

文章编号 1004-924X(2023)03-0301-12

基于像差补偿的近红外显微干涉硅通孔测量

吴春霞, 马剑秋, 高志山, 郭珍艳*, 袁 群

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:为了实现深宽比大于6:1的硅通孔的形貌测量,提出了一种基于像差补偿的近红外显微干涉检测方法。该方法采用近红外宽带光作为光源,能够穿透硅通孔,检测系统中内置变形镜自适应像差补偿模块,主动补偿硅通孔引入的调制像差。在检测硅通孔三维形貌时,依据COMSOL Multiphysics有限元仿真软件得到的三维硅通孔高深宽比结构对探测光的调制像差规律,指导设置需变形镜补偿的像差种类和量值,用基于频域的评价函数指标阈值,判定硅通孔底部图像的聚焦状态,获得待测硅通孔清晰的底部图像,本质上提升探测光的重聚焦能力。在此基础上,使用垂直扫描干涉法得到待测硅通孔的深度与其三维形貌分布。实验测量了直径为10 μm 、深度为65 μm 、深宽比为6.5:1和直径为10 μm 、深度为103 μm 、深宽比为10.3:1的硅通孔深孔,并与高精度SEM的测量结果对比,深度测量的相对误差为1%。与白光显微干涉测量结果对比表明,本文所提出的方法可以获得清晰的高深宽比硅通孔的底部图像,有效增强底部的宽谱干涉信号和对比度,能够准确测量更高深宽比硅通孔的三维形貌。

关键词:无损测量;光学显微干涉;自适应像差补偿;COMSOL仿真;硅通孔形貌

中图分类号: O436.1; TH744 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233103.0301

Measurement of through silicon via by near-infrared micro interferometry based on aberration compensation

WU Chunxia, MA Jianqiu, GAO Zhishan, GUO Zhenyan*, YUAN Qun

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: guozy15@njust.edu.cn

Abstract: Through silicon via (TSV) technology refers to the silicon micro-hole processing technology used to achieve vertical conduction and interconnection between chips. The three-dimensional (3D) morphology of TSV samples is commonly measured using destructive scanning electron microscope (SEM) profile imaging technology. In addition, white light interference technology has the advantage of non-destructive measurement; however, it is difficult to probe the light reaching the bottom of TSV samples with an aspect ratio higher than 6:1, and the topography is also distorted. To address this problem, a near-infrared micro-interference detection method based on aberration compensation is proposed in this paper. The method uses near-infrared broadband light as the probe light source, which can penetrate through the

收稿日期:2022-09-08;修订日期:2022-10-11.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2019YFB2005500);国家自然科学基金资助项目(No. 62175107, No. U1931120);江苏省六大人才高峰项目(No. RJFW-019);中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室基金资助项目(No. KLOMT190201);上海在线检测与控制技术重点实验室基金资助项目(No. ZX2021102)

TSV. Moreover, an adaptive aberration compensation module in the form of a deformable mirror is introduced into the detection system to compensate for the modulation aberration that is synchronously generated by the TSV. The first step of detecting the TSV 3D topography is to set the type and quantity of the aberration that needs to be compensated by the deformable mirror. This is obtained using the finite element simulation software COMSOL Multiphysics based on the aberration modulation law for a 3D TSV high aspect ratio structure under the probe light. Subsequently, the evaluation function index threshold based on the frequency domain is used to estimate the focus state of the TSV bottom image. Furthermore, the refocusing ability of the probe light is essentially improved and a clear bottom image of the tested TSV is obtained. On this basis, the depth value of the tested TSV and its 3D topography distribution is calculated using vertical scanning interferometry. Finally, two types of TSV samples with a diameter of $10\text{ }\mu\text{m}$ and depth of $65\text{ }\mu\text{m}$ (aspect ratio 6.5), and diameter of $10\text{ }\mu\text{m}$ and depth of $103\text{ }\mu\text{m}$ (aspect ratio 10.3), are measured using the proposed method. The results show that the relative error of depth measurement is 1% compared with that of the high-precision SEM measurement results. Moreover, the proposed method can obtain a clear image of the TSV bottom with a high aspect ratio, and can also effectively enhance the wide spectrum interference signal and fringe contrast at the bottom compared with white light microscopic interference. Therefore, the proposed method can be used to precisely measure the 3D topography of TSVs with a higher aspect ratio.

Key words: nondestructive measurement; optical microscopic interference; adaptive aberration compensation; COMSOL simulation; through silicon via morphology

1 引 言

随着电子元器件向着高性能、低功耗、尺寸更小的方向不断发展,硅通孔(Through Silicon Via, TSV)工艺成为半导体器件三维封装的技术途径之一。TSV是指在芯片和芯片之间制作垂直导通,实现芯片之间的堆叠和互连的技术^[1-2]。然而,半导体器件三维集成对TSV的尺度提出了更高的要求,而且半导体制造的高效率对TSV三维形貌的在线无损测量提出更快的要求。对于高深宽比TSV三维形貌的测量,非光学测量主要包括扫描电子显微术(SEM)^[3]、原子力显微术(AFM)^[4]等方法。这种方法具有破坏性,仅对陪片进行测量,且制样和SEM扫描拼接测量全过程耗时数小时,测量效率低,不适用于在线测量。光学测量主要包括白光显微干涉法^[5-7]、共焦显微成像法^[8-9]、光谱反射法^[10-15]等,具有非接触、无破坏、测量效率高等优点。韩国科技大学的研究人员提出了一种结合低相干近红外干涉光谱技术、共聚焦技术和光学显微技术的新型混合光学探头,实现了直径为 $5.954\text{ }\mu\text{m}$ 、深度为 $40.420\text{ }\mu\text{m}$ 、深宽比约为6.8:1的TSV样品

的测量^[9]。韩国标准科学研究院的研究小组采用近红外飞秒脉冲激光的光梳作为光源,基于光谱干涉法实现了深宽比为7:1的TSV的深度测量^[10]。共焦显微成像法测量的样品深宽比有限,光谱反射法无法直接获得待测样品的三维形貌分布。白光显微干涉法利用宽带光的低相干特性,与显微成像技术相结合,可一次性复原出待测样品的三维形貌^[16]。国内中北大学的研究人员利用白光显微干涉法测量了宽度为 $22.6\text{ }\mu\text{m}$ 、深度为 $89.78\text{ }\mu\text{m}$ 的沟槽,深宽比为4:1,但对于宽度小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的高深宽比沟槽,探测光则无法到达沟槽的底部^[7]。白光显微干涉法的工作波长为可见光,对于TSV硅通孔材料不透明,经过干涉显微物镜的聚焦光束探测高深宽比TSV底部时,仅中央小数值孔径(Numerical Aperture, NA)的光束为有效探测光束,边缘NA的光束经过深孔的侧壁多次反射形成串扰光束。因此,韩国首尔大学的研究人员通过在照明光路中引入孔径光阑,限制物镜NA,排除多次反射光的串扰,得到了直径为 $4.27\text{ }\mu\text{m}$ 、深度为 $47.9\text{ }\mu\text{m}$ 、深宽比为11.2:1的TSV的顶部直径、孔深度等参数,但底部形貌失真,横向分辨率低,仅为数微米^[5-6]。

