

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.02

过焦扫描光学显微测量技术综述

石俊凯¹, 李冠楠¹, 霍树春¹, 姜行健¹, 陈晓梅¹, 周维虎^{1,2}

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 随着半导体产业的发展和器件性能的不不断提升, 半导体器件的特征尺寸越来越小, 器件结构越来越复杂, 对检测仪器的性能提出了更高的要求。首先介绍过焦扫描光学显微法 (Through-focus Scanning Optical Microscope, TSOM) 的测量装置及测量原理, 该方法可实现三维几何参数的无损测量, 因其具有精度高、速度快、成本低等优点, 可以满足在线测量的需求; 然后从TSOM图构建和待测参数提取两个方面对TSOM方法的研究进展进行了梳理和归纳; 最后对TSOM方法未来的研究重点和发展方向进行了展望。该方法有望为我国半导体制造产业提供新的检测手段, 为优化和提升我国半导体制造工艺提供重要的技术支撑。

关键词: 光学微纳测量; 过焦扫描光学显微法; 深度学习; 无损测量

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2023)01-0018-12

Review of through-focus scanning optical microscopy

SHI Junkai¹, LI Guannan¹, HUO Shuchun¹, JIANG Xingjian¹, CHEN Xiaomei¹, ZHOU Weihu^{1,2}

(1. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As the semiconductor industry develops and the device performance improves continuously, the feature size of semiconductor devices is becoming smaller and smaller, and the device structure is becoming more and more complex. Therefore, it urgently demands for the high performance of metrological instruments. This paper first introduces the measurement principle and the setup of through-focus scanning optical microscope (TSOM) method. This method can realize the nondestructive measurement of 3D geometric parameters, and has the advantages of high precision, fast speed, low cost, etc. It can meet the requirements of on-line applications. Then the paper introduces the research progress of TSOM method from two aspects: the construction of TSOM image and the extraction of structural parameters. Finally, it prospects the future research focus and development direction of TSOM method. This method is hopefully a new metrology method for China's semiconductor manufacturing industry, and provide important technical support for optimizing and upgrading China's semiconductor manufacturing process.

Key words: optical micro-nano measurement; through-focus scanning optical microscope; deep learning; non-destructive measurement

收稿日期: 2022-10-13; 修回日期: 2022-10-18

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0605500); 清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金(TH20-01); 国家自然科学基金(51905528); 精密测试及仪器国家重点实验室开放基金(pilab2102)

引用格式: 石俊凯, 李冠楠, 霍树春, 等. 过焦扫描光学显微测量技术综述[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 18-29.

Citation: SHI J K, LI G N, HUO S C, et al. Review of through-focus scanning optical microscopy[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1): 18-29.



0 引言

半导体产业是现代信息社会的基石,是支撑当前经济社会发展和保障国家安全的战略性、基础性和先导性的产业。近年来,以智能手机、平板电脑为代表的新兴消费电子市场快速发展,汽车电子、工业控制、物联网等科技产业纷纷兴起。在新冠肺炎疫情的影响下,各行各业都加快了数字化的步伐,人工智能、大数据、网络安全等新兴数字产业取得了跨越式发展。市场的快速发展也加大了对半导体产业的产品需求。目前我国半导体产业的制造能力与世界先进水平存在明显的差距,无法满足国内市场蓬勃发展的需求。半导体制造能力的提升离不开先进计量手段的支撑,经过几十年的发展,半导体器件的性能不断提升。同时,器件结构特征尺寸越来越小,器件结构越来越复杂。为提升制造工艺,确保器件质量和产率,需要发展高精度、高通量的检测方法和仪器。

半导体器件的特征尺寸通常为 μm 量级至 nm 量级,传统的测量方法主要包括扫描电子显微镜^[1]和原子力显微镜^[2]。这两种测量方法都可以实现纳米级测量精度,但成本高昂、样品制备复杂,无法满足线上测量的要求。近年来,基于光学方法的无损测量技术日渐成熟^[3],例如白光干涉法、光谱反射法、光谱散射法,激光共聚焦法等。这类光学方法通常需要精确聚焦来获得准确测量结果,当测量半导体器件不同高度的表面或内部结构时需要重新聚焦,影响测量速度。同时白光干涉法、光谱反射法只能获得沟槽或孔结构的深度信息,光谱散射法只能获得阵列结构特征参数的平均结果,无法全面真实地反映半导体器件结构信息。

过焦扫描光学显微法(Through-focus Scanning Optical Microscope, TSOM)是一种基于图像的三维测量方法^[4-7]。传统基于图像的测量方法利用焦点位置的清晰成像提取样品二维结构信息,而且其分辨力受限于波长和成像系统,无法满足 nm 级节点尺寸的检测需求。事实上,除了焦点处的图像,失焦位置的图像也能在一定程度上反映样品结构的几何信息^[8-10]。因此利用过焦三维光场信息可以实现目标三维参数的测量。TSOM方法使用一

组过焦图像生成TSOM图来代替焦平面图像,是一种“所见非所得”的测量方法。TSOM图反映了样品与焦点相对位置改变时反射光场的变化趋势,样品结构的任何微小变化都会影响TSOM图中的强度分布。因此,该方法可以获取样品结构的更多信息,包括线宽/孔径、高度/深度、侧壁角等。这些信息可以从TSOM图中提取,并通过模型匹配的方法得到精确的参数值。该方法将传统的光学显微镜转化为功能强大的三维结构测量工具,可用于纳米尺度到微米尺度三维结构的纳米级测量分辨力的尺寸表征,在满足工业对高通量、低成本三维测量的要求方面展示出良好的应用前景。

本文归纳总结了TSOM的研究进展,首先,对TSOM的测量装置及测量原理作了介绍;然后,梳理和归纳了TSOM方法的研究进展;最后,展望了TSOM方法未来的研究重点和发展方向。

1 TSOM测量原理

图1为TSOM测量原理示意图。测量硬件系统通常采用科勒照明方式,以发光二极管(Light Emitting Diode, LED)作为照明光源,由电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机采集图像。当待测样品沿光轴方向移动并通过焦点时,CCD会采集到一系列二维图像,包括一幅焦点处的图像和多幅失焦位置的图像。由于样品与焦点的相对位置发生变化,任意相邻的两幅图的强度分布都存在微小的变化。将采集到的一系列图像按空间扫描位置堆叠,即构成一个三维TSOM光场,其中 X 轴和 Y 轴分别代表样品的空间位置, Z 轴为扫描焦点位置,在此三维光场中,每个点都有对应的光强值。通过对三维光场进行垂直横剖面处理,可以很方便地截取一幅二维TSOM图,其中 X 轴、 Y 轴和颜色分别代表待测目标的空间位置、焦点位置和光强。通过TSOM图可以直观地了解反射光场随样品位置改变的变化趋势。TSOM图的强度分布会随着样品结构尺寸变化而产生相应的变化,因此TSOM图与样品结构尺寸之间存在一一对应的关系。

