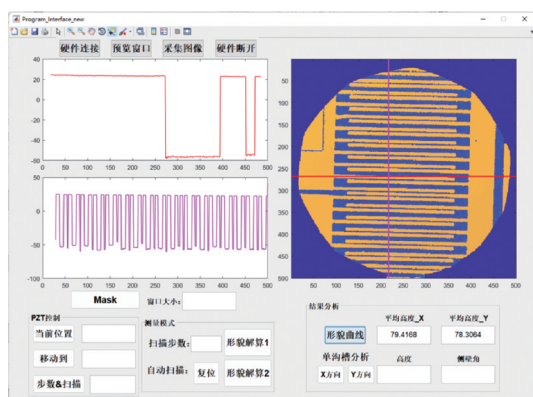
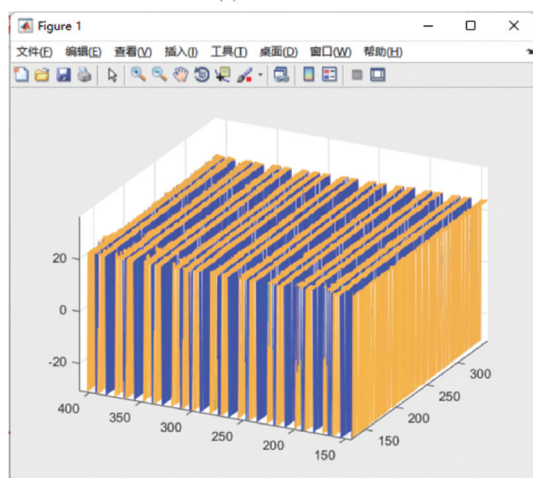
(a) 界面1
(a) Interface1(b) 界面2
(b) Interface2

图16 近红外显微干涉仪软件界面

Fig.16 Software interface of near-infrared micro interferometer

齿沟槽结构两种样品在 $20\times$ 干涉物镜下的三维形貌检测结果,如图17所示。每种被检样品的检测结果均包含三维形貌分布图与一根采样线上的沟槽轮廓分布图,为了便于比较还给出了被检样品的SEM检测结果。其中,等宽沟槽结构样品的线宽检测结果为 $12.9\mu\text{m}$,深度检测结果为 $234.9\mu\text{m}$;梳齿沟槽结构中存在宽窄两种周期的沟槽,其中窄线宽检测结果为 $2.9\mu\text{m}$,深度检测结果为 $79.8\mu\text{m}$,上述结果在10次以上重复测量的基础上得到的,与SEM检测结果一致,可以相互验证。

实验结果表明:近红外显微干涉仪完全具备了高深宽比微结构的检测能力,高深宽比量程可以突破 $20:1$,相较于SEM检测而言,采用近红外显微干涉系统显著优势在于无损检测的检测过程无需剖片,所以具备检测效率高且检测成本低等特点,对工艺线现场具有良好的适用性。

4 结论

近些年,随着半导体行业的飞速发展,对微结构的检测需求日益增多,但随着微结构向着更小线宽、更高深宽比方向发展,检测的难度也日益增大,本文阐述了作者研究团队在低相干显微干涉检测技术的研究进展。其中,白光干涉显微干涉仪用于检测超光滑、台阶、阶跃型等微结构的三维形貌;近红外显微干涉仪,利用近红外光源能够穿透硅基材料这一特性,实现对硅基高深宽比结构三维形貌的检测。通过用户反馈、第三方测试、第三方应用证明等多种技术鉴定手段,现有结果已经表明:具有自主知识产权、国产化良好基础的白光显微干涉仪和近红外显微干涉仪,达到了预期的设计与研制目标,其中白光显微干涉仪拥有国产同类产品的先进技术指标和仪器功能,近红外显微干涉仪因其技术的先进性,仪器的整体技术指标和功能在国内外没有先例,在高深宽比微结构三维形貌检测方面独树一帜。