由于硅材料在近红外波段具有较高的透过率,采用近红外宽带光源穿透TSV的高深宽比结构,有望突破硅基材料对大NA探测光的遮挡,增大探测光的光通量,增强近红外宽带光干涉信号,用于提取TSV的形貌信息。然而,大NA光束会被TSV结构调制,降低光束聚焦性,产生像差,严重影响成像质量和干涉条纹的对比度。自适应光学是以成像波前像差校正为目标的波前控制技术,能实时补偿由光束传播、系统光学误差、成像环境和运动扰动等因素引入的波前畸变,从而改善系统成像性能,获取高分辨率目标图像,目前广泛应用于天文成像或者生物成像中的动态像差补偿^[17]。本文引入变形镜自适应像差补偿技术,消除近红外光源测量TSV高深宽比结构所引入的调制像差,提高探测光的聚焦能力,增强TSV的底部成像和干涉信号。

为了实现对高深宽比TSV尺寸的高精度无损测量并实现TSV的三维形貌复原,本文提出了基于像差补偿的近红外显微干涉法。依据COMSOL Multiphysics有限元仿真软件得到的三维TSV高深宽比结构对探测光的调制像差规律,设置有待变形镜补偿的像差种类和量值,引入基于频域的评价函数指标阈值,判定TSV底部图像的聚焦状态,获得待测TSV清晰的底部像,提升探测光的重聚焦能力。在此基础上,利用构建的近红外显微干涉系统对多种深宽比的TSV样品进行垂直扫描干涉测量,解算出TSV的深度值并得到了其三维形貌分布。

2 原理

2.1 基于像差补偿的近红外显微干涉光学测量系统

图1为Linnik型近红外反射式显微干涉测量系统的光路。整个光学系统主要由4部分组成:(1)近红外宽光谱低相干科勒照明系统,工作波长为 $1.25\sim 1.45\ \mu\text{m}$;(2)由参考臂和测试臂构成的Linnik型显微干涉系统;(3)由变形镜(Deformable Mirror, DM)构成的光瞳像差主动补偿模块;(4)由压电陶瓷(PZT)和红外探测器CCD构成的干涉图同步扫描采集与处理系统。近红外短相干光源LS发出的光束经过由透镜 L_1, L_2, L_3 组成的柯勒照明系统产生多视场均匀照明光

后,经立方分光棱镜 BS_1 分为测试光和参考光;打开光阑L,参考光经过平面反射镜 M_2, M_3 和显微物镜 MO_2 ,照射到平面反射镜 M_4 上,并原路返回经立方分光棱镜 BS_1 和透镜 L_4 被红外探测器CCD接收;测试光经DM反射,依次经反射镜 M_1 和显微物镜 MO_1 ,照射放置于压电陶瓷PZT上的待测样品S;待测样品S被照明后,带有调制像差的反射光原路返回至变形镜DM,光阑L遮挡住参考臂后变形镜对像差进行补偿,补偿结束后,打开光阑L使得参考光在红外探测器CCD上与测试光形成干涉。

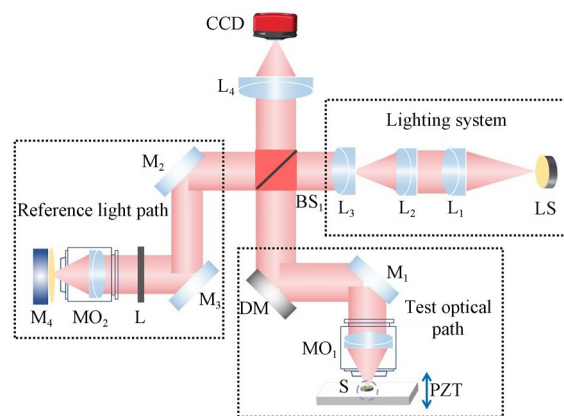


图1 Linnik型近红外反射式显微干涉测量系统的光路
Fig. 1 Optical path of Linnik near-infrared reflective micro interferometry system

测量系统的工作波长为 $1.25\sim 1.45\ \mu\text{m}$,它是硅基材料的透射窗口波段,该波段的大NA探测光可穿透硅基材料到达深孔底部,有利于提高高深宽比TSV深孔底部的探测光通量。现有的近红外显微物镜主要集中于生物医学领域,其波段一般是 $0.8\sim 1.1\ \mu\text{m}$,不是硅基最有效的近红外透过窗口,长工作距、大NA近红外物镜的设计与研制关键技术没有先例可参考。该系统配备了自主研发的大NA($0.5\sim 0.9$)近红外宽光谱($1.25\sim 1.45\ \mu\text{m}$)显微物镜模组 MO_1 和 MO_2 。另一方面,大NA近红外探测光入射高深宽比TSV深孔时,必然引起衍生的调制像差,从而严重影响探测光在深孔底部的能量聚焦。为此,该系统配备了由变形镜DM构成的光瞳像差主动补偿模块,用于补偿调制像差,提高探测光的聚焦能力,增强TSV的底部成像和干涉信号。

2.2 像差补偿与三维形貌提取原理

宽带光源发出经显微物镜会聚的大NA探测

光束,穿过具有一定厚度的待测硅晶圆或硅基 TSV 样品后,必然在测试臂引入像差,影响宽带光干涉显微检测系统的成像性能和干涉信号对比度。

应用自适应光学或主动光学进行像差补偿,首要问题是能够获取和表征系统光瞳面上包含像差的光瞳函数,不失一般性,将出瞳处的波前相位看作是一个标准球面波和像差波前的叠加。标准球面波可用理想透镜的相位变换因子表示,即:

$$t(x, y) = \exp \left[-i \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right]. \quad (1)$$

需要求解球面波经过样品调制后产生的像差 $\varphi(x, y)$ 。因而,出瞳处的波前复振幅表示为:

$$g_0 = A(x, y) \exp \left\{ i \left[t(x, y) + \varphi(x, y) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 $A(x, y)$ 是出瞳处振幅分布。光瞳函数为:

$$P_0 = A(x, y) \exp \left[i \varphi(x, y) \right], \quad (3)$$

式中: $\varphi(x, y)$ 是球面波经过样品调制后产生的光瞳像差。本文选用标准 Zernike 多项式来拟合像差,即 $\varphi(x, y) = \sum_{j=1}^N a_j Z_j$, a_j 是具体的 Zernike 项系数, Z_j 是 Zernike 项, N 为整数。