获得TSOM图后,需要进一步处理才能提取目标结构的参数信息。此过程主要包括三个步骤,如图2所示。首先,样品结构会直接影响TSOM图

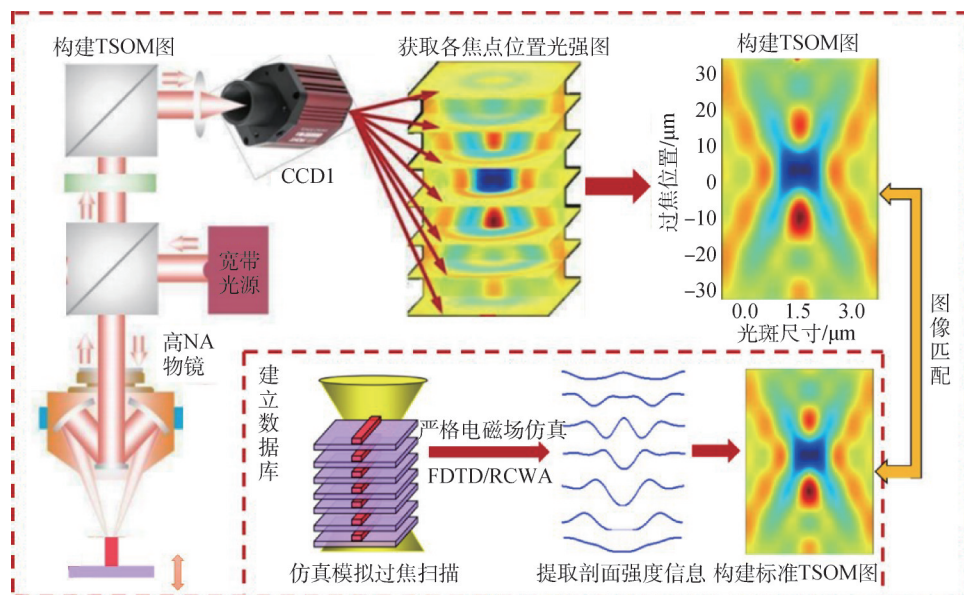


图1 过焦扫描光学显微成像原理图

Fig.1 Schematic diagram of TSOM

中的强度分布,将实验采集的TSOM图与标准仿真TSOM图数据库进行匹配,可以得到测量目标的结构特征。其次,样品结构尺寸的微小变化对TSOM图的影响难以直观分辨,而将TSOM图与标准样品的TSOM图做差值处理后,得到的差值TSOM (Differential TSOM, D-TSOM) 图可以突出此尺寸的变化。因此在确定测量目标形状后,将D-TSOM与标准仿真D-TSOM图像库进行匹配,可以

识别出发生变化的待测参数,如线宽、线高、侧壁角等参数。虽然不同的参数变化对应的D-TSOM图是不同的,但是同一参数的不同变化量对应的D-TSOM图大致是相同的,需要对D-TSOM图像进行定量分析。常用的D-TSOM图衡量参数有均方强度 (Mean-Square Intensity, MSI) 和光强范围 (Optical Intensity Range, OIR),以MSI为例,其表达式为

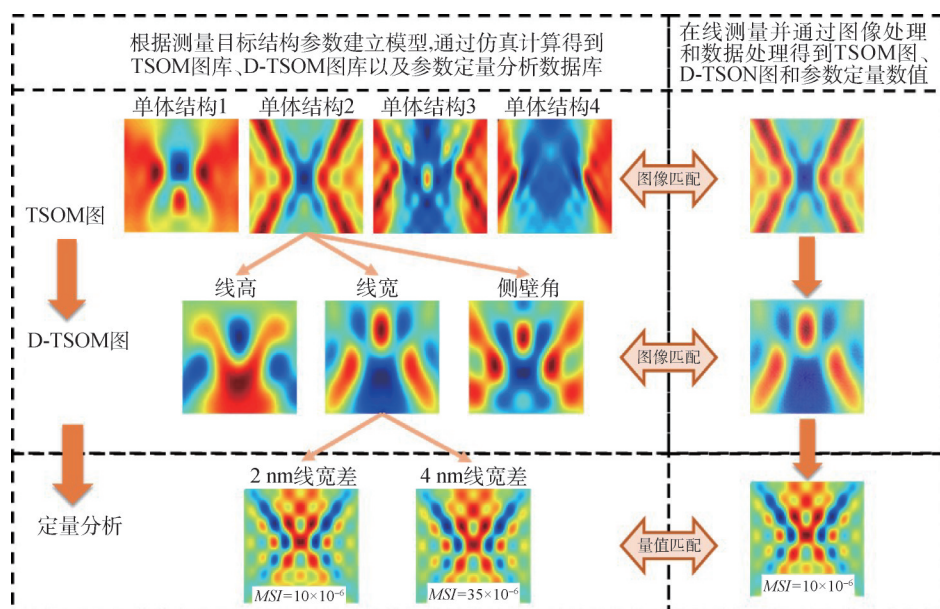


图2 过焦扫描提取参数信息流程图

Fig.2 Flow chart of extracting parameter information by TSOM

$$MSI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2 \quad (1)$$

式中： n 为图像的总像素数量； A_i 为D-TSOM图第 i 个像素的强度。

为了保持对比结果一致，图像的总点数，选择的X轴范围和焦点范围必须保持一致。将计算得到的MSI值与仿真库数据进行量值匹配，即可得到测量参数的精确数据。采用TSOM方法，普通的光学显微镜可以规避光学成像系统的衍射极限，实现纳米量级的尺寸测量。

2 TSOM方法研究进展

TSOM方法的测量过程主要包括TSOM图构建和从TSOM图提取待测参数两个主要步骤。本章将分别从这两个方面介绍TSOM测量方法的研究进展。

2.1 TSOM图构建方法研究进展

TSOM图的构建是实现TSOM高精度测量的基础，TSOM方法的灵敏度和准确度高度依赖于目标TSOM图和参考TSOM图获取条件的相似性。实现纳米级灵敏度需要仔细优化TSOM图获取的实验条件，消除TSOM图采集和仿真中过焦扫描和照明等条件的差异，这样目标TSOM图之间的相互比较、和参考库中TSOM图的比较才有意义。目前，优化目标TSOM图的方法主要集中在优化TSOM测量系统的实验参数和消除不稳定性影响两方面。

