

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.01

高深宽比微结构深度测量技术的研究进展

吴岳松^{1,2}, 王子政¹, 孙新磊¹, 武飞宇¹, 霍树春^{1,3}, 胡春光^{1*}

(1.天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2.北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院, 北京 100191;

3.中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 高深宽比孔/槽微结构现广泛应用于微机电系统 (MEMS) 与三维集成电路 (3D-IC) 等领域, 是微纳器件的基础性工艺结构。随着器件微型化与功能化的发展需求, 孔/槽微结构的深宽比不断提升。深度作为重要参数对器件加工工艺、器件性能有直接影响, 微孔/槽结构深度的精确测量具有重要意义, 但测量方法面临巨大挑战, 成为测量领域的难题之一。针对这一问题, 按照非光学和光学测量方式将测量方法分为两大类, 介绍了扫描电子显微镜、扫描探针术、白光显微干涉技术、共焦显微技术和反射光谱技术等测量方法的工作原理, 在微孔/槽深度测量方面的研究现状, 尝试从中总结每种测量方法的优缺点, 最后, 讨论了未来高深宽比微结构深度测量发展趋势以及研究重点, 为之后高深宽比微结构深度的测量技术研究提供帮助。

关键词: 光学测量; 高深宽比微结构; 深度测量; 反射光谱; 白光干涉; 共焦显微

中图分类号: TB9; TH744

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2023)01-0003-15

Research progress of depth measurements of high aspect ratio microstructures

WU Yuesong^{1,2}, WANG Zizheng¹, SUN Xinlei¹, WU Feiyu¹, HUO Shuchun^{1,3}, HU Chunguang^{1*}

(1.National Key Laboratory of Engine, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2.Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China;

3.Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: High aspect ratio hole/slot microstructures are now widely used in the fields of micro-electro-mechanical systems (MEMS) and three-dimensional integrated circuits (3D-IC), and are fundamental process structures for micro and nano devices. With the development need for miniaturization and functionalization of devices, the depth-to-width ratio of hole/slot microstructures is constantly increasing. As an important parameter, depth has a direct impact on the device processing and device performance. The accurate measurement of the depth of micro-hole/slot structure is of great significance, but the measurement method faces great challenges and has become one of the difficult problems in the field of measurement. To address this issue, the measurement methods are divided into two major categories according to the non-optical and optical measurement methods, and the working principles of measurement methods such as scanning electron microscopy, scanning probe technique, white light microscopic interferometry, confocal microscopy and reflection spectroscopy are introduced. The research status of the depth measurements of micro hole/slot is introduced, and the advantages and disadvantages of each measurement method are summarized. Finally, the future development trend and research focus of high aspect ratio microstructure depth measurement are discussed to help the future research of high aspect ratio microstructure depth measurements.

Key words: optical measurement; high aspect ratio microstructures; depth measurement; reflection spectroscopy; white light interference; confocal microscopy

收稿日期: 2022-08-25; 修回日期: 2022-09-19

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB20003601)

引用格式: 吴岳松, 王子政, 孙新磊, 等. 高深宽比微结构深度测量技术的研究进展[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 3-17.

Citation: WU Y S, WANG Z Z, SUN X L, et al. Research progress of depth measurements of high aspect ratio microstructures[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1):3-17.



0 引言

高深宽比 (High Aspect Ratio, HAR) 微结构是微纳加工技术中的典型结构设计形式, 深宽比是指垂直加工表面的高度与其加工表面上所具有的较小特征尺寸之比^[1]。高深宽比结构在相同基底面积下具备更大的垂直维度空间, 可以显著提高器件的电荷存储能力、提高器件信号传输速度、改善器件的动力学特性, 为半导体器件发展提供更多的可能性。目前, 高深宽比微结构广泛应用于微能源领域、光子晶体研究领域、国防安全领域^[2]、航空航天领域^[3-4]等, 深度直接影响到具有微结构器件的理化性质、加工质量、电路性能, 因此对深度的精确测量具有重要意义。但是, 由于高深宽比微结构具有小尺寸的特殊性, 深度的精确测量是现代化高端制造工业所面临的普遍难题。本文分析了高深宽比微结构的应用领域, 概述了目前测量高深宽比微结构深度的方法, 总结对比了各个方法的优缺点, 并进一步讨论了未来测量高深宽比微结构深度方法的发展趋势。

1 高深宽比微结构应用领域

微沟槽是高深宽比微结构的主要形式之一, 是微机电系统 (MEMS) 设计中的主要结构形式。微沟槽的出现使微机电系统在设计加工时由原来的单一二维表面结构延展到了三维空间复杂结构, 大大提高了 MEMS 器件能量存储能力、信号转换能力, 促进了 MEMS 器件向小型化、集成化、微型化的发展。在生物技术领域, MEMS 制造技术广泛应用于开发各种微流控设备, 高深宽比微结构可用于制作微柱电泳芯片装置, 实现对蛋白质和 DNA 等生物分子的研究^[5]; 在微纳传感领域, 三维硅微结构可以用来制作 MEMS 电容器^[5]、加速度传感器等器件, 使器件具有更高的集成化, 更强的电荷存储能力和更高的智能化; 在气体液体检测领域, 高深宽比纳米棒提高了检测灵敏度, 并可实现几何结构的任意调整, 方便了器件加工^[6]; 在金属加工领域, 高深宽比微结构可用于大面积可拉伸透明导体的高深宽比蛇形金属结构制作^[7]。对于高深宽比的微结构而言, 深度是影响其性能的主要参数之一, 直接影响了制备出来的器件加

工质量。在微纳加工过程中, 由于高深宽比微结构具有深度大、开口小的特性, 实现对深度的精确控制十分困难, 因此对微沟槽深度的精确测量十分必要, 以保证 MEMS 器件的功能特性。

硅通孔 (Through Silicon Vias, TSV) 是另一种高深宽比微孔槽结构的重要应用。TSV 技术实现了芯片之间垂直方向的导通, 缩短了芯片之间的互连距离, 大大提高了芯片性能, 降低了信号的传输时间^[8]。TSV 技术为突破摩尔定律瓶颈提供了新的方向与思路, 成为促进三维集成电路封装技术发展的关键性技术。但由于 TSV 技术将多个芯片堆叠在一起, 三维集成电路的功耗密度急剧上升, 相较于传统二维加工工艺, 面临着散热问题^[9-10]。此外, 加工过程中的填充不完全, 还易产生空洞问题, 导致通孔深度一致性差, 影响器件的电学性能^[11]。在加工过程中, 对 TSV 技术穿孔深度的精确把握, 有利于提高三维集成电路加工工艺, 改善空洞、缝隙、填充缺失等问题。

2 高深宽比微结构深度测量手段

常用的高深宽比微结构深度测量手段可根据是否基于光学检测原理分为光学测量手段和非光学测量手段, 具体分类如图 1 所示。非光学测量手段包括扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 测量法和扫描探针法; 光学测量法包括白光显微干涉技术测量法、共焦显微技术测量法和反射光谱技术测量法。非光学测量手段研究发展时间长, 测量手段较为完备, 具有测量精度高、可直接观测等优点, 但往往需要对待测样品进行破坏性处理, 并因此导致测量速度慢, 测量过程繁琐。光学测量手段具有非接触、成本较低等优点, 可实现样品深度的快速测量, 符合当前工业领域测量需求, 发展潜力巨大。

2.1 非光学测量手段

1) 扫描电子显微镜测量法

扫描电子显微镜一般由真空系统、电子束系统和成像系统组成, 其基本原理: 利用聚焦的电子束扫描待测样品表面, 由于碰撞, 在样品表面产生次级电子, 次级电子经过光电倍增管以及放大器转换成与荧光屏电子束强度有关的电信号, 经过次级电子探测器等将电信号对应的图像进行

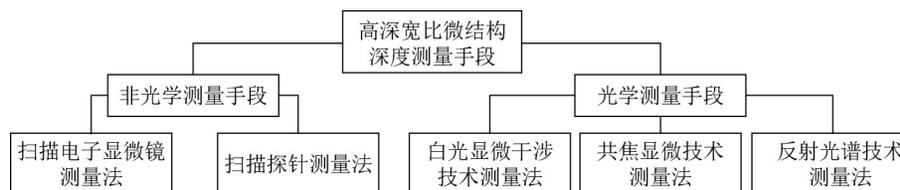


图1 高深宽比微结构深度测量手段

Fig.1 High aspect ratio microstructure depth measurement methods

呈现,从而实现对待测样品表面形貌信息的观测、获取。扫描电子显微镜现被广泛应用于三维结构信息的测量,扫描电子显微镜测量法是利用扫描电子显微镜对微结构深度进行测量的非光学测量手段。扫描电子显微镜具有景深大、视场大的特点,可实现对待测样品三维结构物理信息的获取,并能对待测样品表面凹凸信息进行准确表现;此外,放大倍率可调范围大,最大放大倍率可至20万倍,可实现对显微区域的观察分析^[12]。扫描电子显微镜测量法发展时间长,深度测量过程完备,测量分辨力高(可达1 nm)。当前,测量和控制高深宽比微结构均匀性的标准技术是对样品的剖面试样进行SEM分析。