如图 1 所示, DM 用来补偿像差,该像差补偿系统由多个驱动器单元组成,采用机械变形法来匹配期望的共轭波前,每个驱动器对表面 $Z_i(x, y)$ 的作用效果即为变形镜的影响函数^[18-19]。这些影响函数均为线性函数,通过施加合适的幅度 A_i 至 M 个驱动器上产生期望的表面 $S(x, y)$ 。影响函数的线性方程组表达式如下:

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^M A_i Z_i(x, y). \quad (4)$$

操控变形镜进行像差补偿就是将变形镜每个驱动器的影响函数 $Z_i(x, y)$ 用泽尼克多项式拟合,即可将需要的各项泽尼克像差系数转变为施加给变形镜各个驱动器的电压值,即:

$$\sum_{i=1}^M A_i Z_i(x, y) = \sum_{j=1}^N a_j Z_j. \quad (5)$$

变形镜对光瞳像差补偿达到预期目标后,即可在 CCD 上得到干涉信号对比度增强的干涉条

纹和清晰的底部成像。在此基础上,利用垂直扫描干涉法^[20]对 TSV 深孔展开三维形貌测量。近红外光为宽带光源,其显微干涉条纹图是不同波长光的干涉叠加结果,光强分布为:

$$I(x, y, z) = I_0 + \int_{\lambda_c - \lambda_b}^{\lambda_c + \lambda_b} \phi(\lambda) \cos \frac{4\pi(z - z_p)}{\lambda} d\lambda, \quad (6)$$

其中: I_0 为背景光强, λ_c 为光源中心波长, $2\lambda_b$ 为光谱的带宽, $\phi(\lambda)$ 为干涉图在 CCD 上关于波长 λ 的能量分布, z 为 PZT 的相对位置, z_p 为零光程差位置。因此,当像面像素点在零光程差位置即 $z = z_p$ 时,干涉强度最大。当 PZT 在垂直方向上移动时,测试臂与参考臂的光程差为零,像面上获取的干涉信号最大,形成一系列相干峰。此时,一系列相干峰位置对应于样品面的一系列相对高度,这些随视场点变化的相对高度信息,形成了样品表面的三维形貌。

2.3 TSV 底部成像清晰度评价函数

变形镜对光瞳像差补偿时,由于补偿到位的图像有更尖锐清晰的边缘,相较于未补偿到位的模糊图像具有更多的高频分量,因此可使用基于频域的评价函数来判定 TSV 底部的成像状态,判断变形镜是否达到预期的补偿效果^[21]。分析图像频域特性的常用手段是傅里叶变换,对于连续图像 $g(x, y)$,当 $\iint_{-\infty}^{+\infty} |g(x, y)| dx dy < \infty$ 时,存在频域变换,即:

$$F(\mu, \nu) = \iint_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \exp[-j2\pi(\mu x + \nu y)] dx dy. \quad (7)$$

对于 $M \times N$ 个像素的图像进行二维离散傅里叶变换,得到:

$$G(k, l) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x, y) \exp \left[-j2\pi \left(\frac{kx}{M} + \frac{ly}{N} \right) \right]. \quad (8)$$

图像的功率谱函数表示为:

$$P(k, l) = |G(k, l)|^2. \quad (9)$$

二维离散傅里叶变换后的图像清晰度评价函数为:

$$f = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} \sqrt{k^2 + l^2} P(k, l). \quad (10)$$

3 仿 真

TSV 对大 NA 探测光标准球面波引起的调制像差与 TSV 的孔直径、深度和边界条件等表征参数有关,随待测 TSV 样品表征参数的变化,补偿像差的量值和种类会相应发生变化。因此,为了让变形镜能高效补偿由 TSV 引起的调制像差,使近红外宽带光显微干涉系统检测 TSV 底部时能获取清晰的底部图像和明显的相干峰干涉信号,仿真研究了 TSV 对探测光产生的像差调制规律。

3.1 TSV 模型建立

COMSOL Multiphysics 仿真软件以有限元法为基础,通过求解偏微分方程(单物理场)或偏微分方程组(多物理场)来模拟真实的物理现象。本文仿真所用的功能组件为 COMSOL 的波动光学模块,该模块从麦克斯韦方程出发,将仿真区域划分为多个离散网格,通过定义边界条件设定入射场,以设置初始值,通过不断的迭代计算出近场的复振幅。如图 2 所示,这里以直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、深度为 $65\text{ }\mu\text{m}$ 的 TSV 阵列为例,阐述仿真中 TSV 模型的建立方法(彩图见期刊电子版)。图中灰色区域为 TSV,常规标准大气压下,硅折射率为 3.5,蓝色区域为空气,折射率为 1.0。红色线条为入射边界,绿色线条为反射电场的接收边界,模型周围设置 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的完美匹配层,用于吸收到达边界的电场。设置入射电场为平面波,定义光源的工作波长为 $1.325\text{ }\mu\text{m}$,焦距为 $\sqrt{3}/10\text{ }\mu\text{m}$,使探测光恰好聚焦到 TSV 的底部,且 $\text{NA}=0.5$ 。设置最大网格单元尺寸为 $\lambda/10$,最小网格

单元尺寸为 $\lambda/20$,构建网格。模型求解的自由度与网格划分粗细有关,所有模型求解的自由度数在 1×10^7 数量级,达到网格解析波长的所需标准,在内存允许的情况下保证了计算的准确性。

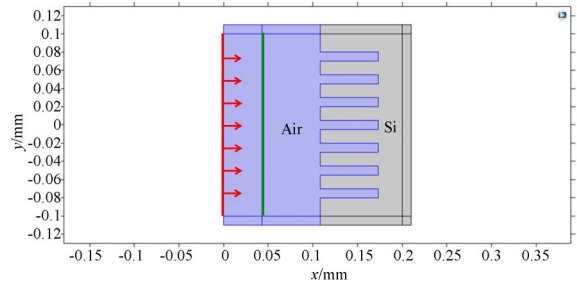


图2 直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、深度 $65\text{ }\mu\text{m}$ 的 TSV 阵列孔模型建立
Fig. 2 Modeling of TSV array hole with diameter of $10\text{ }\mu\text{m}$ and depth of $65\text{ }\mu\text{m}$

3.2 仿真结果及分析

由于不能保证探测光的光轴与样品底部的中心轴完全重合,因此需要研究样品底部不同位置采样点的像差规律。本文仿真了探测光聚集在 TSV 底部 A、B 两点的像差, A 点是 TSV 底部的中心点, B 点是 TSV 底部偏离中心 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的一个点。平面波从左侧边界入射,聚焦在 TSV 的底部位置并反射回去,电场传输过程如图 3 所示。COMSOL 仿真得到光场近场复振幅后,用近轴透镜构建显微物镜模型,模型中样品位于显微物镜的前焦面上,光瞳面位于显微物镜的后焦面上,构成具有傅里叶变换运算的光场传播光路模型,在 MATLAB 中计算光瞳函数。图 4 和图 5 分别为光瞳面的波面相位和标准泽尼克多项式