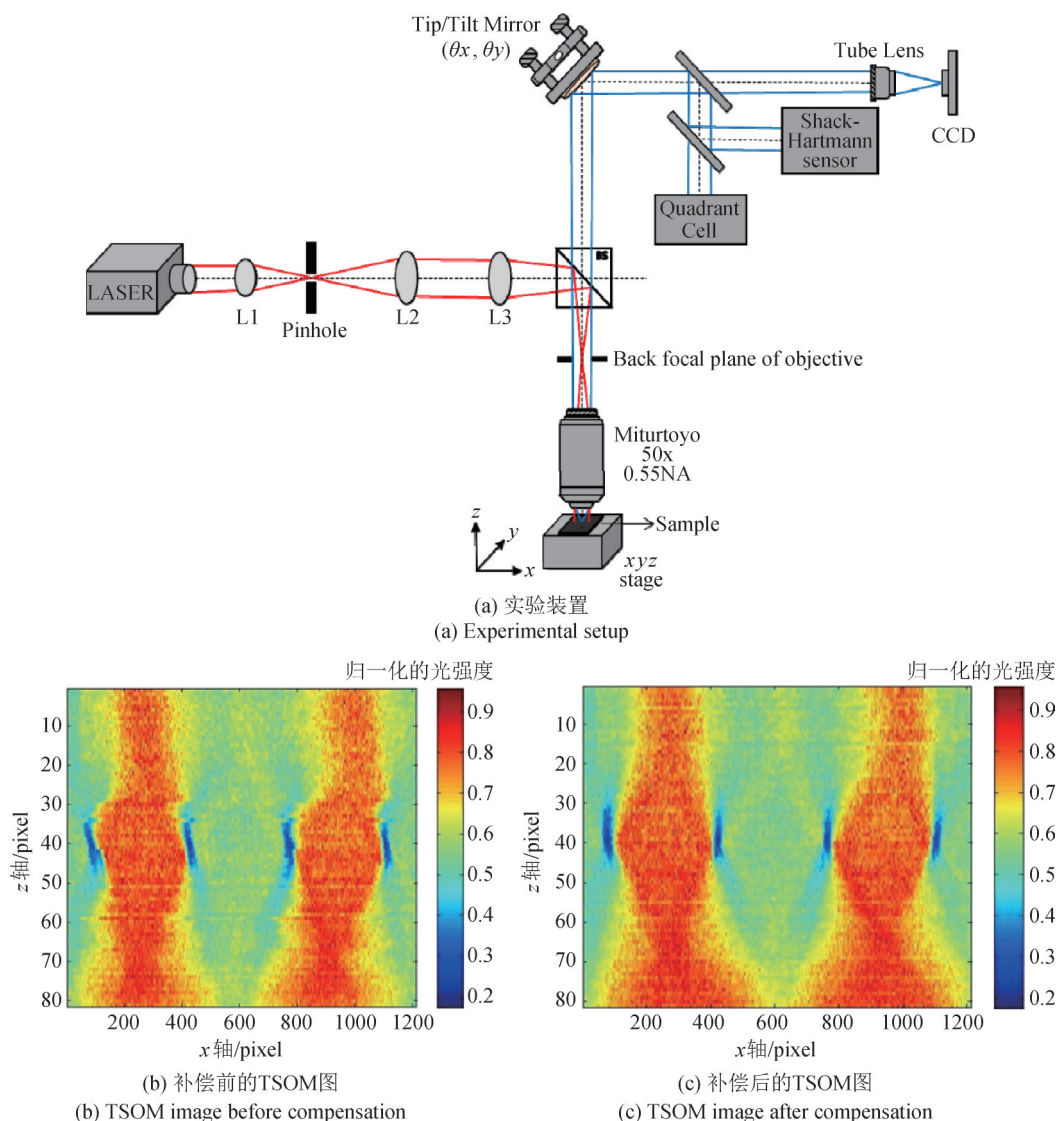
优化光学系统参数，降低总的成像系统噪声是提高TSOM测量精度的重要步骤。自2008年正式提出TSOM测量方法后，Ravi Kiran Attota等人在优化TSOM系统参数，提高测量灵敏度方面做了大量工作^[11-14]。通过仿真分析与对比实验证实：采用低相干度照明光源、降低照明数值孔径（Illumination Numerical Aperture, INA）、提高收集数值孔径（Collection Numerical Aperture, CNA）、采用线偏振照明光源，可以显著提高测量灵敏度，而扫描步长、像素尺寸对灵敏度影响不大。2018年，Yufu Qu等人系统分析了照明光偏振态和目标结构对测量灵敏度的影响^[15]。结果证实对于线结构样品，偏振态垂直于线结构条件下，灵敏度更高。对于中心对称的结构，如点或孔，照明光偏振态

对测量结果影响很小。2019年，Shin-Woong Park等人聚焦照明光相干度^[16]，通过仿真与实验分析得出结论：对于有效介质结构，如单鳍或准波长级多鳍结构，采用低相干照明测量效果更好，对于具有局部周期性的无效介质结构，高相干照明条件下灵敏度更高。

TSOM图数据的采集过程中，需要利用机械扫描装置扫描样品。机械扫描产生的轴向和横向定位不稳定性会引入额外的噪声，降低测量精度。同时，定位不稳定性会随着机械扫描速度的增加而增加，限制测量速度。扫描样品的方式不适用于在线测量，限制了该方法的应用领域。采用其他方法替代机械扫描样品完成过焦数据的采集，是消除不稳定性影响的有效途径。2014年，Maxim Ryabko等人报道了一种基于波长扫描的TSOM方法^[17]，采用波长可调谐的LED光源作为照明光源，利用物镜相差产生适量的焦点偏移，完成过焦图像的采集，最终实现硅线线宽测量误差在 ± 1 nm之间。2019年，Renju Peng等人以物镜扫描替代样品扫描构建TSOM测量系统，用于测量纳米金线的线宽、线高和侧壁角^[18]。该方法可以避免传统TSOM方法中光学显微镜光轴和样品台机械轴失配产生的测量误差，增强TSOM图保真度。2020年，Jun Ho Lee等人采用变形镜替代机械扫描装置，通过改变镜表面实现过焦扫描^[19]。该方法基本上可以完全消除不稳定性。

除了更换扫描方式外，还可以采用主动补偿和增加曝光时间的方法降低不稳定性的影响。2016年，Jun Ho Lee等人提出了基于主动光学技术的TSOM测量优化方案^[20]。实验装置如图3（a）所示，采用倾斜镜结合四象限单元，在扫描样品时可以实时补偿光轴的不稳定性。图3（b）和3（c）分别为补偿前、补偿后的TSOM图，结果表明，补偿后TSOM图的质量得到明显的提升。2018年，Ravi Kiran Attota通过实验证实，随着CCD相机曝光时间的提高，由于高频振动的平均效应，样品的横向偏移明显降低^[21]。主动补偿的方法会增加系统结构的复杂性，增加曝光时间则会牺牲测量效率，这两种方法都无法满足高集成度、高通量的技术发展趋势。