参考文献

- [1] 叶钟灵. 世界半导体应用市场的变迁与发展[J]. 电子产品世界, 2014, 21(7): 5-6, 24.
- YE Z L. How developing semiconductor products market in the world[J]. Electronic engineering & product world, 2014, 21(7): 5-6, 24. (in Chinese)
- [2] 甘雷, 蒋勇, 彭程, 等. 微结构半导体中子探测器研究进展[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(8): 986-990, 1006.
- GAN L, JIANG Y, PENG C, et al. Advance in micro-structured semiconductor neutron detectors [J]. Nuclear electronics & detection technology, 2014, 34(8): 986-990, 1006. (in Chinese)
- [3] VERNON-PARRY K D. Scanning electron microscopy: an introduction[J]. III-Vs Review, 2000, 13(4): 40-44.
- [4] 廖乾初, 蓝芬兰. 扫描电镜分析技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- LIAO Q C, LAN F L. Analysis technology and application of scanning electron microscope[M]. Beijing: China Machine Press, 1990. (in Chinese)
- [5] 韩志国, 李锁印, 冯亚南, 等. 接触式轮廓仪探针状态检查图形样块的研制[J]. 微纳电子技术, 2019, 56(9): 761-765.
- HAN Z G, LI S Y, FENG Y N, et al. Development of the

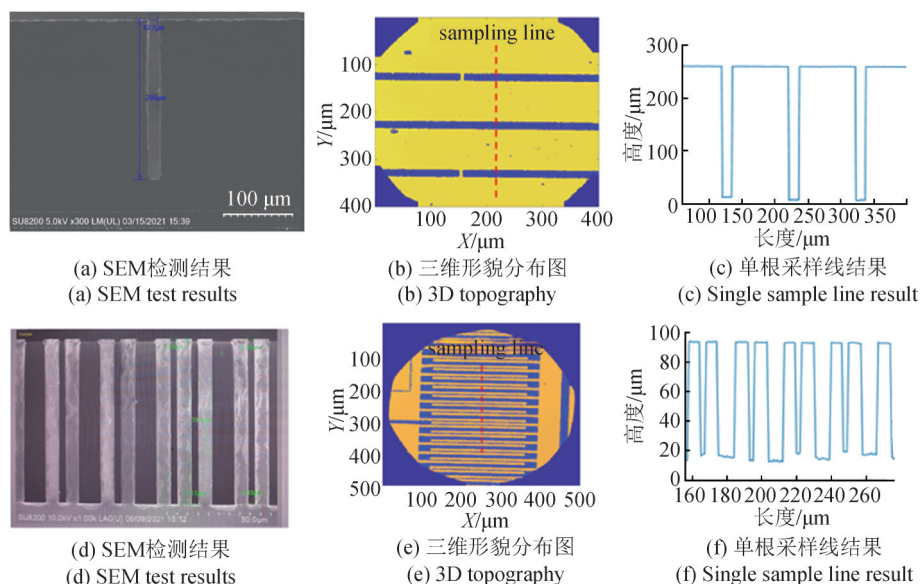


图 17 高深宽比沟槽结构 SEM 检测结果与近红外显微干涉系统检测结果对比图

Fig.17 Comparison between SEM test results and near-infrared micro interference system test results of high aspect ratio groove structures

- inspection pattern specimen for the contact profiler stylus state[J]. Micronanoelectronic technology, 2019, 56(9): 761 – 765. (in Chinese)
- [6] 高志山, 袁群, 孙一峰, 等. 微结构显微光学无损检测方法 (特邀) [J]. 光子学报, 2022, 51 (8): 17 – 34. GAO Z S, YUAN Q, SUN Y F, et al. Non-destructive test methods of microstructures by optical microscopy (Invited)[J]. Acta photonica sinica, 2022, 51(8): 17 – 34. (in Chinese)
- [7] 马龙. 白光扫描干涉测量方法与系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2011. MA L. Study on white light scanning interferometry: measurement method and system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [8] KINO G S, CHIM S. Mirau correlation microscope[J]. Applied optics, 1990, 29(26): 3775 – 3783.
- [9] 杨天博, 郭宏, 李达成. 白光扫描干涉测量算法综述[J]. 光学技术, 2006, 32 (1): 115 – 117, 120. YANG T B, GUO H, LI D C. The summary of algorithms for white light scanning interferometry[J]. Optical technique, 2006, 32(1): 115 – 117, 120. (in Chinese)
- [10] 孙一峰. 阶跃型微结构三维形貌的显微干涉测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022. SUN Y F. Study on micro interference testing technology for three dimensional morphology of step microstructures [D]. Nanjing University of Science & Technology, 2022. (in Chinese)
- [11] 袁群, 孙一峰, 高志山, 等. 高精度短相干光三维形貌快速测量算法: CN109751971A[P]. 2019. YUAN Q, SUN Y F, GAO Z S, et al. A fast algorithm for measuring 3D topography with high accuracy and short coherent light: CN109751971A[P]. 2019. (in Chinese)
- [12] 袁群, 徐伟, 高志山, 等. Mirau 型超分辨率干涉显微物镜: CN201910137549. 8[P]. 2019. YUAN Q, XU W, GAO Z S, et al. Mirau type super-resolution interference microscope objective: CN 2019 10137549. 8[P]. 2019. (in Chinese)
- [13] 高志山, 孙一峰, 于颢彪, 等. 三维微结构显微干涉检测方法[J]. 电光与控制, 2019, 26 (11): 1 – 5. GAO Z S, SUN Y F, YU H B, et al. Detection method of 3D micro-structure based on microscopic interference [J]. Electronics optics & control, 2019, 26(11): 1 – 5. (in Chinese)
- [14] 刘俭, 谷康, 李梦周, 等. 光学显微三维测量解耦准则[J]. 红外与激光工程, 2017, 46 (3): 8 – 14. LIU J, GU K, LI M Z, et al. 3D measurement decoupling criterion in optical microscopy[J]. Infrared and laser engineering, 2017, 46(3): 8 – 14. (in Chinese)
- [15] 施帅飞. 蝙蝠翼效应对白光干涉显微成像三维分辨率影响的理论与实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020. SHI S F. Theoretical and experimental study on the effect of batwing effect on the three-dimensional resolution of white light interference microscopic imaging[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2020. (in Chinese)