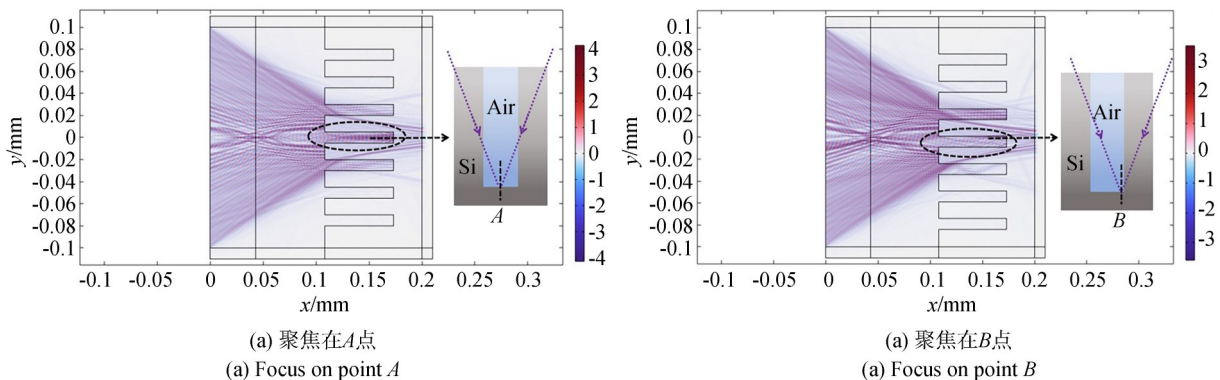


图3 探测光聚焦在 A、B 两点的电场传输图

Fig. 3 Electric field transmission diagram of probe light focused on points A and B

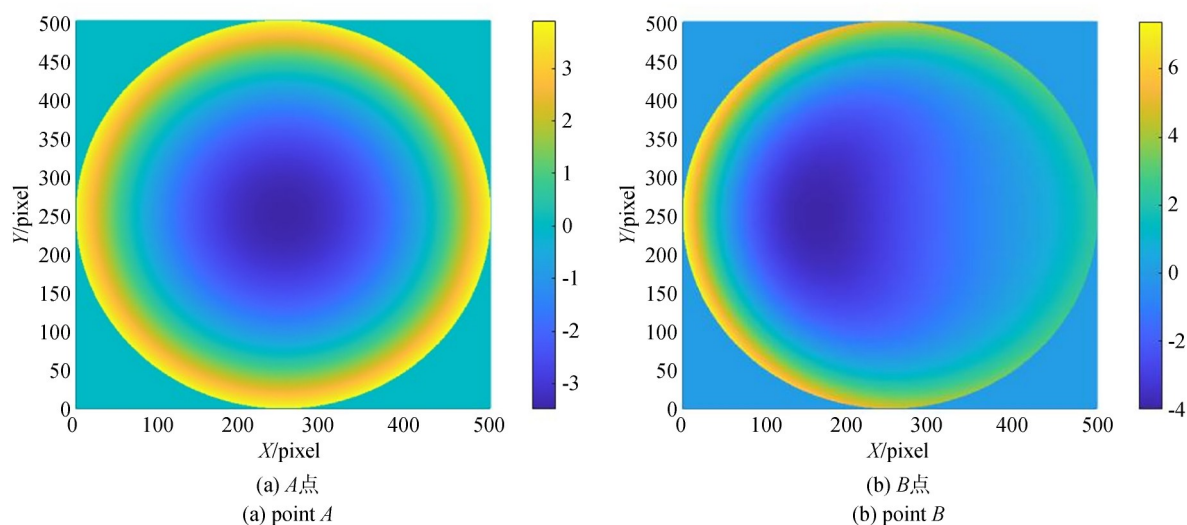


图4 A,B点的波面相位

Fig. 4 Wavefront phase of points A and B

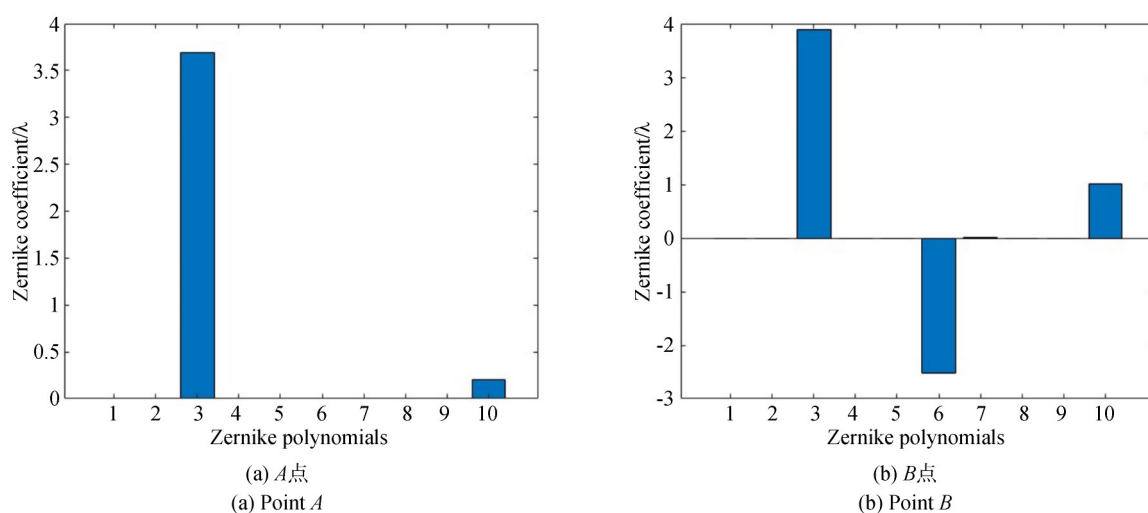


图5 A,B点像差的泽尼克多项式拟合系数

Fig. 5 Zernike polynomial fitting coefficients of aberration of points A and B

拟合结果。可以看出,点的像差主要是系数为 3.69λ 的离焦和系数为 0.2λ 的球差, B点的像差主要是系数为 3.87λ 的离焦、系数为 -2.5λ 的 x 方向彗差和系数为 1.01λ 的球差。由此可知, TSV 底部中心点(A)的像差主要类型为离焦和球差, TSV 底部偏中心点(B)的像差主要类型为离焦、球差和彗差。