目前,日本的捷欧路公司(JEOL)、美国的赛默飞世尔公司(Thermo Fisher Scientific)和德国的蔡司公司(Zeiss)是SEM领域的知名企业,这些公司旗下的扫描电子显微镜可达到较大的放大倍数和分辨力,并具有丰富的测量功能。赛默飞世尔公司旗下的Verios5 XHR扫描电子显微镜利用亚纳米分辨力和高材料对比度,精确SEM进行纳米材料表征,分辨力可在0.6 nm至1 nm进行调节;捷欧路公司旗下的JSM-IT510扫描电子显微镜最大放大倍率可以达到30万倍,分辨力可以达到3 nm,并能够实现光学图像与SEM图像之间的实时转换,方便使用者在测量微结构深度时的实时观测;蔡司公司将高分辨力场发射扫描电镜与聚焦离子束进行了结合,使仪器具有出色的成像和分析性能,在微结构深度测量时,可实现三维重构分析,其分辨力可达到0.6 nm。

利用扫描电子显微镜对高深宽比微结构深度进行测量避免了光学类方法对于样品光学模型的依赖,测量过程更为直观,测量精度高,是一种可靠的测量手段。但是由于利用SEM进行样品表面信息获取时,需要将电子束打在样品表面,因

此在测量深度时,需要将待测样品沿沟槽方向进行剖切。由于SEM需要在测量前对待测样品进行处理,操作也更为复杂与耗时,使得其难以在工业场景,尤其是在线检测场景下应用。另外,SEM采样非常有限,进行测量不可重复且成本高昂,测量结果更适合作为高精度的基准来辅助光学类的测量方法。

2) 扫描探针法

扫描探针法通过利用探针与待测样品表面接触进行扫描,实现待测样品表面信息的获取,扫描探针法通常可利用原子力显微镜、触针式轮廓仪等仪器实现测量。在测量微结构深度时,通常增加纵向位移台对待测样品的三维信息进行重构。

原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)是基于原子间作用力进行工作的一种三维形貌表征手段,在横向和纵向均有很高的分辨力,横向分辨力可以达到0.1 nm,纵向分辨力可以达到0.01 nm^[13]。其工作模式可以分为接触模式、非接触模式和轻敲模式,其中,非接触模式避免了探针与待测样品之间的接触,对探头和样品表面进行了保护,不会损伤样品。非接触模式的工作原理:将探头置于样品上方一定位置,对待测样品进行扫描,通过控制探头原子与待测样品表面原子间的范德华力恒定,使带针尖的悬臂产生垂直于样品表面的上下运动。利用光学检测法可以获得悬臂对应于扫描各点的位置变化,从而实现待测样品表面形貌信息的获取。原子力显微镜与纵向位移台搭配使用,可实现待测微结构多层二维信息拼接,从而实现深度测量。虽然该方法具有较高的分辨力,且待测样品可以是导体或非导体,但由于测量过程中使用到的探头需要进入微结构内部进行测量,因此探头的直径大小对微结构的开口宽度进行了限制^[14];此外,待测样品的扫描时间较长,测试效率低,不适合在线检测。

触针式轮廓仪是一种机械探针测量仪，其基本原理是通过探针与待测样品表面接触，由探针上下运动获得样品表面结构信息。通过给二维接触式轮廓仪加纵向位移装置，实现三维形貌的测量^[15]。目前，英国泰勒霍普森（Taylor Hobson）公司旗下的Form Talysurf PGI NOVUS轮廓仪可以实现纵向量程20 mm，分辨力可以达到0.2 nm；德国布鲁克（Bruker）公司旗下的接触式轮廓仪Dektak XTL具有更高的分辨力，能够达到0.1 nm，但它在垂直方向的测量范围只有1 mm；美国KLA公司旗下产品Alpha-Step D-500探针式轮廓仪可以

实现几纳米至1200 μm的二维台阶高度测量，Alpha-Step D-600探针式轮廓仪在此基础上进行了改进，可以实现三维结构的深度测量。虽然使用该方法进行深度测量具有精度高、重复性好的优点，但该方法具有的缺点也较为明显：由于探头与样品的接触，会对样品和探头同时造成损伤，探头的磨损导致测量精度降低；由于测量深度需要将探头深入结构中进行测量，因此探头大小对结构开口线宽进行了限制，其能够测量的微结构的深宽比较小。非光学测量方法对高深宽比微沟槽的深度测量效果如图2所示。

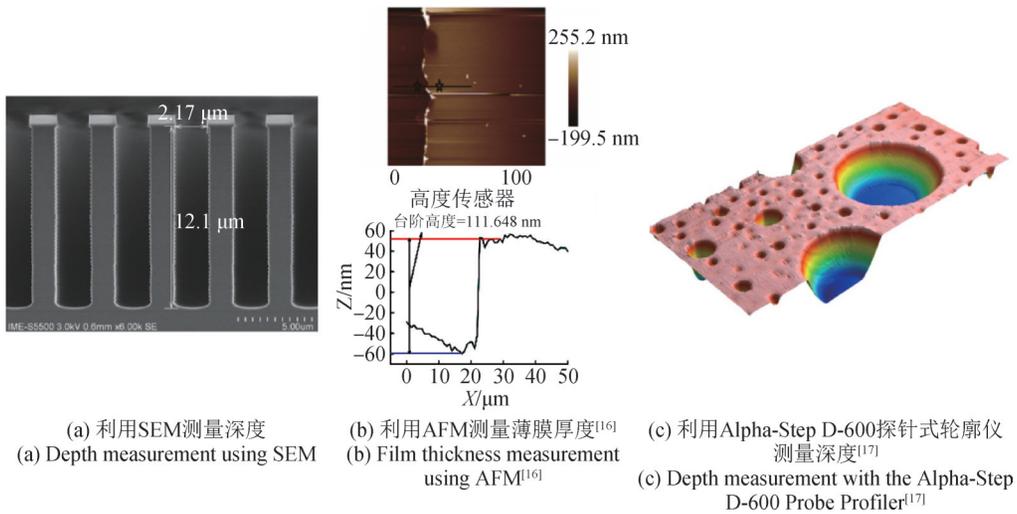


图2 非光学测量手段深度测量效果图^[16-17]

Fig.2 Depth measurement effect of non-optical measuring means^[16-17]

2.2 光学测量手段

1) 白光显微干涉技术测量法

白光显微干涉技术测量法利用白光干涉产生干涉条纹，由于零级条纹处各个波段的光程差均为零，因此零级条纹处光强最强，可作为深度测量的一个参考点。其测量的基本原理：白光光源经分光镜后形成两束光线，一束光线射向参考面，一束光线射向测量面，当参考面至分束镜的距离等于测量面至分束镜的距离时，从参考面与测量面反射回的光将在分束镜上方产生干涉条纹。沿着干涉物镜轴向移动样品台，通过图像采集系统记录相应扫描位置处的干涉图像，从而确定相干光在样品表面不同位置处的零光程差位置，根据零光程差位置与高度间的对应关系，结合三维表面形貌重建算法实现对微结构的形貌表征。其光路图如图3所示。此测量法可以分为白光扫描干涉

测量法和白光干涉光谱法两种，白光干涉光谱法是在白光扫描干涉测量法的基础上发展而来的。

在实际加工过程中，由于微结构底部形貌结构影响加工质量，且实际加工出来的微结构表面

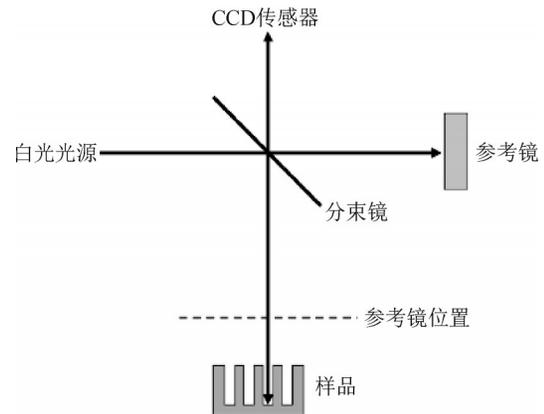


图3 白光显微干涉技术原理图^[18]

Fig.3 Principle diagram of white light microscopic interferometry^[18]