Chinese)

- [16] 吴春霞, 马剑秋, 高志山, 等. 基于像差补偿的近红外显微干涉硅通孔测量方法研究[J]. 光学精密工程, 2022.

WU C X, MA J Q, GAO Z S, et al. Research on the measurement of through silicon via by near-infrared micro interferometry based on aberration compensation[J]. Optics and precision engineering, 2022. (in Chinese)

- [17] 高志山, 马剑秋, 袁群, 等. 高深宽比微结构反射式干涉显微无损测量装置: CN112097645A[P]. 2020.

GAO Z S, MA J Q, YUAN Q, et al. High aspect ratio microstructure reflective interference microscope nondestructive measuring device: CN112097645A [P]. 2020. (in Chinese)

- [18] 高志山, 赵雨晴, 孙一峰, 等. 适用于高深宽比结构三维形貌检测的干涉测量方法: CN202111056510.7 [P]. 2021.

GAO Z S, ZHAO Y Q, SUN Y F, et al. Interferometric method for measuring three-dimensional topography of high aspect ratio structures: CN202111056510.7 [P]. 2021. (in Chinese)

- [19] 周俊涛, 高志山, 孙一峰, 等. 基于光谱分布特性的快速垂直扫描形貌测量[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 72–79.

ZHOU J T, GAO Z S, SUN Y F, et al. Fast vertical scanning topography measurement based on spectral distribution characteristics [J]. Acta optica sinica, 2022, 42(15): 72–79. (in Chinese)

- [20] 孙一峰, 高志山, 范筱昕, 等. 低相干干涉高深宽比结构高度检测信号处理技术[J]. 光子学报, 2022, 51(9): 323–333.

SUN Y F, GAO Z S, FAN X X, et al. Signal processing for height measurement of high-aspect-ratio structure based on low-coherence interferometry [J]. Acta photonica sinica, 2022, 51(9): 323–333. (in Chinese)

- [21] 赵雨晴, 高志山, 袁群, 等. 基于FDTD的高深宽比沟槽结构低相干显微干涉信号仿真分析[J]. 光子学报, 2022.

ZHAO Y Q, GAO Z S, YUAN Q, et al. Simulation and analysis of low-coherence micro-interference signal with high aspect ratio trench structure based on FDTD [J]. Acta photonica sinica, 2022. (in Chinese)

(本文编辑:朱俊真)



第一作者: 霍霄 (1999—), 男, 博士研究生, 2021年于长春理工大学获得学士学位, 现为南京理工大学博士研究生, 专业为光学工程, 主要研究方向为光学干涉精密测量。



通讯作者: 高志山 (1966—), 男, 教授, 博士, 南京理工大学光学工程学科(国家一级重点学科)博士生导师, 第七、八届中国光学学会理事, 中国光学学会光学测试专业委员会副主任, 全国光电测量标准化专委会委员, 主要从事微纳结构的精密无损检测技术、先进光学设计、精密测试仪器等方面的研究工作。