4 实验与结果分析

4.1 实验装置与补偿效果

根据图1系统光路构建的 Linnik 型近红外显

微干涉测量系统如图6所示,实验使用 NA 为 0.5、放大倍率为 $20\times$ 、工作波段在 $1.25\sim 1.45\ \mu\text{m}$ 的显微物镜。整个测试过程分为三步:第一步,根据3.2小节的仿真结果,设置需变形镜补偿的像差种类和量值,获得待测 TSV 底部清晰的像和干涉条纹;第二步,通过 PZT 驱动待测样品进行垂直扫描,在红外探测器 CCD 上同步接收待测样品不同深度表面的干涉条纹图;第三步,采用垂直扫描干涉算法对干涉图进行处理,得到待测样品的深度和宽度测量结果。实验过程中,将宽度为 $10\ \mu\text{m}$ 、深度为 $65\ \mu\text{m}$ 的 TSV 样品放在 PZT 上方的测试平台上,调试光路使顶部清晰成

像且存在高对比度干涉条纹,随后启动PZT对TSV孔进行垂直扫描成像。该实验以 $\lambda_c/8$ 的步长对TSV样品进行垂直扫描,共采集TSV孔顶部和底部426幅图像,前213幅为顶部附近的干涉图像,后213幅为底部附近的干涉图像。

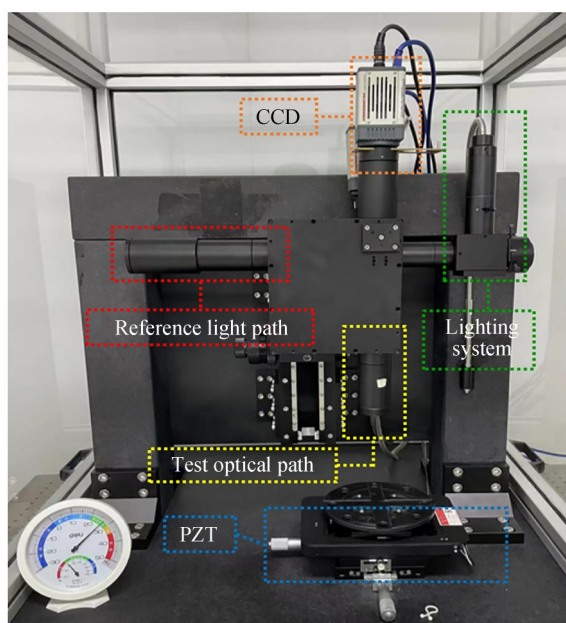


图6 Linnik型近红外显微干涉测量系统

Fig. 6 Linnik near-infrared micro interferometry system

最终,采集到的未进行像差补偿的TSV孔顶底部的干涉图像如图7所示,图中所示为间隔 $\lambda_c/8$ 步长的连续4幅图。样品顶部的干涉条纹清晰可见,但由于探测底部的入射光和反射光经过TSV高深宽比结构的调制,样品底部的干涉条纹变得微弱,难以分辨,孔底部图像也极为模糊。

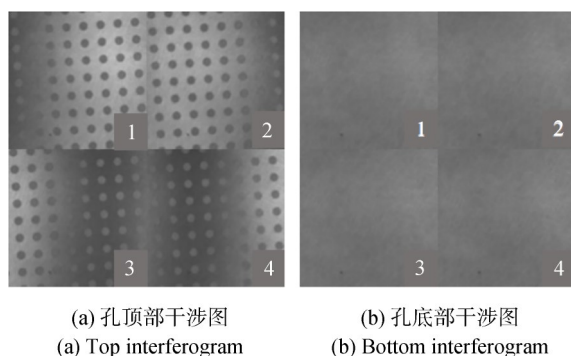


图7 像差补偿前的顶底部干涉图

Fig. 7 Interferogram of top and bottom before aberration compensation

为使样品底部图像清晰且增强底部的宽谱干涉信号和对比度,需要进行光瞳像差的补偿。实验用于像差补偿的装置是ALPAO变形镜,由69个驱动器单元组成,光瞳直径为10.5 mm,最大倾斜补偿量为 $60\text{ }\mu\text{m}$,最大球差补偿量为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。根据3.2节仿真所得的各项像差系数和占比,转换成相应的电压值驱动变形镜,变形镜将补偿电压分成20次对光瞳像差进行迭代补偿。利用2.3节所述的基于频域的评价函数作为图像清晰度评定指标,结合爬山搜索法确定最佳的像差补偿位置。如图8所示,当像差补偿迭代到第12次时,式(10)中的图像清晰度评价函数 f 最大,即此时TSV的底部像最清晰,如图9所示。

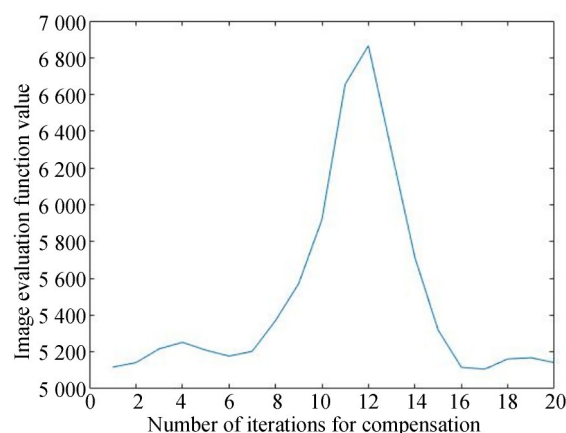


图8 迭代补偿20次的图像评价函数

Fig. 8 Image evaluation function with 20 iterations of compensation

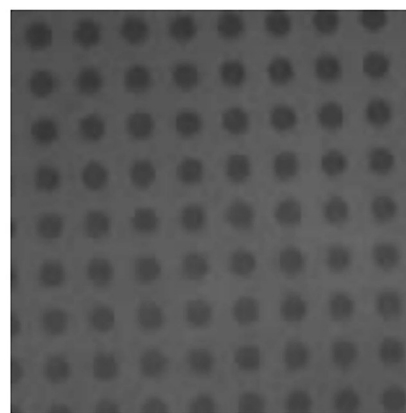


图9 迭代补偿12次时的孔底部图像

Fig. 9 Bottom image at 12 times of iterative compensation

补偿达到预期目标后,在测试光路中加入参考光,对样品进行垂直扫描干涉测量。TSV 孔顶底部的干涉图如图 10 所示,与补偿前的图 7 比较可发现,样品的底部图像明显更清晰。比较补偿前后底部一个像素点的干涉信号,如图 11 和图 12 所示,补偿前混叠相干信号较多,不利于相干信号的识别和解调;而补偿后的相干信号包络变得清晰,干涉信号对比度得到有效增强。