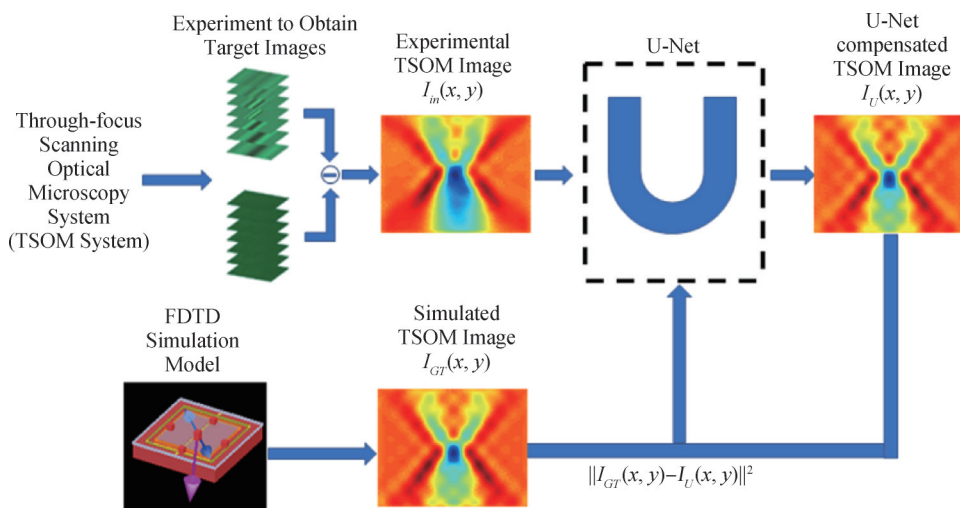
2020年，Renju Peng等人提出了基于傅里叶变

图3 基于偏转镜的TSOM^[20]Fig. 3 TSOM with a tip/tilt mirror^[20]

换的修正TSOM方法^[22]。傅里叶变换可以将二维图像分解为振幅矩阵和相位矩阵，振幅矩阵代表图像的幅值，而相位矩阵可以用于分析图像特征的位置。在构建TSOM图之前，先利用傅里叶变换分别将仿真生成的图像和实验采集的图像分解成振幅矩阵和相位矩阵。对实验图像的振幅矩阵和仿真图像的相位矩阵做逆傅里叶变换，得到修正图像，最后利用修正图像生成修正TSOM图。实验结果表明，该方法可以有效降低光学和机械噪声产生的横向偏移，在保证结构简单和测量速度的前提下提高测量精度。

深度学习是一种功能强大的工具，广泛应用于图像处理、光学计量等领域^[23]。2021年，Yufu

Qu等人提出基于深度学习的TSOM图误差补偿方法^[24]。深度学习方法具有良好的非线性拟合能力，可以通过多次迭代学习映射关系。实验流程如图4所示，采用U-Net模型作为学习模型，将实验采集的TSOM图和仿真TSOM图同时输入U-Net模型，并以仿真值作为真值。U-Net输出为实验TSOM图的补偿图，计算U-Net补偿TSOM图和仿真TSOM图的均方误差（Mean Square Error, MSE）。在迭代过程中，连续调节神经网络的参数直到MSE达到最小值，此时U-Net补偿TSOM图最接近仿真TSOM图。该方法通过U-Net模型学习带有成像误差的TSOM图和完美图像的映射关系，实现成像误差补偿。

图4 基于U-Net神经网络的TSOM图补偿过程示意图^[24]Fig.4 Schematic diagram of TSOM image compensation process using U-Net neural network^[24]

2.2 参数提取方法研究进展

从TSOM图中提取样品结构的几何参数信息，需要建立TSOM图和几何参数的映射关系。目前建立映射关系常用的方法有库匹配法和学习模型方法。

2.2.1 库匹配法

TSOM方法通常采用数值仿真的方式建立参考TSOM图数据库，数据库的构建是实现TSOM高精度测量的关键，因此TSOM图数值模型至关重要。为了建立合适的仿真TSOM图数据库，需要在模型中考虑会影响图像质量的各个因素，例如，成像系统的振幅和相位传输特性、成像系统噪声等。此外，为了实现待测参数的可靠评估，必须考虑实验和仿真中成像系统的像差和校准等问题，其中最显著的影响因素是光学像差。

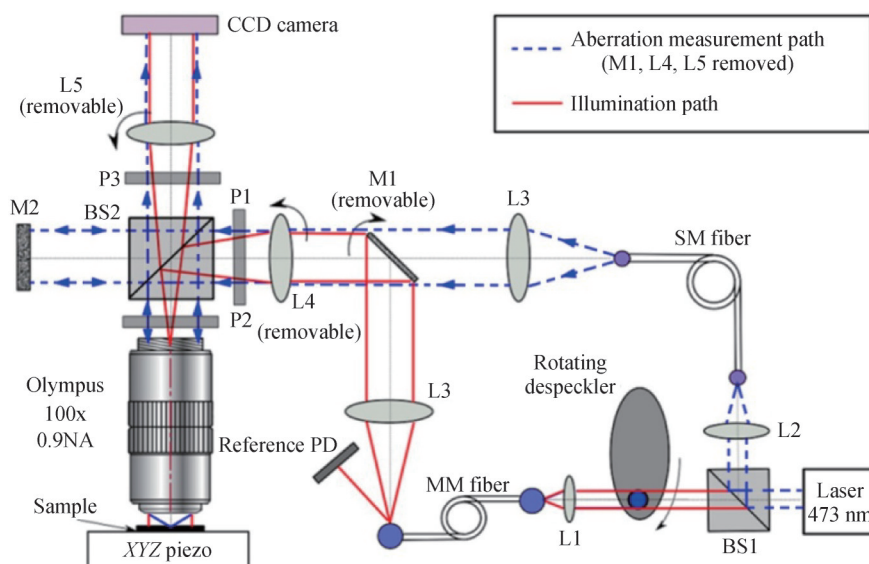
2013年，M. V. Ryabko等人为消除光学相差的影响，在TSOM数值模型中引入相差参数^[25]，轴向色差值通过实验测定，并对数学模型做出相应的修正。对于相位畸变，研究人员依靠经验对每个平面波引入一个额外的相移，直到对当前样品的实验和仿真TSOM图达到最佳匹配，选定的相移值提供了实验和仿真条件之间的偏移量，并可继续用于其他样品的仿真模型。该方法可以改善实验与仿真结果的匹配度，显著提高TSOM方法的测量精度。

由于精密测量的复杂性，该方法中使用的像差值只是依据经验设定的。2015年，该课题组提出了一种测量光学系统像差的方法，并把像差代

入TSOM图像模拟算法中以获得更高的测量精度^[26]。实验装置如图5所示，通过引入新的照明光源和参考镜，并移除两个透镜，在TSOM测量系统的基础上构成了一个干涉仪结构，采用相移干涉法求解出物镜处的像差分布，将求解得到的像差信息代入TSOM图数值模型，可以有效减小仿真误差。