带有氧化膜结构, 因此在实际测量时, 不仅需要满足微结构深度测量的要求, 还需要对底部形貌结构进行重构, 对薄膜厚度进行求解。Changhong Hyun 等人在白光扫描干涉测量法的基础上, 利用横截面法、轮廓分析法、层析图像分析法和二维高斯拟合法等四种不同的方法对微结构底部的边界尺寸进行了测量^[19]。在使用横截面法时, 从孔底部的特定高度截取横截面, 通常为深度的5%到10%, 将横截面提取图进行边缘检测并对其进行二值化、最小二乘圆拟合确定孔的直径, 横截面提取和轮廓提取如图4(a)和4(b)所示; 轮廓分析法使用三维表面数据对轮廓信息进行复原, 其中, 图4(c)展示了从孔中心周围的每个角度的数据中提取轮廓, 4(d)展示了测试结果; 层析图像分析方法是利用白光扫描干涉测量法进行三维测量的垂直扫描, 通过三维物镜从摄像机的CCD捕获的图像的每个像素的聚焦图像数据重建该层析图像, 效果图如图4(e)所示, 再进一步采用图像算法进行轮廓提取, 如图4(f)所示; 由于光线的衰减, 可能会对三维数据产生噪声影响, 使边缘模糊, 重复性变差, 为此, 将孔底部的层析图像转换为三维表面数据, 其中每个像素的强度显示为高度, 如图4(g)所示。转换后的三维曲面形状类似于二

维高斯曲线, 因此选择二维高斯拟合进行建模, 图4(h)显示了直径测量结果。

薛晨阳等人利用白光扫描干涉测量法对MEMS槽深度进行了测量, 实现了对深度为89.78 μm, 深宽比为4:1硅栅沟槽的测量, 并对槽的三维形貌进行了复原^[20]。由微系统分析仪、显微扫描振动仪、面内运动分析仪组成的三维形貌测试仪利用白光干涉实现了对表面光滑或粗糙的微结构几何尺寸的测量, 其测量的理论最大深度可以达到250 μm, 但由于在实际测量过程中, 光线难以完全到达底部, 因此实测深度为97.42 μm。此外, 该课题组通过将样品倾斜一定角度的方法, 实现了三维形貌的重构, 但由于沟槽结构开口大小对光线进入底部光强的限制, 当线宽小于5 μm时, 底部光强较弱, 因此无法实现三维形貌的重构。

在利用白光扫描干涉测量法测量微结构深度的过程中, 进入微结构内部光强的大小对深度测量结果的准确性具有直接影响。此外, 底部光强的大小也影响着底部形貌信息的获取, 从而影响微结构三维形貌的重构。针对光线进入微结构内部困难的问题, 目前存在改善光学系统结构或改变测量光源两种解决思路。Taeyong Jo所在课题组在光学系统结构改进方面的研究有突破性进展^[18]。

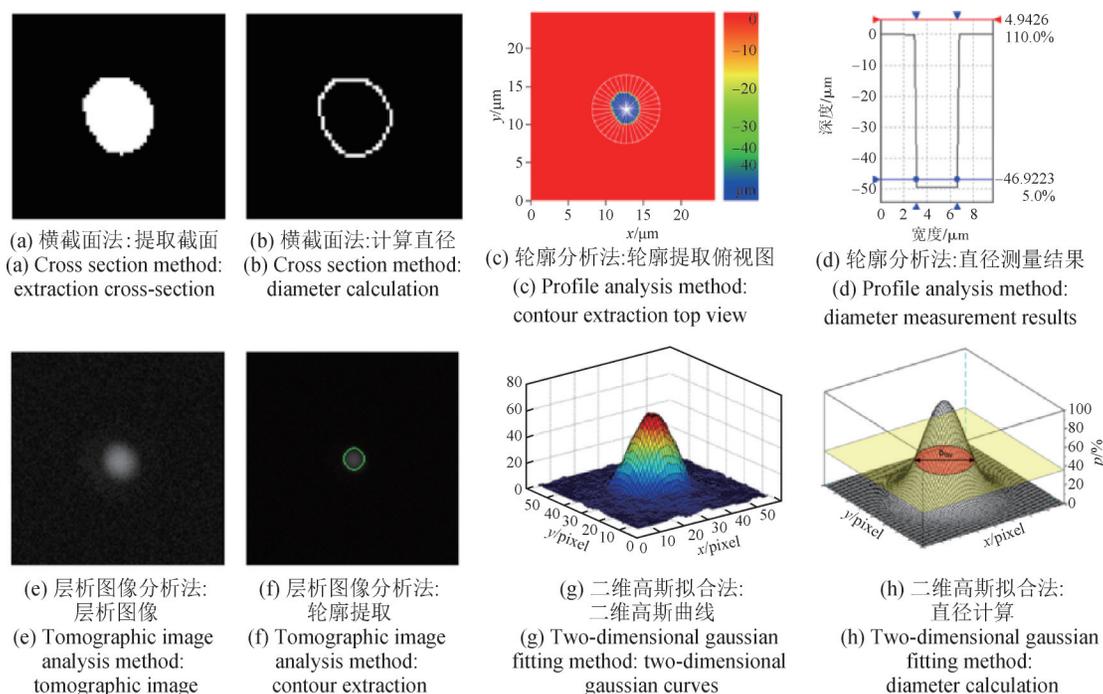
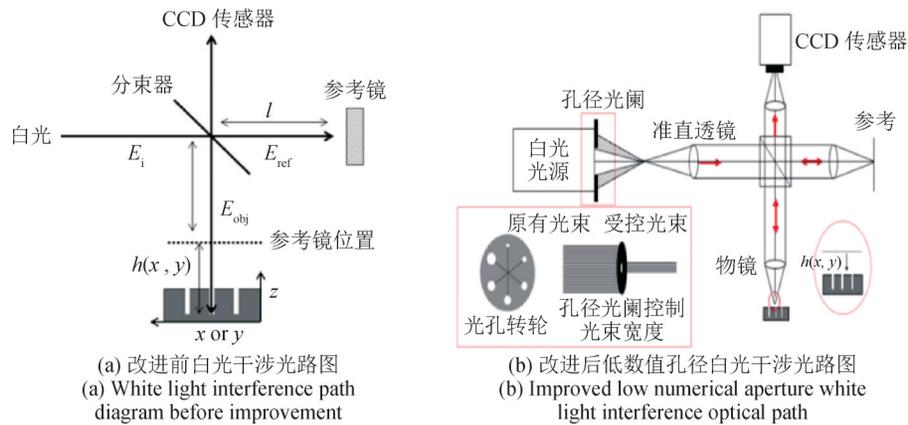


图4 四种截面直径测量方法对比^[20]

Fig.4 Comparison of four section diameter measurement methods^[20]

图5 白光干涉测量光路改进前后对比^[18]Fig.5 Comparison of white light interferometry optical paths before and after improvement^[18]

该课题组对光学系统结构进行了改进, 通过使用光圈改变物体与参考镜之间的光强平衡, 有效地增强了干涉信号, 提高了系统的测量能力, 提高了测量效率, 实现了5 s内对深度为42.7 μm 、宽度为4.27 μm 、深宽比为11.2的硅通孔结构的深度测量。改进前和改进后的光路如图5所示。通过光圈, 改变光学系统的数值孔径, 使用低数值孔径光路, 改变光强能量分布, 增加进入孔底部的光强。该课题组通过加入光圈不仅提高了系统对深度的测量能力, 能够测量更大深宽比的微结构, 且提高了微结构三维形貌重构的成功率。但是, 当降低数值孔径时, 会造成空间分辨力的衰减, 因此为了兼顾深度测量和空间分辨力, 在实际测量时应寻找深度对应的最佳孔径数值。

Jonghan Jin等人提出基于光谱分析法的红外飞秒脉冲激光测量法^[21]。由于硅的微观结构在红外光束照射下可认为是透明的, 因此红外光束可以穿透整个器件至分界面发生干涉, 从而实现三维形貌测量。研究者实现了平均深度为144.86 μm 、深宽比大于7的微结构的深度测量, 标准偏差控制在0.03 μm , 且实现了微结构三维轮廓的构建。

白光扫描干涉法可以实现对薄膜的测量, 能够实现三维形貌的重构, 并且可以一次性获得上下表面信息、深度等信息, 但为了获得更清晰的干涉条纹, 提高系统测量精度, 光学系统会变得更加复杂。此外, 在测量时需要对待测样品进行扫描, 测量时间长, 易受到外界干扰。针对该方法的以上缺点, 天津大学章英等人将白光扫描干涉法与单色光相移干涉术进行了结合, 创建了新