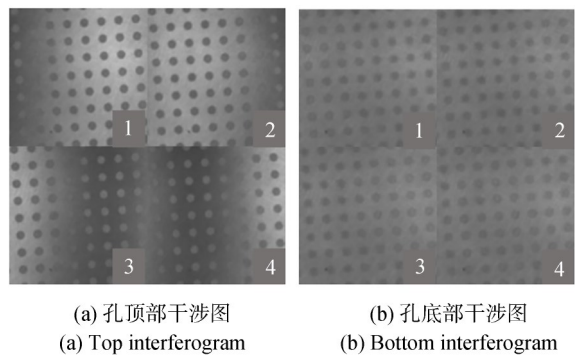


图 10 像差补偿后的顶底部干涉图
Fig. 10 Interferograms of top and bottom after aberration compensation

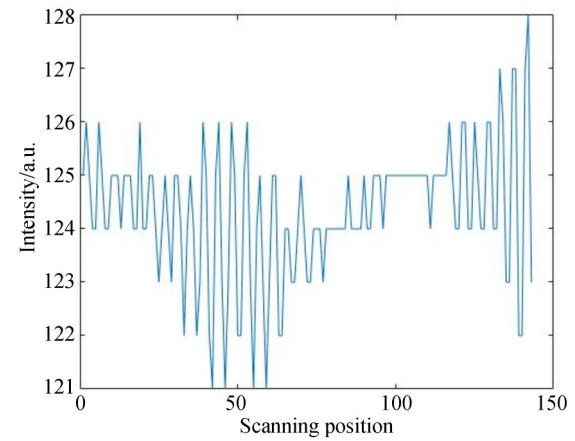


图 11 像差补偿前底部一个像素点的干涉信号强度
Fig. 11 Interference signal intensity at one point on bottom before aberration compensation

4.2 近红外显微干涉与白光显微干涉测量对比

基于 4.1 节的测量结果,采用垂直扫描干涉算法对所获得的 426 幅顶底部干涉图像进行处理,得到待测 TSV 的三维形貌复原图和一个方向的一维轮廓曲线,分别如图 13(a)和图 13(b)所示。

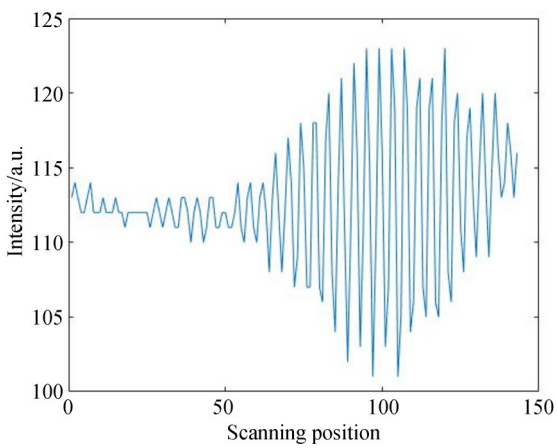


图 12 像差补偿后底部一个像素点的干涉信号强度
Fig. 12 Interference signal intensity at one point on bottom surface after aberration compensation

参照现有的国际标准 [ISO 5436-1: 2000 (E)] 和 W/3 准则,在 TSV 样品测量中,TSV 底部的理论宽度为 W ,则高度测量结果的示值读取区域为距离 TSV 理论边缘位置 $W/3$ 以外的区域。重复测量 10 次并计算 TSV 深度的均值、标准差,以及均值相对 SEM 检测结果的绝对误差和相对误差,视场范围内其中一个孔(图 13(a)方框)的 10 次测量结果如表 1 所示。深度平均值为 $65.95\text{ }\mu\text{m}$,顶部直径为 $9.60\text{ }\mu\text{m}$,底部直径为

表 1 采用近红外显微干涉法测量 TSV 一个孔深度的 10 次测量结果

Tab. 1 Ten measurements of depth of one hole in TSV using near-infrared micro interferometry

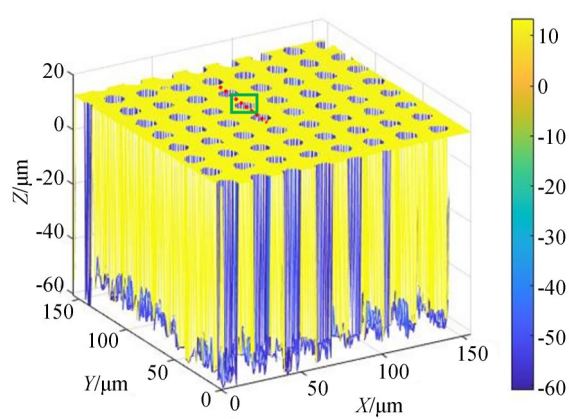
Number	Result
1	$65.97\text{ }\mu\text{m}$
2	$67.06\text{ }\mu\text{m}$
3	$66.64\text{ }\mu\text{m}$
4	$65.33\text{ }\mu\text{m}$
5	$66.44\text{ }\mu\text{m}$
6	$65.73\text{ }\mu\text{m}$
7	$65.78\text{ }\mu\text{m}$
8	$65.39\text{ }\mu\text{m}$
9	$66.07\text{ }\mu\text{m}$
10	$66.20\text{ }\mu\text{m}$
Mean value	$65.95\text{ }\mu\text{m}$
Standard deviation	$0.42\text{ }\mu\text{m}$
Absolute error	$0.68\text{ }\mu\text{m}$
Relative error	1%

9.20 μm ,与图 13(c)的扫描电镜结果(65.27 μm)对比,深度测量相对误差为1%。从10次检测结果的标准差可以看出,本文方法具有良好的重复性和鲁棒性。

图 13(d)是白光显微干涉法的测量结果,依次为 TSV 的一维轮廓、三维形貌和底部干涉条纹图。由于 TSV 的深宽比较大,白光显微干涉法的探测光难以到达样品底部,底部成像极为模糊且无干涉信号,10次白光显微干涉实验均无法测量出样品的三维形貌。

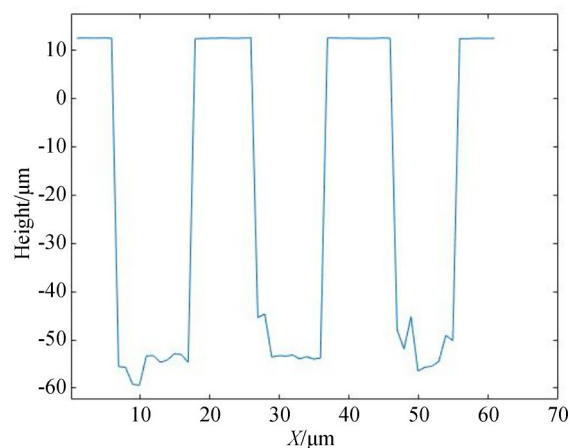
为进一步研究像差补偿近红外显微干涉法相对于白光显微干涉法测量 TSV 的优越性,本文分别用这两种方法测量了直径为 20 μm 、深度