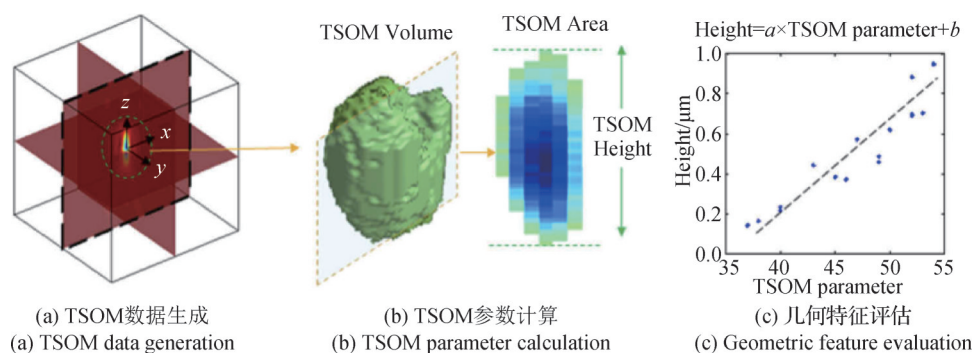
在建立参考TSOM图数据库时，需要提供结构参数变化0.1 nm或更小步长对应的TSOM图，以获得更高的测量分辨率。建立仿真模型常用的算法包括时域有限差分法和有限元分析法。这两种方法都是基于空间离散计算网格，结构参数变化步长的降低会导致所需的计算资源呈指数增加，严重降低计算效率。2018年，Shin-Woong Park等人提出了基于傅里叶模型的TSOM方法，通过傅里叶变换将Maxwell方程转换到频域，并应用于计算目标样品结构的散射光场矩阵^[27]。采用傅里叶变换法要求频域是离散的，但是空间域的参数可以作为连续量进行准确、高效处理。计算得到的散射光场矩阵可以直接应用于TSOM图的构建，无需重复计算，即使重新选取样品结构参数间隔，所需计算资源仍保持稳定。该方法可以在保证计算效率的情况下获得参数接近连续变化的参考TSOM图数据库。

通过优化数值模型可以有效提高TSOM方法的测量性能，然而对于一些复杂结构或者不规则形状，建立TSOM图参考数据库耗时过长，甚至是不

图5 带有光学像差测量功能的TSOM实验装置^[26]Fig.5 TSOM setup with optical aberration measurement^[26]

实际的。实际应用中,除了通过数值仿真的方法建立参考TSOM图数据库,还可以利用实验采集的TSOM图作为参考,以实现参数测量。2021年, Ji Yong Joo 等人提出了一种无模型TSOM测量方法,用于评估 OLED (Organic Light-Emitting Diode) 显示面板表面颗粒缺陷的高度值^[28],测量流程如图6所示。首先采集数据建立三维TSOM光场,然后

基于三维TSOM光场各个像素的相对强度比定义TSOM体积、TSOM面积和TSOM高度,在此基础上建立TSOM参数与缺陷高度的对应关系。实验结果表明,选取相对强度比大于50%区域对应的TSOM高度,在缺陷高度140 nm至950 nm范围内,测量误差为20.3 nm,约为测量波长的1/26或显微镜景深的1/43。

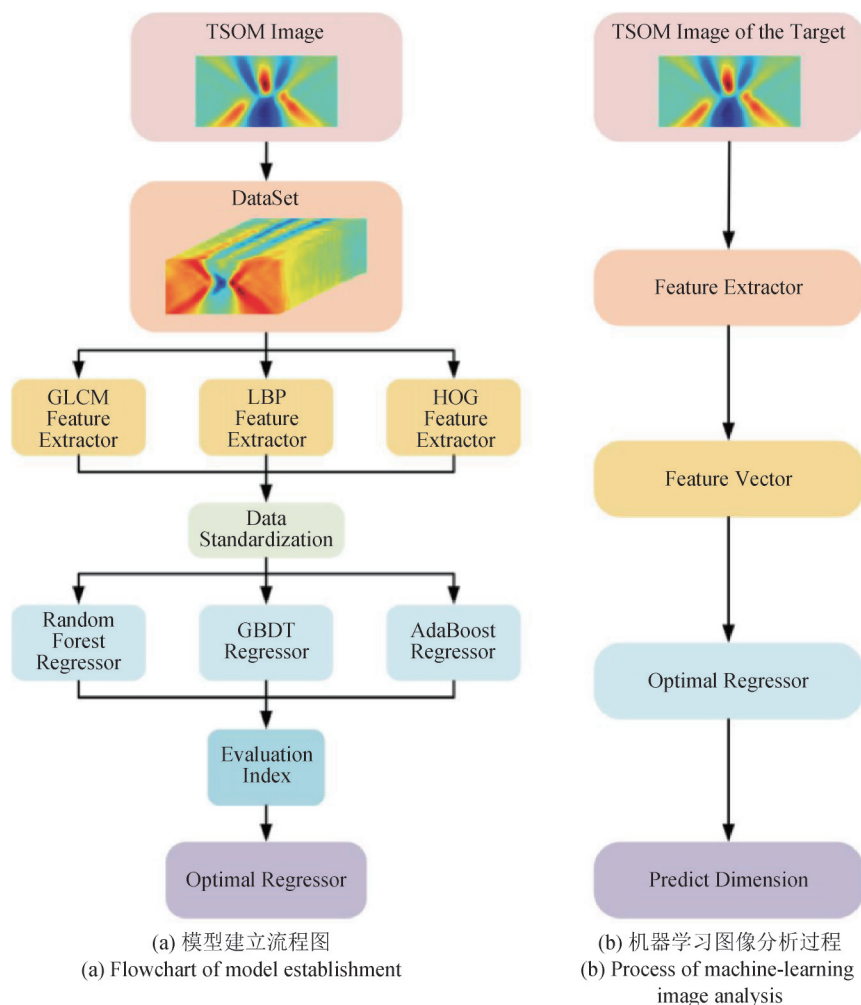
图6 无模型TSOM测量流程示意图^[28]Fig.6 Schematic diagram of model-less TSOM measurement process^[28]

2.2.2 学习模型法

库匹配法利用TSOM图的OIR和MSI去拟合模型,只利用了TSOM图的强度信息,因此需要强大的处理硬件和可控的测量环境。另外,对于复杂三维结构,例如3D NAND或不规则颗粒缺陷,建立TSOM参考数据库耗时过长,限制了该方法的应用范围。事实上,除了OIR和MSI,TSOM图的形

状和纹理特征也存在与待测结构尺寸之间的强相关性。

为了充分利用TSOM图的纹理特征, Yufu Qu等研究者在2019年提出了基于机器学习模型的TSOM测量方法并用于纳米金线的线宽测量^[29],测量的过程如图7所示。采用灰度共生矩阵(Gray-level Co-occurrence Matrix, GLCM),局部二