方法, 白光干涉光谱法^[15]。单色光相移干涉术利用相位提取方法对参考光和被测表面反射光发生的干涉光束进行相位提取, 并对提取到的相位进行展开, 得到连续相位, 寻找相位与深度之间的对应关系, 从而实现待测样品表面形貌几何参数的测量。虽然该技术具有测量速度快、精确度高的优点, 但由于使用的是单色光源, 因此相干长度过长, 在光学器件前后表面可能产生干涉条纹影响测量结果, 且单色光干涉时, 不会产生高亮度零级条纹, 无绝对测量的参考点。白光干涉光谱法结合了这两种方法精度与速度的优点, 基于频域干涉理论, 对采集到的干涉光谱进行相位分析, 不仅实现了测量效率的提高, 也降低了环境对测量结果的影响。在利用白光干涉光谱法进行测量时, 由传统的对光程差分析转变为了对频域相位分析, 该方法利用相位提取以及相位展开的算法对微结构的深度进行了测量。在进行相位提取时, 可以利用希尔伯特变换法、傅里叶变换法、小波变换法和时间相移法等方法。

白光扫描干涉法拥有较高的纵向分辨力, 测量范围大, 但需要参考光路, 光学结构较为复杂; 此外需要对待测样品进行扫描测量, 因此存在测量时间长, 测量结果易受到环境影响的弊端。在此基础上, 将白光干涉与光谱分析方法相结合, 不仅提高了检测效率, 也在一定程度上提高了测量精确度, 是未来白光显微干涉技术测量法的发展新思路。目前白光显微干涉技术测量法存在的微结构底部接收光照强度的问题, 也是未来该方法需要解决的核心问题。

2) 共焦显微技术测量法

共焦显微技术测量法是另一种常见的深度测量方法,通常基于共聚焦扫描光学显微镜对微结构进行三维结构复原并进行深度测量。共聚焦扫描光学显微镜是在共焦成像技术的基础上,利用扫描的方式对物体进行层析,从而获得层析图像,实现对三维信息提取复原^[22]。其具有高分辨力、高灵敏度、较大放大倍数以及高信噪比等优点,在相同的物镜条件下,其分辨力可达到光学成像的1.4倍。共聚焦扫描光学显微镜通常由入射光路、扫描光路和探测光路三部分组成,在光路中,调节入射光源、待测样品表面和探测器前小孔的位置,使三者之间互成共轭关系。入射光源发出的光经物镜聚焦至被测物表面,反射光经系统光路改变方向后通过小孔聚焦到探测器。当被测物位于准焦平面时,探测器接收的光强最大,当被测物处于离焦位置时,探测器端为弥散光斑,光强迅速衰减,因此具有轴向层析能力。结合横向扫描可实现对被测物的三维形貌测量。其光学原理如图6所示。

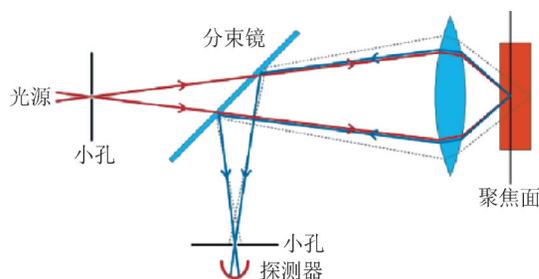


图6 共聚焦扫描光学显微镜光路原理图^[23]

Fig.6 Schematic diagram of optical path of confocal scanning optical microscope^[23]

常见的共聚焦显微镜包括:共聚焦荧光扫描显微镜、共聚焦扫描光纤显微镜、共聚焦彩色激光显微镜和共聚焦光栅光学显微镜。其中共聚焦扫描光纤显微镜将光纤技术与共聚焦技术进行了结合,大大减小了测量系统的体积,使测量系统便携化。且光纤简化了光路系统,减少了光损失,可实现小于 $1\ \mu\text{m}$ 光斑的精细光学测量。传统的共聚焦扫描光学显微镜可实现亚纳米分辨力的三维形状分析,并对深度范围为 $10\ \text{nm}$ 至 $100\ \mu\text{m}$ 的微结构进行测量。在此基础上发展而来的差分共聚焦扫描光学显微镜可以提高系统的分辨力,实现更高精度的测量,以及对微结构进行更真实地重构。

Ravi Kiran Attota 等人对差分共聚焦扫描光学显微镜展开了研究,并分别对照明数值孔径、焦距大小、相机像素大小和测量光波长等影响显微镜测量性能的参数进行了探究,实现该系统的深度测量最佳性能^[24]。研究表明,照明数值孔径对共聚焦深度测量系统灵敏度具有重要影响,且灵敏度和照明数值孔径为负相关关系。当照明数值孔径降低时会增加光学相干性,导致干涉或衍射信号在获得的图像中水平和垂直方向进行延伸,从而可以获得更多的光学信息;一般情况下,测量光的波长和系统测量的灵敏度具有负相关的关系,但在实际系统分析中应考虑系统中光学特性、穿透深度、波长之间的关系,从而确定波长对测量系统灵敏度的影响;系统焦距大小也对灵敏度有一定影响,应当在可接受的灵敏度范围内,尽量使用大焦距。该课题组的研究为共聚焦深度测量提供了新的方向,提出了可能存在的影响因素,并对影响因素的影响大小进行了验证,为之后的发展提供了指导作用。该课题组在研究差分共聚焦扫描光学显微镜的基础上,建立了包含高深宽比微结构横截面轮廓对应的差分信息的数据库,通过利用该数据库实现了自动化形状测量的功能^[25]。在测量过程中,未涉及光学系统操作,实现了自动化,方便了操作,简化了过程。

对共聚焦显微镜运动轨迹及畸变等信息的研究对最终的测量结果准确性具有重要的影响,哈尔滨工业大学由小玉等人对光学共聚焦显微镜的振镜扫描策略进行了研究,建立了检流式振镜系统控制模型,提出了圆周式扫描的新思路^[25]。由于共聚焦显微镜实现的是点对点的测量,若想要获得二维层面信息或三维结构信息,则需要对样品进行扫描测量。传统的共聚焦显微镜的扫描形式是光栅式扫描,由于该扫描方式采取的是锯齿波进行运动控制,因此会产生扫描时速度的突变,导致对样品和振镜的冲击,且扫描速度较难提升。此外,该扫描方式运动轨迹为方形,与光学系统的圆形视场产生冲突,导致观测和测量时区域利用不充分。该课题组利用正弦波和余弦波分别控制振镜 X 轴和 Y 轴的运动轨迹,从而实现圆周扫描。新的扫描方式将视场扩大了 57% ,速度提高了 9% ,更关键的是在扫描过程中,振镜速度不会

产生突变,提高了系统的稳定性。由于测量过程中畸变会影响成像几何位置精度,导致最后深度测量精度下降,该课题组对检流式振镜系统的扫描畸变进行了分析。针对该系统中由于振镜偏转角度与扫描视场映射关系非线性以及振镜安装偏差等引起的枕形畸变,该课题组对产生原因、原理进行了分析。利用改良后的共聚焦显微镜对微结构中的台阶形状样品进行深度测量,其测量深度可达到500 nm,与标称值的误差控制在1 nm内。

针对影响共聚焦测量法的测量条件,郭继平等人进行了相关的探究,其探究结果对提高共聚焦技术法测量深度精度具有重要的指导意义^[26]。由于共聚焦技术属于光学非接触测量法的一种,因此在测量时会受到测量光照条件、视场大小以及分辨力等因素的影响,该课题组分别从以上几个方面对测量条件对测量精度的影响进行了探究。结果表明,当测量目的不同时,应采用不同类型、不同光照强度的光源,比如在测量台阶结构深度时,用共轴光源照明可得到较为理想的结果,而当对结构的角进行测量时,则应该使用环形光源进行照明。此外,在测量过程中也应当注意视场和分辨力的大小,视场过小可能导致测得的微结构整体形貌信息不完全,分辨力过低会导致微结构形貌信息细节被忽略,分辨力过高则会导致数据量较大,处理时间较长。该课题组的研究成果不仅可以为共聚焦测量法提供技术指导,而且对应用其他光学非接触法进行测量也具有一定的指导意义。

虽然共焦显微技术测量法具有测量精度高,对微结构三维重构效果好等优点,但该方法的测量极限主要依赖于所使用的共聚焦扫描光学显微镜的性能,对共聚焦扫描光学显微镜性能的提升是该方法发展的一个主要方向。改进过程中,可以根据待测样品的深度、宽度等信息,选择合适的焦距、视场、数值孔径等关键参数。此外,由于光学结构以及表征高深宽比微结构尺度较小等因素,该方法更适合测量深度在几微米以下的微结构,测量过程中,可以通过改变扫描策略等方式,使视场扩大,从而实现更大深度范围的测量。