为 77 μm 、深宽比为 3.85:1 和直径为 10 μm 、深度为 103 μm 、深宽比为 10.3:1 的 TSV 样品。图 14(a)和图 14(b)分别是白光显微干涉法和像差补偿近红外显微干涉法测量深宽比为 3.85:1 的 TSV 孔顶底部的干涉图,每种方法测量 10 次,深度平均值分别为 76.62 μm 和 77.12 μm ,但对于 TSV 的底部成像,后者明显比前者更加清晰,孔底部的直径平均值分别为 11.79 μm 和 20.00 μm 。因此,与白光显微干涉技术相比,本文方法可以在保证深度测量精度的情况下提高 TSV 的底部成像清晰度。对于深宽比为 10.3:1 的 TSV,本文方法也可准确测量出其深度值,如图 15 所示,10 次深度测量结果的平均值为 103.85



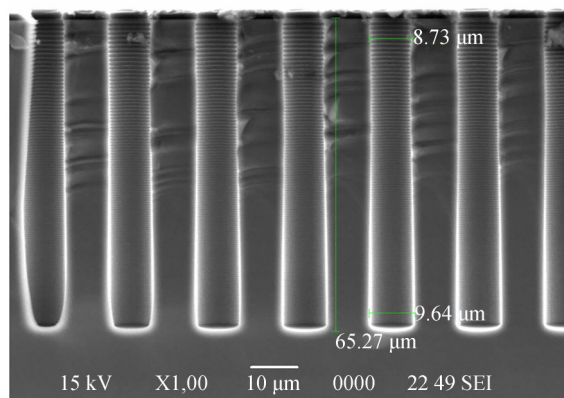
(a) 三维形貌复原图

(a) Three-dimensional topography restoration map



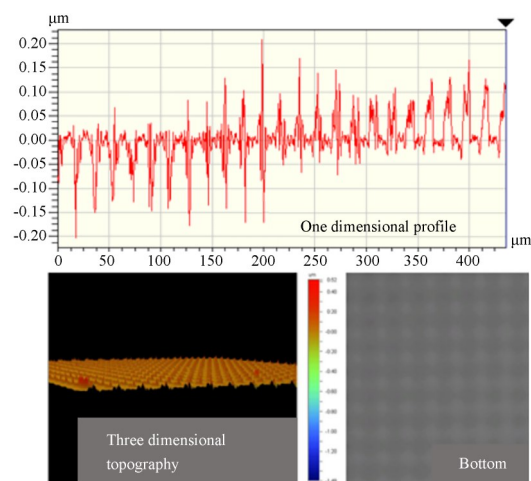
(b) 一维轮廓图

(b) One-dimensional contour map



(c) 扫描电镜结果

(c) Scanning electron microscope image



(d) 白光显微干涉结果

(d) White light microscopic interference results

图 13 不同方法测量 TSV 的结果

Fig. 13 Results of TSV measurement by different methods

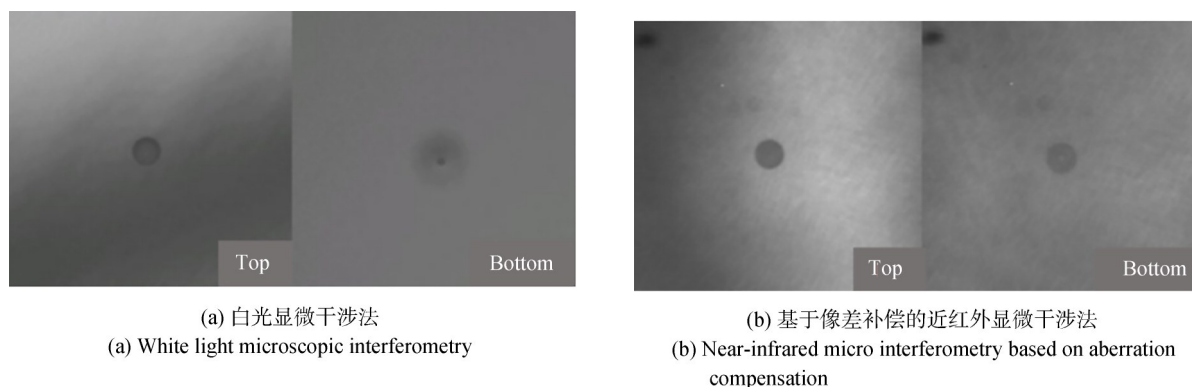


图 14 两种方法测量深宽比为 3.85:1 的 TSV 顶底部干涉图

Fig. 14 Top and bottom interference patterns of 3.85:1 aspect-ratio TSV with two methods

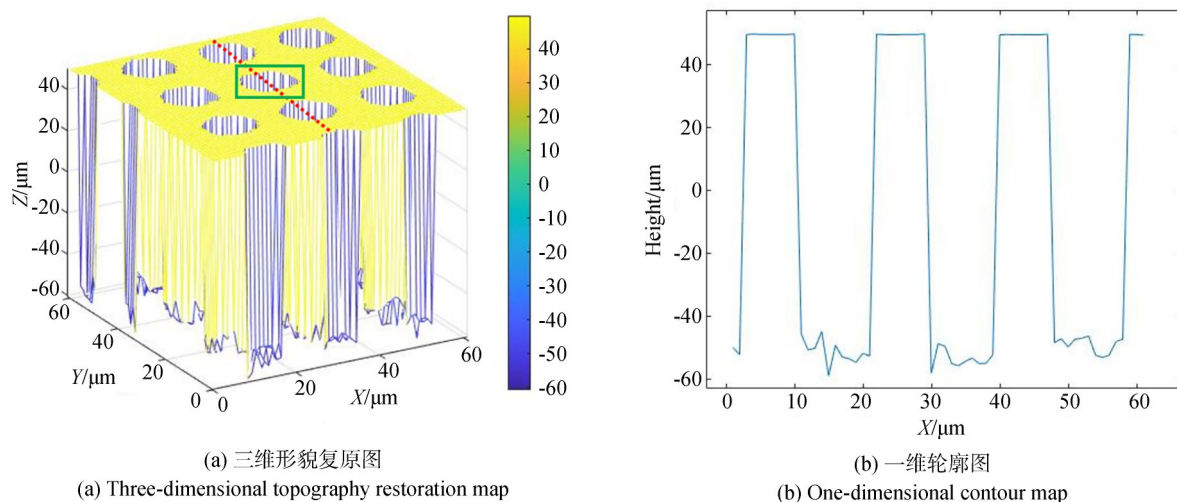


图 15 基于像差补偿的近红外显微法对深宽比为 10.3:1 的 TSV 测量结果

Fig. 15 Results of TSV with aspect ratio of 10.3:1 by near-infrared micro interferometry based on aberration compensation