图7 建立TSOM图像分析机器学习模型的步骤^[29]Fig.7 Steps of establishing machine-learning model for TSOM image processing^[29]

进制模式 (Local Binary Pattern, LBP), 和方向梯度直方图 (Histogram of Oriented Gradient, HOG) 三种算法分别提取 TSOM 图的特征向量。所提取的特征向量经过标准化处理后随机组合成七组特征向量, 用于随机森林 (Random Forest), 梯度提升决策树 (Gradient Boosting Decision Tree, GBDT) 和 AdaBoost 等三种机器学习模型的训练, 并采用平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和 MSE 评估模型训练结果, 评估合格后的回归模型可用于预测待测量。与库匹配方法相比, 机器学习方法的测量误差明显降低。经过对比分析, 采用 AdaBoost 模型结合 LBP, HOG 组合特征向量提取算法实现了最佳测量结果, MAE 和 MSE 分别为 3.5 nm 和 126.4 nm²。该方法利用了 TSOM 图的全部纹理信息, 显著提高了测量结果的准确性和鲁棒性。

2022 年李冠楠等人采用支持向量回归 (Support Vector Regression, SVR) 模型结合 HOG 提取算法的机器学习方法^[30], 用于测量微电子机械系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 高深宽比沟槽的上表面宽度。槽宽测量范围为 2~30 μm , 测量结果的相对标准差低于 1% (30 μm 线宽处低于 0.35%), 该结果极大地扩展了 TSOM 方法的测量范围。

由于特征向量提取算法和机器学习模型的参数选择会受到人为操作的影响, 因此需要更客观的特征提取方法或改进的机器学习模型参数来提高测量准确度。深度学习具有强大的图像特征提取能力, 在图像分析、去噪和分类中表现优异, 得到广泛的应用。2021 年, Haitao Nie 等人提出了基于深度学习的 TSOM 图识别方法^[31], 以分类模

型实现线宽测量，深度学习模型结构如图 8 所示。测试样品为 40 组具有不同线宽的纳米金线，线宽分布范围为 239.67 ~ 1030 nm。利用训练 TSOM 图集训练残差网络 (Residual Network, ResNet) 和密集卷积网络 (Dense Convolutional Network, DenseNet) 两种分类模型，并采用测试 TSOM 图集测试训练效果，以分类结果作为测量值。深度学习模型可以在训练的过程中自动提取 TSOM 图特征，避免了操作人主观性的影响。测试结果显示，ResNet 和 DenseNet 测试结果的 MSE 分别为 31.84 nm² 和 21.05 nm²，远远低于机器学习回归模型的测量结果 126.4 nm²。如果在实验中采用线宽间隔更小的训练样品，分类结果会更接近真值，实现更高的测量精度。

对于基于分类模型的深度学习算法，其测量精度会受到分类类别的限制。2022 年，Guannan Li 等人提出基于卷积神经网络 (Convolutional Neural Network, CNN) 回归模型的 TSOM 测量方法^[32]，并应用于 MEMS 高深宽比沟槽的线宽和深度测量。待测样品的线宽范围为 2~30 μm，深度范围为 24~443 μm，深宽比最高为 88 : 1。CNN 模型由 5 个卷积层、4 个池化层和 4 个全连接层组成，具体参数

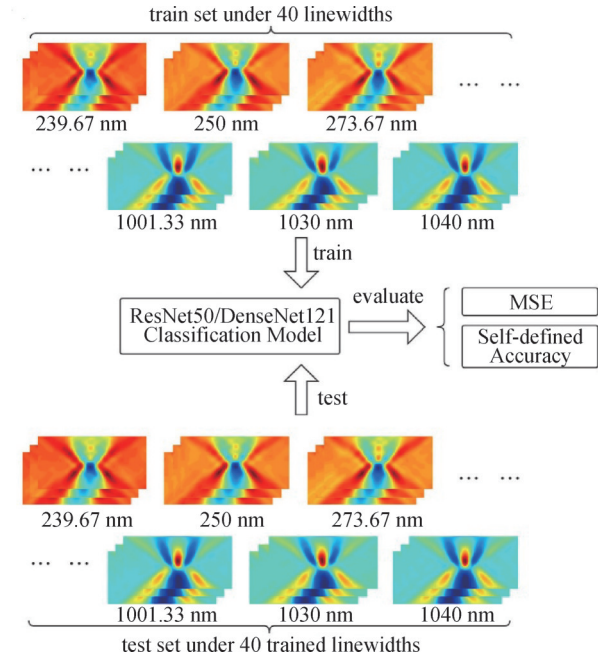


图 8 深度学习模型结构^[31]

Fig.8 Structure of deep-learning model^[31]

如图 9 所示。以多次测量结果的标准偏差和误差衡量模型的性能。测量结果显示，该 CNN 模型预测结果的标准差和误差均为百 nm 量级甚至更低，线宽和槽深预测结果的相对标准差分别为 0.2% 和 0.3%，远低于 SVR 预测结果的 2% 和 10%。

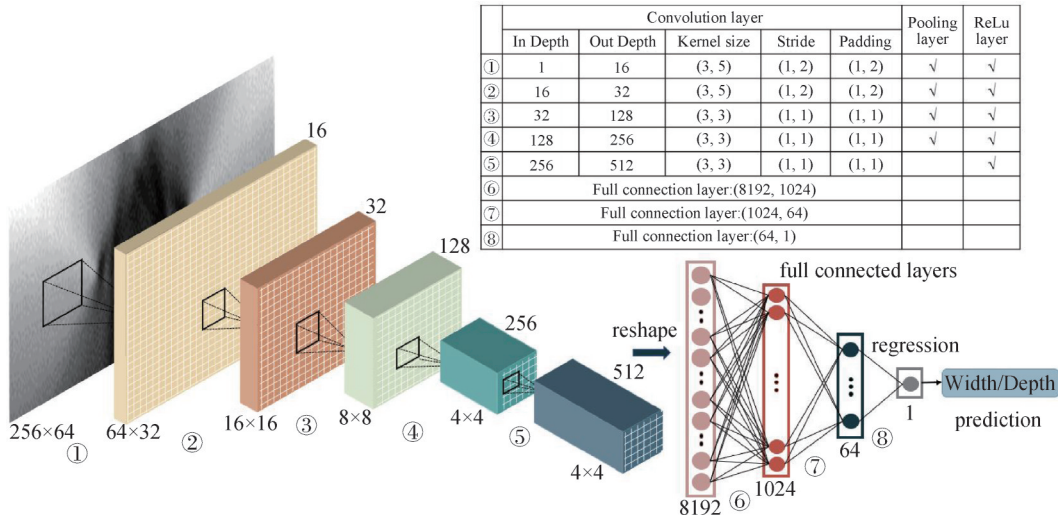


图 9 改进后的 CNN 模型原理图^[32]