3) 反射光谱技术测量法

反射光谱技术测量法是利用反射回的光束干

涉进行深度测量的一种非接触测量方法,其光学结构相对简单,且无需进行扫描处理,测量时间短、测量稳定性较强。该方法的原理是,将光束照射在样品上,会产生从上表面反射回来的光束,和从微结构上表面反射回来的光束,共两束光,这两束光将产生干涉信号,对该反射的干涉信号进行处理分析,寻找光学信息与沟槽深度信息之间的映射关系,从而求解沟槽深度。图7是一种典型的垂直入射式反射光谱测量系统原理图,自测量光源发出的光被分束器反射至待测样品表面,反射光经分束器透射后由光纤汇聚进入光谱仪。

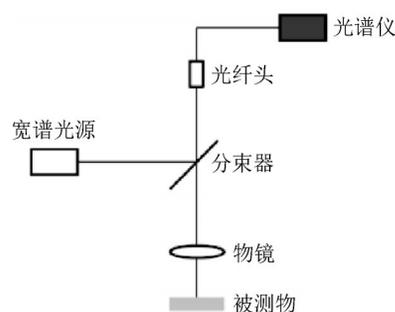


图7 垂直入射式反射光谱测量系统原理图

Fig.7 Schematic diagram of vertical incidence reflectance spectrometry system

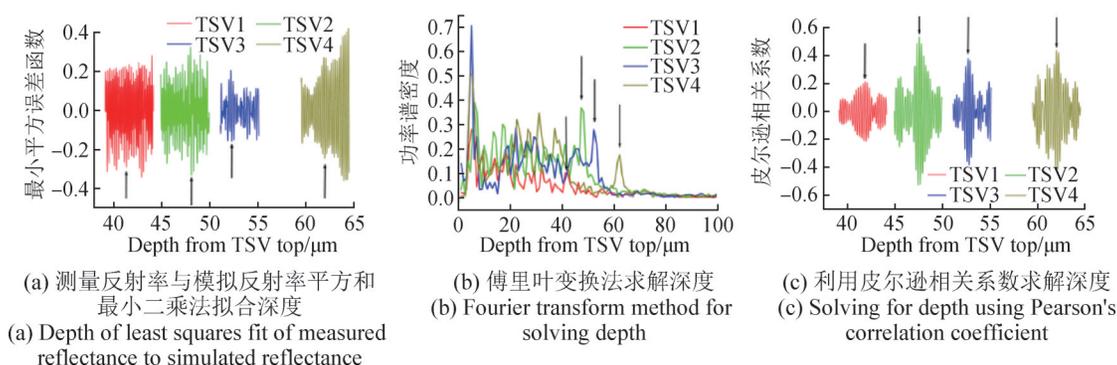
目前,对反射光谱进行处理获得深度的方法主要有三种:利用测量反射率与模拟反射率之间的平方和最小二乘拟合出深度值,利用傅里叶变换对反射光谱进行处理获得深度值,以及利用反射测量与拟合测量之间的皮尔逊相关系数进行深度解算^[27]。分别利用三种算法对表1中所列硅通孔进行深度测量实验,得到的结果如图8所示。

表1 验证光谱解算算法所用样品^[27]

Tab.1 Samples used for validation of spectral solution algorithm^[27]

序号	顶部直径/ μm	底部直径/ μm	深度/ μm
1	2.53	2.62	41.6
2	3.21	3.12	48.4
3	3.67	4.77	53.9
4	6.23	6.82	61.9

可以发现,当微结构具有较小的横向尺寸时(直径小于 $4\ \mu\text{m}$),受到相干长度较小以及微结构的反射模型欠缺的影响,利用测量反射率与模拟

图8 三种深度解算算法对比^[27]Fig.8 Comparison of three depth solving algorithms^[27]

反射率之间的平方和最小二乘拟合出深度值的方法具有一定的不准确性，不能测量微结构的深度。利用离散傅里叶求解深度具有高灵敏度，其深度分辨率可提升至 $1\ \mu\text{m}$ ，求解速度快、鲁棒性强，且可以得到深度对应的唯一解；但当沟槽深度较小时，由于受到频率分辨率限制，以及氧化膜内光反射的影响，不能准确提取深度对应的精确频率。在使用皮尔逊相关系数求解深度的过程中，可能会遇到薄膜内反射光强度对相关系数的计算产生干扰，导致深度结果不准确的情况。综上所述，三种解算算法均具有一些局限性，除此之外，这三种方法具有相同的待解决难题，即如何从畸变的干涉光信号求出唯一的通孔深度解。

针对利用离散傅里叶变换处理反射光谱，快速得到微结构深度的方法，Yi-Sha Ku 所在的课题组重点进行了探究。该课题组通过使用快速傅里叶变换算法实现了一次光谱采集同时测量薄膜厚度和微结构深度的功能，实现了最大深度至 $25\ \mu\text{m}$ 、深宽比为 10 的微结构测量，并能保证误差控制在 $\pm 0.6\ \mu\text{m}$ 内^[28-29]。由于在使用快速傅里叶变换对深度进行求解时，频率分辨率对深度测量的准确度进行了限制，该课题组探究了光谱仪光谱范围与深度分辨率之间的关系，并证明了当光谱仪具有越宽的光谱范围时，其对应的频率分辨率越高，测量的深度分辨率越高，因此在实验条件允许的范围内，选择具有宽光谱的光谱仪。在利用快速傅里叶变换对反射的干涉光进行解算时，信号的干涉强度决定了解算深度的准确度。由于干涉信号的光强理论表达式可知，当发生干涉的两束光光强相等时，干涉强度最强。因此，可以对

光学系统进行改进，设计可调节照明面积比例的装置，从而实现照射到微结构表面与微结构内部光强的比例调节，大大提升干涉信号的强度，提高系统的深度测量能力。

在利用离散傅里叶变换处理反射光谱的理论基础上，天津大学武飞宇等人对其进行了更系统地研究，不仅设计出用户操作界面，还实现了最大深宽比以及最大深度的突破^[30]。为了实现较高的横向分辨率以及提高系统的测量能力，该课题组采用了垂直入射光路，并将反射式显微成像光路结构与微区域反射光谱光路结构集成于一体。为了增强底部反射光强，提高反射光的干涉性，该课题组分别从硬件设计和软件设计两部分进行了改进和完善。在硬件方面，通过利用针孔和光阑组成空间滤波结构，针孔可调节照射光斑大小，调控从基底反射回的光和孔槽底部反射回的光的比例，提高干涉强度，光阑器件可调控入射光斑的能量分布，使中间照射进沟槽底部的光强比例提高，提高从沟槽底部反射回的能量比例，从而实现底部弱信号增强。图 9 展示了 $125\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 针孔对测量结果的影响，结果表明 $125\ \mu\text{m}$ 针孔信噪比更好。图 10 展示了光阑对入射光强分布的影响，在实际测量中，选择合适大小的光阑以提高中心区域的能量分布强度。在软件设计方面，该课题组进行了中值滤波处理，并在离散傅里叶变换得到初始深度之后进行了拟合处理，提高了得到结果精度，在拟合过程中，加入了波段选择功能，进一步的提高了测量深度结果精度。在测量能力方面，该课题组能够测量的微结构深宽比突破 55，最大深度突破 $200\ \mu\text{m}$ ，目前测量能力在该领域内较为突出。

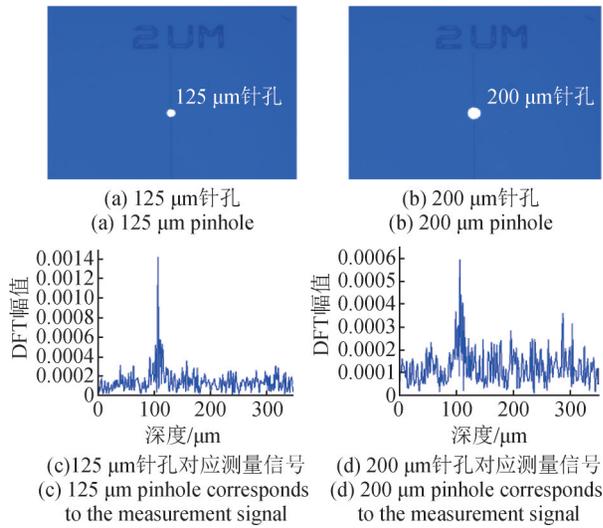


图9 针孔大小对测量深度影响^[30]

Fig.9 Effect of pinhole size on measurement depth^[30]