μm , 顶底部直径平均值分别为 $10.02 \mu\text{m}$ 和 $10.72 \mu\text{m}$ 。

5 结 论

本文提出了基于像差补偿的近红外显微干涉法,用于测量深宽比大于 6:1 的 TSV。采用能够穿透硅通孔的近红外宽带光作为光源,利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件研究了 TSV 高深宽比结构对探测光的调制规律,用于指导变形镜补偿的像差种类和量值,分析发现 TSV 底部中心点位置的像差主要为离焦和球差,底部偏离中心点位置的像差增加了彗差。随后,在实

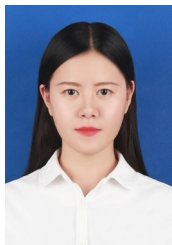
验中用变形镜自适应像差补偿模块对 TSV 引入的调制像差进行补偿,用基于频域的评价函数评定底部图像的清晰状态,获得待测 TSV 清晰的底部图像。最后在此基础上,使用垂直扫描干涉法得到待测 TSV 的深度与其三维形貌分布。实验测量了直径为 $10 \mu\text{m}$ 、深度为 $65 \mu\text{m}$ 、深宽比为 6.5:1 和直径为 $10 \mu\text{m}$ 、深度为 $103 \mu\text{m}$ 、深宽比为 10.3:1 两种 TSV 深孔,与高精度的 SEM 测量结果对比,深度测量的相对误差为 1%。最后,与白光显微干涉技术进行对比,结果表明本文方法可以获得清晰的高深宽比 TSV 的底部图像,有效增强底部的宽谱干涉信号和对比度,能够准确测量更大高深宽比 TSV 的三维形貌。

参考文献:

- [1] PAK J S, RYU C, KIM J. Electrical characterization of through silicon via (TSV) depending on structural and material parameters based on 3D full wave simulation[C]. 2007 *International Conference on Electronic Materials and Packaging*. November 19-22, 2007, Daejeon, Korea (South). IEEE, 2008: 1-6.
- [2] KIM H, CHO J, KIM M, *et al.* Measurement and analysis of a high-speed TSV channel[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012, 2(10): 1672-1685.
- [3] 李智, 王向军. MEMS中几何量的测试方法[J]. 微细加工技术, 2003(1): 51-56.
LI ZH, WANG X J. Measurement methods of geometric characteristics in MEMS[J]. *Microfabrication Technology*, 2003(1): 51-56. (in Chinese)
- [4] GARCÍA R, PÉREZ R. Dynamic atomic force microscopy methods[J]. *Surface Science Reports*, 2002, 47(6/7/8): 197-301.
- [5] JO T, KIM S, PAHK H. 3D measurement of TSVs using low numerical aperture white-light scanning interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(4): 317-322.
- [6] HYUN C, KIM S, PAHK H. Methods to measure the critical dimension of the bottoms of through-silicon vias using white-light scanning interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2014, 18(5): 531-537.
- [7] 薛晨阳, 孔繁华, 张文栋, 等. 利用白光干涉原理测量MEMS深槽结构[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1516-1518, 1522.
XUE CH Y, KONG F H, ZHANG W D, *et al.* Measuring MEMS deep-trench structures with white light interference[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5): 1516-1518, 1522. (in Chinese)
- [8] AHN H, PARK J, KIM J A, *et al.* Optical fiber-based confocal and interferometric system for measuring the depth and diameter of through silicon vias[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(23): 5462-5466.
- [9] AHN H, BAE J, PARK J, *et al.* A hybrid non-destructive measuring method of three-dimensional profile of through silicon vias for realization of smart devices[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 15342.
- [10] JIN J, KIM J W, KANG C S, *et al.* Precision depth measurement of through silicon vias (TSVs) on 3D semiconductor packaging process[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5011-5016.
- [11] KU Y S, HUANG K C, HSU W. Characterization of high density through silicon vias with spectral reflectometry[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 5993-6006.
- [12] KU Y S, YANG F S. Reflectometer-based metrology for high-aspect ratio via measurement[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 7269-7280.
- [13] 杨楠卓. 基于光谱反射原理的高深宽比沟槽深度测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
YANG N ZH. *Research on Depth Measurement of the High Aspect Ratio Trenches Based on Spectral Reflectometry*[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [14] 张传维. 基于模型的微纳深沟槽结构红外反射谱测量方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
ZHANG CH W. *Research on Method of Model-based Infrared Reflectometry for Micro/nano Deep Trench Structures*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [15] 高志山, 袁群, 孙一峰, 等. 微结构显微光学无损检测方法[J]. 光子学报, 2022, 51(8): 17-34.
GAO ZH SH, YUAN Q, SUN Y F, *et al.* Non-destructive test methods of microstructures by optical microscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(8): 17-34. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 王玉坤, 曹召良, 李大禹, 等. 液晶-变形镜自适应光学系统的数据采集与处理软件设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1507-1516.
WANG Y K, CAO ZH L, LI D Y, *et al.* Design of liquid crystal-deformable mirror adaptive optical system data acquisition and process software[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1507-1516. (in Chinese)
- [18] 刘维, 徐珺楠, 金玟冉, 等. 基于CNN-SPGD算法的相干光通信像差校正方法研究[J]. 光学精密工程, 2022, 30(6): 743-754.
LIU W, XU J N, JIN D R, *et al.* Research on aberration correction method of coherent optical communication based on CNN-SPGD algorithm[J].

- Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(6): 743-754. (in Chinese)
- [19] HIDDLESTON H R, LYMAN D D, SCHAFER E L. Comparisons of deformable-mirror models and influence functions[C]. *San Diego, '91. Proc SPIE 1542, Active and Adaptive Optical Systems, DiegoSan, CA, USA.* 1991, 1542: 20-33.
- [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): 331-341.
- SUN Y F, GAO ZH SH, 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): 331-341. (in Chinese)
- [21] 王昕. 含噪声图像的多聚焦融合算法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2977-2984.
- WANG X. Multi-focus fusion algorithm for noisy images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2977-2984. (in Chinese)

作者简介:



吴春霞(1997—),女,江苏扬州人,硕士研究生,2020年于金陵科技学院获得学士学位,主要研究方向为光学干涉精密测量。E-mail: 15651828978@163.com

导师简介:



高志山(1966—),男,江苏淮安人,教授,1992年于中国科学院长春光学精密机械研究所获得硕士学位,2000年于南京理工大学获得博士学位,主要研究方向为精密光学测试、先进光学设计。E-mail: zhishgao@njust.edu.cn

通讯作者:



郭珍艳(1986—),女,陕西宝鸡人,副教授,2014年于南京理工大学获得博士学位,主要研究方向光学干涉精密测量等。E-mail: guozy15@njust.edu.cn