Fig9 Schematic diagram of improved CNN model^[32]

同年，Zhang Zhang 等人提出了基于 CNN 回归模型的双输入深度学习 TSOM 法^[33]。TSOM 方法只利用整个三维 TSOM 光场的一个截面上的信息，导致图像信息利用率很低。而焦点处的图像具有最

高的清晰度，相比失焦位置的图像包含更多的有用信息，因此采用 TSOM 图和焦点处图像作为 CNN 回归模型的输入（如图 10 所示），充分利用三维 TSOM 光场的更多有效信息，有助于进一步提高测

量精度。采用该方法测量纳米金线线宽, MSE 和 MAE 分别为 5.18 nm^2 和 1.67 nm , 远低于基于 ResNet 或 DenseNet 回归模型的单输入 TSOM 方法。当金线位置发生水平偏移或选取的焦点位置发生偏移, 该方法在准确性和重复性方面表现出优异性能。

相比于库匹配法, 基于学习模型的 TSOM 图分析方法不仅提高了测量精度, 扩大了测量范围, 降低了对测量条件的要求, 而且避免了建立数据库等繁琐的工作, 大大提高了 TSOM 方法的实用性, 为推进 TSOM 方法的实用化奠定了基础。

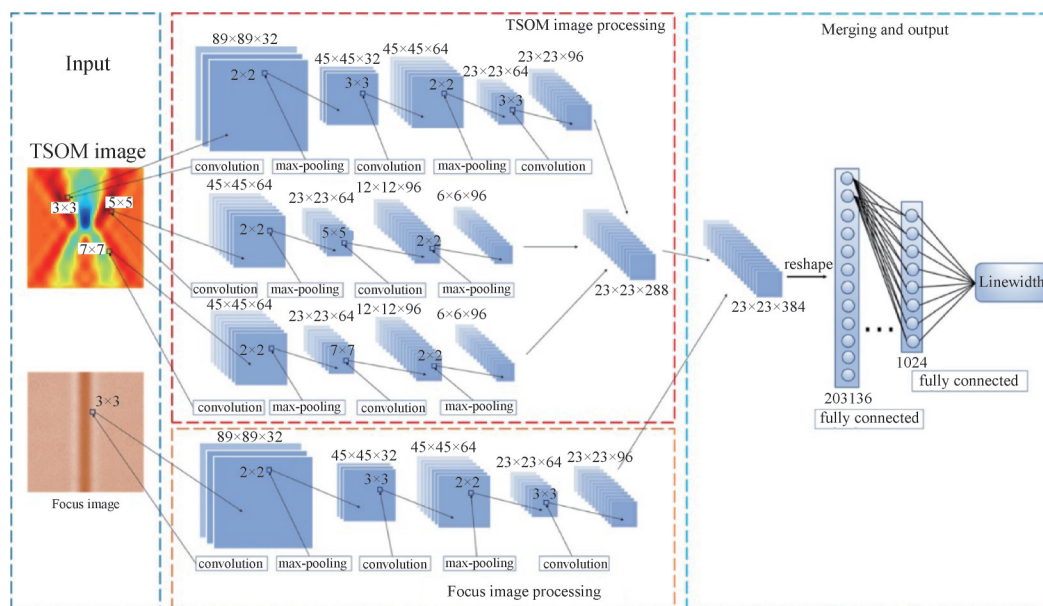


图 10 用于 TSOM 测量的双输入 CNN 模型结构^[33]

Fig10 Structure of two-input CNN model for TSOM measurement^[33]

3 展望

TSOM 方法具有分辨力高、测量速度快、成本低、适用范围广、非接触等优点, 该方法自 2008 年被首次提出后, 美国国家标准与技术研究院、三星电子俄罗斯研究院、韩国公州大学、韩国高丽大学、中国北京航空航天大学、中国科学院微电子研究所等科研机构的研究人员相继对此开展了研究工作, 已经成功应用于纳米金线/颗粒、MEMS 高深宽比沟槽、显示面板表面颗粒缺陷、硅纳米点、FinFET、掩膜缺陷等样品的测量工作中。但截至目前, TSOM 方法的潜力还未被完全开发出来。未来, TSOM 方法可能会在以下几个方面取得突破:

1) 与深度学习算法结合是 TSOM 方法未来的发展趋势。但半导体领域的检测对象多种多样, 若无法提供大量标记过的学习样本或者获取学习样本的成本非常高, 该方法将陷入瓶颈。若通过改进深度学习算法可以在少样本条件下实现学习

模型的训练或通过建模仿真来提高样本数量, 完成 TSOM 测量, 将极大地提高该方法的适用性。

2) 利用 TSOM 方法已经实现了待测样品的多个参数测量, 如孔径/线宽、深度/高度、侧壁角等。但无论是库匹配法, 还是学习模型方法, 都需要先确定待测参数类别, 再提取待测参数值, 即一次只能测量一个参数。对于多个待测参数, 则需要分别测量。如果可以同时提取多个待测参数的信息, 将大大简化测量过程。

3) 虽然 TSOM 方法已经成功测量了多类样品, 但都集中在半导体领域的一些简单结构样品, 不能完全体现 TSOM 方法的优势。不同于所见即所得的直接测量方法, TSOM 方法是从反映光场变化情况的 TSOM 图中提取待测参数。理论上, 凡是能影响反射光场的结构参数都可以从 TSOM 图中提出来, 因此, 该方法可以应用于结构更复杂的样品。此外, TSOM 方法还可以用于柔性目标的测量, 有望在生物领域获得应用。

4) 科学技术需要应用于产业, 服务于产业,

才能转化为生产力,发挥其最大效力。例如,椭圆仪已经被应用于半导体产业开发和制造过程中各类薄膜厚度、光学常数以及材料微结构的测量。但关于TSOM方法的研究目前还停留在实验室阶段,提高TSOM系统集成度和鲁棒性是推进其产业化的关键。同时,产业化并不是终点,一旦TSOM方法获得产业界的认可,将会获得更多的资金和人力投入,促进TSOM技术不断地更新迭代,更好地服务于半导体产业。

2021版《器件与系统国际路线图》评价TSOM方法为“可作为适用于大规模制造的高通量、低成本、无损的3D形状量测方法”,并将其列为可以满足集成电路7 nm及7 nm以下节点测量需求的方法之一。因此,大力开展TSOM方法研究,未来必可为我国半导体制造产业提供一种新的检测手段,为优化和提升我国半导体制造工艺提供重要的技术支撑。