在利用反射光谱解算深度时，沟槽底部形状影响入射光线的反射比例，进而影响深度计算的准确度，因此准确获得底部形貌对计算沟槽深度具有重要影响。Yi-Sha Ku 通过建立半扁球体模型并利用反射率调制算法，实现了根据反射光谱提取底部轮廓，并可以判断底部加工质量^[31]。通过引入有效光照半径的概念，利用反射光照强度以及椭圆定义式对底部轮廓的特征尺寸进行了拟合。图 11(a)是针对底部为半扁球体，粗糙度为 65 nm 的 TSV 的反射光强进行模拟，可以发现，根据计算得到的几何特征参数对光强的拟合与实际光强保持一致；图 11(b)是用 SEM 拍摄的实际结构，可以发现底部轮廓拟合较好。但是该模型具有一定

的局限性，由于该模型是建立在加工微沟槽时，会产生弧形底部的假设基础上，因此该模型以及算法适用于底部是弧形且接近于椭圆形状的情况，对于底部是锥形等情况还不适用，应用范围受到限制。

微结构侧壁的加工质量、粗糙度对器件的性能具有重要影响；此外，在利用反射光谱法测量深度时，从微结构底部反射回的光含有深度信息，因此对进入微结构底部的光有多少进行反射具有重要的研究意义，微结构内壁的加工质量直接决定了反射光所占比例。当加工质量较差时，侧壁会出现凹凸不平的扇形结构，相应的粗糙度较大，入射光大部分发生散射，具有深度信息的反射光能量较低，不利于后续解算过程。此外，当扇形结构的纵向距离较大时，会导致 MEMS 设备可靠性降低，造成电流泄露或设备响应速度降低等影响。因此对微结构侧壁加工质量和粗糙度的测量具有重要意义。针对表面粗糙度，H. E. Bennett 等人通过理论推导和实验验证，证明了当入射光的波长远大于粗糙度时，入射光从粗糙表面反射由于表面粗糙度导致的镜面反射率的降低是表面不规则度均方根高度的函数^[32]，如式(1)所示。

$$R_s = R_0 \exp[-(4\sigma\pi)^2/\lambda^2] \quad (1)$$

式中： σ 为表面与平均表面水平的均方根偏差； R_s 为粗糙表面的镜面反射比； R_0 为相同材料的完全光滑表面的镜面反射比。

结合理想状态下的反射光强公式，可根据反射光谱理论进行建模。Yi-Sha Ku 等人根据该原理

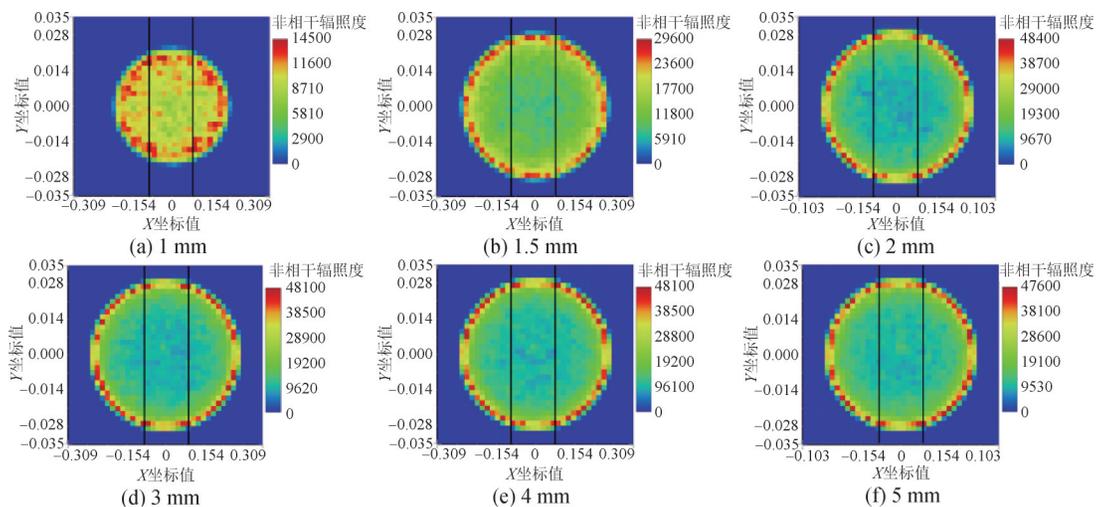
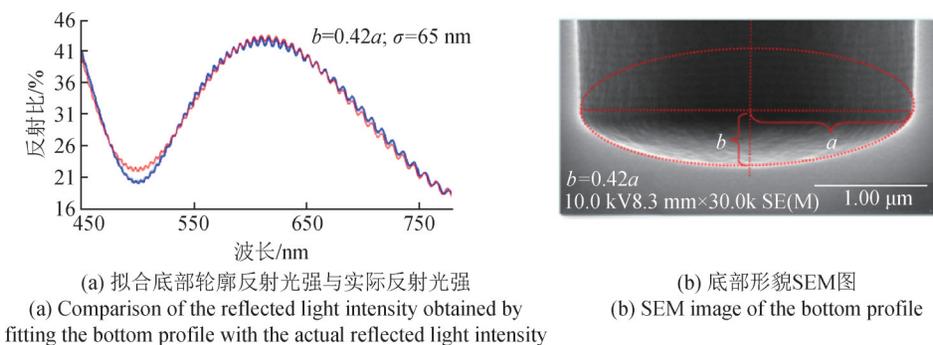


图10 光阑对光强分布影响^[30]

Fig.10 Effect of diaphragm on light intensity distribution^[30]



(a) 拟合底部轮廓反射光强与实际反射光强
(a) Comparison of the reflected light intensity obtained by fitting the bottom profile with the actual reflected light intensity
(b) 底部形貌SEM图
(b) SEM image of the bottom profile

图 11 底部轮廓拟合效果对比图^[31]

Fig.11 Comparison of the bottom profile fitting effect^[31]

建立了散射模型实现了对底部粗糙度的求解，并推导出入射光波长与表面散射率之间的关系，即当入射波长越短时，散射率越高。在该散射模型中，可根据反射光谱计算反射率，再通过修改后的反射强度公式计算微结构的底部粗糙度。图 12 为 50 μm 通孔深度和 5 μm 通孔直径下，表面粗糙度为 0~100 nm 的光强仿真。可以发现，光强随着粗糙度的增加而衰减，在较短波长下效果更加明显。当表面粗糙度超过 100 nm 时，光谱振荡在较短的波长范围内被缓和减弱^[28]。

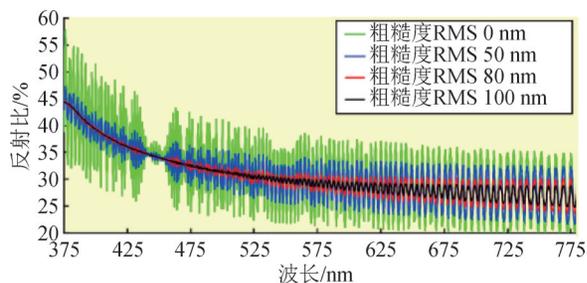


图 12 表面粗糙度为 0~100 nm 的光强仿真^[28]

Fig.12 Light intensity simulation for surface roughness of 0 to 100 nm^[28]

当沟槽深度接近于入射光波长时，入射光可能发生衍射现象，因此需要利用严格耦合波对反射光谱进行分析。O. Fursenko 等人在利用反射光谱测量深度的基础上，结合严格耦合波分析对微结构加工后的侧壁质量进行了分析。通过对反射回的干涉光谱分析，在光谱中存在着高频振荡和低频振荡。高频振荡是由于微结构底部和顶部反射光发生干涉所产生的；微结构的侧壁由于加工工艺产生了凹凸不平的扇形部分，光线照射在这部分时发生衍射效应，衍射光与顶部的反射光发生了干涉引起低频振荡。接着该课题组确定了

反射低频振荡与扇形部分尺寸之间的转换关系，从而可以根据低频振荡的最大值波长位置提取扇形部分的周期信息，利用低频峰值的高度值评估扇形位置的纵向最大位置^[27, 33]。

在使用反射光谱测量法进行深度测量时，应保证尽可能多的光进入微结构的内部，因此当入射光是平行光时效果最好。针对增强进入结构中的光强问题，Hsiang-Chun Wei, Chun-Wei Lo 等人对光学结构进行了改进。通过简化光学系统的结构，减少了光在传播过程中的能量损失，使尽可能多的光进入微结构内部^[34]。此外，该课题组在光学系统中加入了照相机系统，便于测量者实时观察测量位置；并通过改善系统，消除了光学衍射对测量结果的影响；通过使用可变焦距的测量光源，补偿了待测样品表面不平带来的测量准确度。通过改进，该装置可以实现小到 5 μm 开口直径以及大于横宽比 15:1 的 TSV，并将测量误差保证在 ±0.03 μm 内，并且可以同时测量深度、宽度以及薄膜厚度等信息。其系统示意图如图 13(a) 所示，光束通过准直透镜，然后从第一个分束器反射到物镜以聚焦在样品上，其反射光被第二个分束器分离为两束。一束光通过摄像机成像，另一束光通过光纤入射，光纤将宽带光收集到光谱仪，以分析反射光谱。图 13(b) 展示了实际系统搭建，可以看出，其优点在于所用光学元件更少，系统紧凑，并使传输的光强更高。该装置能够达到的具体指标如表 2 所示。将装置中测量光源设置为波长从 400 nm 至 850 nm 的卤素可见光光源，使用 2.2 μm/pixel 的图像传感器和 4 倍放大的物镜对直径为 5.0 μm、深度为 80.1 μm 的 TSV 样品进行测量。测量结果如图 13(c)~13(e) 所示，其中孔径测