参考文献

- [1] 张欣宇, 凌珊, 封小亮, 等. 扫描电子显微镜校准方法[J]. 计测技术, 2015, 35 (6): 45-49.
ZHANG X Y, LING S, FENG X L, et al. Discussion on scanning electron microscope calibration method[J]. Metrology and measurement technology, 2015, 35 (6): 45-49. (in Chinese)
- [2] 李喧妍, 张富强, 陈晓梅, 等. 基于锁相环的音叉式原子力显微镜测头电路系统研究[J]. 计测技术, 2021, 41 (1): 48-52.
LI X Y, ZHANG F Q, CHEN X M, et al. Tuning fork AFM probe circuit system based on PLL [J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(1): 48-52. (in Chinese)
- [3] 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): 0851501.
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): 0851501. (in Chinese)
- [4] ATTOTA R, GERMER T, SILVER R. Through-focus scanning-optical-microscope imaging method for nanoscale dimensional analysis[J]. Optics letters, 2008, 33 (17): 1990-1992.
- [5] ATTOTA R, SILVER R. Nanometrology using a through-focus scanning optical microscopy method [J]. Measurement science and technology, 2011, 22: 024002.
- [6] ATTOTA R, SILVER R. Optical microscope angular illumination analysis [J]. Optics express, 2012, 20 (6): 6693-6702.
- [7] ATTOTA R, BUNDAY B, VARTANIAN V. Critical dimension metrology by throughfocus scanning optical microscopy beyond the 22 nm node[J]. Applied physics letters, 2013, 102: 222107.
- [8] KU Y, LIU A, SMITH N. Through-focus technique for nano-scale grating pitch and linewidth analysis [J]. Optics express, 2005, 13(18): 6699-6708.
- [9] KU Y, LIU A, SMITH N. Through-focus technique for grating linewidth analysis with nanometer sensitivity [J]. Optical engineering, 2006, 4512: 123602.
- [10] ATTOTA R, SILVER R, DIXSON R. Linewidth measurement technique using through-focus optical images [J]. Applied optics, 2006, 47(4): 495-503.
- [11] ATTOTA R, KAVURI P P, KANG H, et al. Nanoparticle size determination using optical microscopes [J]. Applied physics letters, 2014, 105: 163105.
- [12] ATTOTA R, KANG H. Parameter optimization for through-focus scanning optical microscopy [J]. Optics express, 2016, 24(13): 14915-14924.
- [13] ATTOTA R, WECK P, KRAMAR J, et al. Feasibility study on 3D shape analysis of high-aspect-ratio features using through-focus scanning optical microscopy [J]. Optics express, 2016, 24(15): 16574-16585.
- [14] ATTOTA R. Noise analysis for through-focus scanning optical microscopy [J]. Optics letters, 2016, 41 (4): 745-748.
- [15] QU Y, PENG R, HAO J, et al. Influence of illumination polarization and target structure on measurement sensitivity of through-focus scanning optical microscopy [J]. Applied sciences, 2018, 8: 1819.
- [16] PARK S, YOU B, PARK G, et al. Metrological sensitivity improvement of through-focus scanning optical microscopy by controlling illumination coherence [J]. Optics express, 2019, 27(3): 1981-1990.
- [17] RYABKO M, KOPTYAEV S, SHCHERBAKOV A, et al. Motion-free all optical inspection system for nanoscale topology control [J]. Optics express, 2014, 22(12): 14958-14963.
- [18] PENG R, QU Y, HAO J, et al. Multiple parametric nanoscale measurements with high sensitivity based on

- through-focus scanning optical microscopy[J]. Journal of microscopy, 2019, 274(3): 139-149.
- [19] LEE J, YOU B, PARK S, et al. Motion-free TSOM using a deformable mirror[J]. Optics express, 2020, 28(11): 16352-16362.
- [20] LEE J, PARK J, JEONG D, et al. Tip/tilt-compensated through-focus scanning optical microscopy[C]. Proceedings of SPIE, Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications IV, 2016, 10023: 100230.
- [21] ATTOTA R. Fidelity test for through-focus or volumetric type of optical imaging methods[J]. Optics express, 2018, 26(15): 19100-19114.
- [22] PENG R, JIANG J, HAO J, et al. Lateral movement and angular illuminating non-uniformity corrected TSOM image using Fourier transform[J]. Optics express, 2020, 28(5): 6294-6305.
- [23] ZUO C, QIAN J, FENG S, et al. Deep learning in optical metrology: a review[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11:39.
- [24] QU Y, REN J, PENG R, et al. Imaging error compensation method for through-focus scanning optical microscopy images based on deep learning[J]. Journal of microscopy, 2021, 283(2): 93-101.
- [25] RYABKO M, KOPTYAEV S, SHCHERBAKOV A, et al. Method for optical inspection of nanoscale objects based upon analysis of their defocused images and features of its practical implementation[J]. Optics express, 2013, 21(21): 24483-24489.
- [26] RYABKO M, SHCHEKIN A, KOPTYAEV S, et al. Through-focus scanning optical microscopy (TSOM) considering optical aberrations: practical implementation[J]. Optics express, 2015, 23(25): 32215-32221.
- [27] PARK S, PARK G, KIM Y, et al. Through-focus scanning optical microscopy with the Fourier modal method[J]. Optics express, 2018, 26(9): 11649-11657.
- [28] JOO J, LEE J, JANG W, et al. Defect height estimation via model-less TSOM under optical resolution[J]. Optics express, 2021, 29(17): 27508-27520.
- [29] QU Y, HAO J, PENG R. Machine-learning models for analyzing TSOM images of nanostructures[J]. Optics express, 2019, 27(23): 33978-33998.
- [30] 李冠楠, 石俊凯, 陈晓梅, 等. 基于机器学习的过焦扫描显微测量方法研究[J]. 中国光学, 2022, 15(4): 703-711.
- LI G N, SHI J K, CHEN X M, et al. Through-focus scanning optical microscopy measurement based on machine learning[J]. Chinese optics, 2022, 15(4): 703-711. (in Chinese)
- [31] NIE H, PENG R, REN J, et al. A through-focus scanning optical microscopy dimensional measurement method based on deep-learning classification model[J]. Journal of microscopy, 2021, 283(2): 117-126.
- [32] LI G, SHI J, GAO C, et al. MEMS high aspect ratio trench three-dimensional measurement using through-focus scanning optical microscopy and deep learning method[J]. Applied science, 2022, 12: 8396.
- [33] ZHANG Z, REN J, PENG R, et al. Focused and TSOM images two-input deep-learning method for through-focus scanning measuring[J]. Applied science, 2022, 12: 3430.

(本文编辑:朱俊真)



第一作者: 石俊凯(1986—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光学精密测量。主持、参研国家科技部重大科学仪器专项、国家重点研发计划、自然科学基金、国家重点实验室基金等项目十余项, 在国内外学术期刊发表论文20余篇, 申请发明专利10余项, 获得中国机械工业科学技术发明特等奖、中国计量测试学会技术发明一等奖等奖励, 担任《计测技术》青年编委。