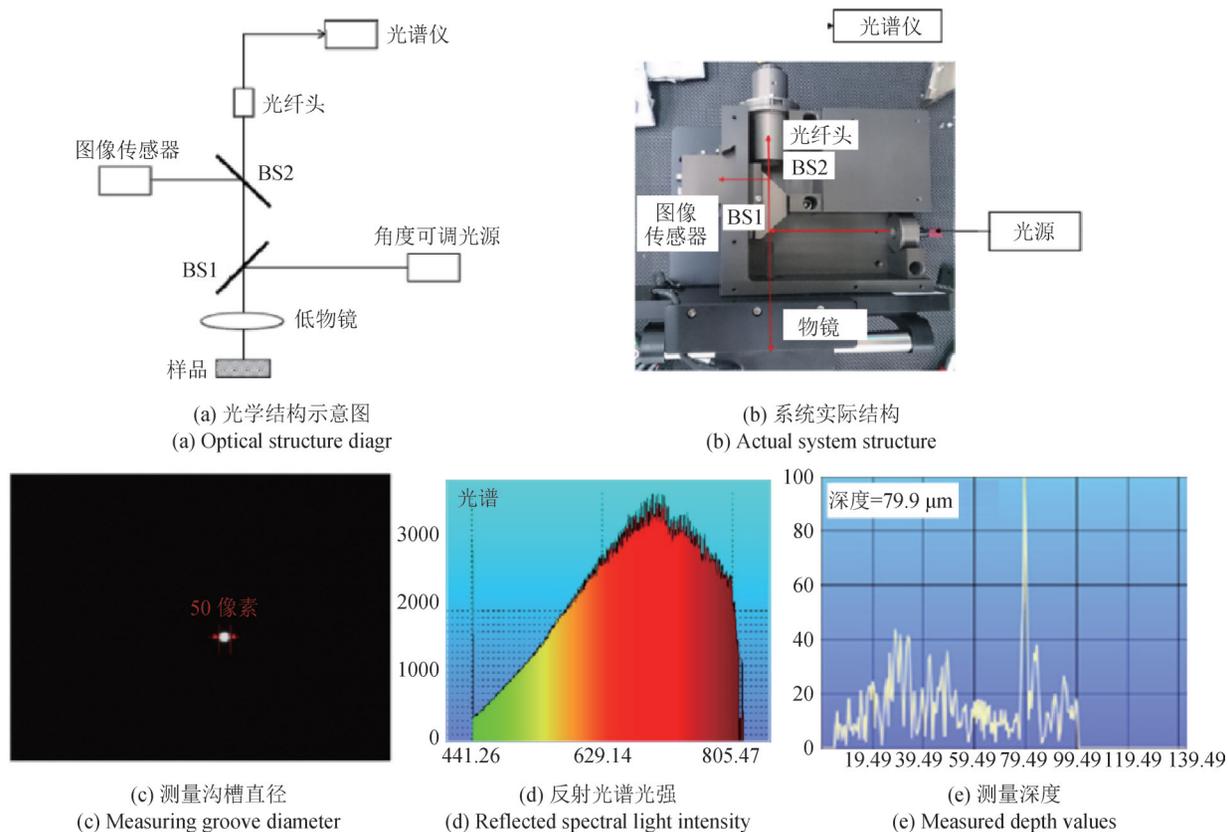


图 13 改进装置示意图、实际图以及测量数据^[34]

Fig.13 Schematic diagram, physical picture and measurement data of the improved device^[34]

表 2 装置能达到的指标^[34]

Tab.2 Indicators achieved by the system^[34]

名称	指标
入射光源波段	450 ~ 800 nm
测量速度	< 200 ms
测量沟槽深度	< 50 μm
测量深度准确度	< 0.05 μm
薄膜测量范围	0.1 ~ 100 μm
薄膜准确度	< 2 nm
测量孔径范围	5 ~ 500 μm
测量孔径准确度	< 5 μm

量结果为 5.1 μm，标准偏差为 0.29 μm；薄膜厚度测量结果为 101.52 nm，标准偏差为 0.01 nm；深度测量值为 79.9 μm，标准偏差为 0.007 μm。

在传统的反射光谱测量法的基础上，Bofang Peng 等人进行了创新，利用光进入微结构内部并与侧壁或底部相互作用而在光瞳面产生高频信号的原理对深度进行了测量^[35]。该方法没有像传统

方法一样利用上表面和微结构底部反射回的光产生干涉对深度进行求解，而是直接利用不同衍射角产生的散射在光瞳面对应的频率不同实现对深度的求解。由于该课题组利用入射光与孔的侧壁及其底部相互作用进行实现，因此在结构上进行改进，通过利用光阑，阻挡了所有从上表面反射的光，实现了只对沟槽底部反射回来的光进行分析。相较于传统方法，该设计避免了无效信息的影响，如上表面反射回的光的影响，因此可以实现对侧壁、深度和底部特征等轮廓信息的更高灵敏度、更高准确度测量。此外，还对测量光源进行了改进，使用激光光源进行深度测量实验，并在解算算法上进行创新，利用时域有限差分进行深度计算。在测量过程中，该课题组利用建模和拟合方法相结合的方式，在多输入、多输出的基础上建立了非线性模型，并对测量所得到的相关数据进行拟合，从而获得深度的最佳解。

综上所述，高深宽比微结构深度测量的非光学测量方法和光学测量方法总结见表 3。

表3 测量深度方法对比

Tab.3 Comparison of depth measurement methods

类别	测量方法	测量原理	优点	缺点
非光学 测量	扫描电子显微镜测量法	利用扫描电子显微镜进行测量	测量过程直观、不依赖光学模型、精度高	破坏样品、测量成本高
	扫描探针法	利用原子力显微镜或者触针式轮廓仪进行测量	微米量级深度、精度高	受限于测头直径、测头可能有磨损,影响测量精度、测量成本高
光学 测量	白光显微干涉技术测量法	利用白光干涉条纹进行测量	纵向分辨力高、精度高、测量范围大	光路较为复杂、易受振动影响
	共焦显微技术测量法	利用共焦成像技术和层析技术进行测量	高分辨力、高灵敏度、高信噪比	依赖于共聚焦显微镜测量能力;测量范围受限,适合微米以下量级
	反射光谱技术测量法	利用反射的干涉光束进行测量	光路简单、精度高、测量范围大、测量速度快	测量能力受限于反射光谱信号干涉强度

3 总结与展望

高深宽比微结构大大提升了器件的性能,在工业生产中得到了广泛应用。深度作为影响性能的关键指标之一,精确测量具有重要意义。目前测量高深宽比微结构的深度可以分为光学测量和非光学测量两大类方法。非光学测量法发展时间较长,测量技术较为完备,具有更高的测量精度,但一般会损坏样品、成本高昂,且一般所需要的测量时间较长;光学测量法更多的是依赖光路结构对深度进行测量,测量速度更快、精度较高、结构更简单紧凑、成本相对较低,但是对光线质量要求较高,尚具有较大的发展空间。从目前的发展趋势来看,由于需要满足工业上实时在线测量和无损测量的需求,技术发展由非光学测量向光学测量过渡。

光学测量方法的发展趋势表现为:

1) 在利用光学测量法进行深度测量时,深度测量的准确度受到反射光照强度的直接影响,而沟槽开口大小、沟槽底部形貌、侧壁的粗糙度等信息直接影响反射光照强度。因此在功能方面,光学测量方法在能够准确测量深度的同时,还应当测量出沟槽的相关几何信息。从目前的研究成果来看,白光显微干涉技术测量法、共焦显微技术测量法和反射光谱技术测量法可以初步完成沟槽三维形貌的构建、侧壁加工质量的测量,但还需要进一步研究。

2) 光学测量方法依赖于光学系统和光学模型对深度进行测量,通过对光学系统的改善可以提高系统的光的传输效率,降低光能量由于传输导致的损失,从而提高深度测量的准确度;实际的待测样品由于氧化膜的存在,光线在薄膜中的折射、反射可能影响沟槽深度的测量,因此需要对现有的数学模型进行完善,或在测量过程中综合利用白光干涉、共聚焦显微和反射光谱等技术对深度进行准确测量。

3) 目前,利用光谱分析的方法成为深度测量的发展趋势,相较于扫描方式,该方法无需对样品进行扫描处理,降低测量时间,提高测量效率;相较于非光学方法,该方法结构简单,测量成本低。目前主要利用相位分析法和频率分析法对光谱进行分析,深度测量的准确与否与数学模型的好坏和反射光质量好坏直接相关,因此,如何完善深度信息提取模型,提高反射光光强质量是深度测量研究的主要趋势。

4) 现存的利用高深宽比微结构深度测量方法装置存在体积大、携带不方便、装配繁琐等弊端,未来,可对装置进行微型化、集成化、小型化改进,使装置结构紧凑。在装配过程中,应注意综合使用视觉传感器、微力传感器等,从而实现对系统的精密定位,减小因装配带来的测量误差^[36]。

参考文献

- [1] 孙广毅. 高深宽比微纳结构模拟、加工及应用[D]. 天津: 南开大学, 2010.

- SUN G Y. Simulation, processing and application of high aspect ratio micro-nano structures [D]. Tianjin: Nankai University, 2010. (in Chinese)
- [2] 秦雷, 谢晓瑛, 李君龙. MEMS技术发展现状及未来发展趋势[J]. 现代防御技术, 2017, 45(4): 1-5, 23.
- QIN L, XIE X Y, LI J L. Current status and future development trend of MEMS technology [J]. Modern defense technology, 2017, 45(4): 1-5, 23. (in Chinese)
- [3] KLIMOV S I, TAMKOVICH G M, ANGAROV V N, et al. Aerospace education program realization by means of the micro-satellite [J]. Acta astronautica, 2005, 56(1): 301-306.
- [4] HSIUNG S K, LEE G B, LIN C H, et al. Microcapillary electrophoresis chip device integrated with micro focusing lens structures and its biomedical applications[J]. Fooyin journal of health sciences, 2009, 1(1): 110-20.
- [5] 郭茂香. 硅基高深宽比结构静电式MEMS电容器制造与性能测试研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- GUO M X. Fabrication and performance testing of silicon-based high aspect ratio structured electrostatic MEMS capacitors[D]. Taiyuan: North Central University, 2013. (in Chinese)
- [6] PÄIVÄNRANTA B, MERBOLD H, GIANNINI R, et al. High aspect ratio plasmonic nanostructures for sensing applications[J]. ACS nano, 2011, 5(8): 6374-6382.
- [7] JANG S, KIM C, PARK J J, et al. A high aspect ratio serpentine structure for use as a strain-insensitive, stretchable transparent conductor [J]. Small, 2018, 14(8): 1702818.
- [8] 张倩倩. 三维集成电路中硅通孔互连参数提取的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2018.
- ZHANG Q Q. Study on the extraction of silicon through-hole interconnect parameters in three-dimensional integrated circuits [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [9] 耿焯. 三维集成电路绑定前TSV缺陷检测方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- GENG Y. Research on TSV defect detection method before 3D IC binding [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] 神克乐. 基于硅通孔连接的三维集成电路测试方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- SHEN K L. Research on 3D integrated circuit testing method based on silicon through-hole connection [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [11] 陈媛, 张鹏, 夏逵亮. TSV的工艺缺陷诊断与分析[J]. 半导体技术, 2018, 43(6): 473-479.
- CHEN Y, ZHANG P, XIA K L. Process defect diagnosis and analysis of TSV [J]. Semiconductor technology, 2018, 43(6): 473-479. (in Chinese)
- [12] 杨晶. 扫描隧道显微镜和扫描电子显微镜的联用[J]. 科技创新导报, 2008(4): 2-3.
- YANG J. Combined use of scanning tunneling microscopy and scanning electron microscopy [J]. Science and technology innovation herald, 2008(4): 2-3. (in Chinese)
- [13] 郭鑫. 白光干涉式微纳沟槽深度测量系统的研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2017.
- GUO X. Research on white light interferometric micro-nano trench depth measurement system [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2017. (in Chinese)
- [14] BENNETT J M, DANCY J H. Stylus profiling instrument for measuring statistical properties of smooth optical surfaces[J]. Applied optics, 1981, 20(10): 1785-1802.
- [15] 章英. 白光干涉光谱测量方法与系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- ZHANG Y. Research on the method and system of white light interferometric spectroscopy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [16] 郭志峰, 郭昭华, 王永旺, 等. 原子力显微镜和白光干涉仪在表面材料测试中的应用研究[J]. 表面技术, 2018, 47(1): 254-259.
- GUO Z F, GUO Z H, WANG Y W, et al. Study on the application of atomic force microscopy and white light interferometry in the testing of surface materials [J]. Surface technology, 2018, 47(1): 254-259. (in Chinese)
- [17] KLA. Alpha-step D-600 stylus profiler [EB/OL]. [2022-08-01]. <https://www.kla.com/zh-hans/products/surface-profilers/alphastep-d-600-stylus-profiler>.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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 C Y, KONG F H, ZHANG W D, et al. Measurement of MEMS deep groove structures using white light in-

- terference principle [J]. Journal of sensing technology, 2006, 19(5): 1516-1518. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 周一览. 共聚焦激光扫描显微镜的研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
ZHOU Y L, At a glance. development of confocal laser scanning microscope [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. (in Chinese)
- [23] 由小玉. 光学共焦显微镜振镜扫描策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
YOU X Y. Study on the scanning strategy of optical confocal microscope oscilloscope [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [24] ATTOTA R K, KANG H. Parameter optimization for through-focus scanning optical microscopy[J]. Optics express, 2016, 24(13): 14915-14924.
- [25] ATTOTA R K, KANG H, SCOTT K, et al. Nondestructive shape process monitoring of three-dimensional high aspect ratio targets using through-focus scanning optical microscopy[J]. Measurement science & technology, 2018, 29(12): 125007.
- [26] 郭继平, 于冀平, 方南家, 等. 无限变焦3D形貌仪测量条件及不确定度分析[J]. 中国测试, 2014, 40(3): 28-31.
GUO J P, YU J P, FANG N J, et al. Measurement conditions and uncertainty analysis of infinite zoom 3D morphometer[J]. China testing, 2014, 40(3): 28-31. (in Chinese)
- [27] FURSENKO O, BAUER J, MARSCHMEYER S. 3D through silicon via profile metrology based on spectroscopic reflectometry for SOI applications[J]. 2016.
- [28] 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.
- [29] HSU W T, KU Y S. Reflectometry for tsv etching depth inspection[C]//International society for optics and photonics, 2011.
- [30] 武飞宇. 基于反射光谱的高深宽比微结构深度测量方法与系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
WU F Y. A method and system for depth measurement of high aspect ratio microstructures based on reflection spectroscopy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022. (in Chinese)
- [31] KU Y S. Spectral reflectometry for metrology of three-dimensional through-silicon vias [J]. Journal of micro/nanolithography mems & moems, 2014, 13(1): 011209.
- [32] BENNETT H E, PORTEUS J O. Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence[J]. JOSA, 1961, 51(2): 123-129.
- [33] FURSENKO O, BAUER J, MARSCHMEYER S. In-line through silicon vias etching depths inspection by spectroscopic reflectometry [J]. Microelectronic engineering, 2014, 122: 25-28.
- [34] HANSSEN L M, WEI H C, LO C W, et al. The design of microscope type spectral reflectometry for the depth measurement of high-aspect-ratio through silicon via [C]//Reflection, Scattering & Diffraction from Surfaces V, International Society for Optics and Photonics, 2016: 99610L.
- [35] PENG B, HOU W, XU Q. Precision 3D profile in-line measurement of through-silicon via (TSV) based on high-frequency spectrum signals in the pupil plane[J]. Optics communications, 2018, 424: 107-112.
- [36] 王晓东. 精密微小装配中的传感器与测量技术[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 10-22.
WANG X D. Sensors and measurement technology in precision micro assembly [J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(5): 10-22. (in Chinese)

(本文编辑:朱俊真)



第一作者: 吴岳松 (1999—), 男, 博士研究生, 研究方向为精密测量技术。



通讯作者: 胡春光 (1981—), 男, 教授, 博士, 研究方向为微纳测试技术。建立了以光谱测量为技术特色的纳米薄膜和原子厚度表/界面精密测量方法, 创新发展了以高精度光镊技术和新型光场调控技术为基础的单分子力谱操控与测试技术并获得应用。主持国家和省部级项目11项, 参与省部级以上和国外项目11项, 发表学术论文160余篇, 授权中国发明专利18项。