

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311303

超精密测量是支撑光刻机技术发展的基石

谭久彬

(哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院 哈尔滨 150001)

摘要:光刻机是尖端装备的珠穆朗玛峰。超精密测量是支撑光刻机产品研发与制造,保证光刻机产品制造精度等级与质量水平的基石。本文综述了光刻机产业的特点与发展趋势。在此基础上,从零部件、分系统、整机集成、整机性能层面阐述了超精密测量对光刻机技术发展的支撑作用。分析了光刻机产品精密能力提升的途径和超精密光刻机产业测量体系建立的必要性,包括管控超精密光刻机产品制造质量的工业测量体系和管控光刻机产品工业测量体系量值准确可靠的计量体系。提出了建设光刻机产业计量测试中心的必要性。

关键词:光刻机;超精密测量;工业测量体系;计量体系;计量测试中心

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Ultra-precision measurement: The cornerstone of the lithography development

Tan Jiubin

(School of Instrument Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The lithography machine represents the pinnacle of advanced equipment. The ultra-precision measurement is crucial to supporting the research, development, and manufacturing of these products, ensuring the precision and quality of the manufacturing process. This article provides an overview of the lithography industry's characteristics and development trends, and explores the role of ultra-precision measurement in advancing lithography machine technology, examining its impact on components, subsystems, whole machine integration, and overall performance. The article also considers ways to enhance the precision capabilities of lithography machine products and the need to establish an ultra-precision measurement system, including an industrial measurement system to control the quality of ultra-precision lithography machine products and a metrology system to ensure measurement accuracy and reliability. Finally, the article proposes the necessity of establishing a measurement and testing center for the lithography machine industry.

Keywords: lithography machine; ultra-precision measurement; industrial measurement system; metrology system; measurement and testing center

0 引言

光刻机产业处于高端装备制造链的顶端,既是技术链的顶端,又是价值链的顶端;光刻机产业的高质量发展不仅会直接拉动芯片产业的发展,而且会极大地牵动整个高端装备制造制造业的发展,是大国必争的战略制高点。要打造一个有牵动力和竞争力的光刻机产业,首先必须打造光刻机产业高质量零部件产品的制造链和产业链,

这是光刻机产业高质量发展的基础与前提。超精密光刻机制造精度等级与质量水平,决定了我国超精密光刻机产业和整个高端装备制造制造业的核心竞争力。要成功研发与制造光刻机产品,并不断提高光刻机产品制造精度等级与质量水平,就必须首先完成系统的超精密测量能力建设。没有系统的超精密测量整体能力支撑,就不可能制造出质量合格的光刻机产品;即便勉强研发出光刻机样机,也很难产业化,也就是说,没有超精密测量能力,就无法生产出质量合格的超精密光刻机产品,即无法满足

超精密、高性能、高稳定性、高可靠性和长寿命等要求。系统的超精密测量整体能力建设是支撑光刻机产业高质量的基石,是基础的基础。超精密测量能力建设处于基础性、先导性、战略性地位,必须优先发展。

1 光刻机产业的特点与发展趋势

1.1 光刻机是人类制造史上精度和性能水平最高的机器

超精密光刻机被誉为“超精密尖端装备的珠穆朗玛峰”,是人类制造史上精度和性能水平最高的机器。其精度和性能已经接近人类超精密制造在现阶段的精度极限和性能极限。光刻机的工作原理是,采用类似照相机原理的方式,把掩模板上的集成电路等精细图形通过物镜系统按比例缩小,成像到硅片上;然后使用化学方法显影,再经过离子束刻蚀,得到刻在硅片上的集成电路等精细图形^[1]。超精密光刻机是在超精密量级上把最先进的光、机、电、控等十几个至几十个分系统,几万个乃至十几万个零部件集成在一起,通过及其复杂和严密的超精密测控系统,使光刻机的十几个至几十个分系统高精度和高性能协同工作。它是人类装备制造史上复杂程度最高、技术难度最大、制造精度最高、综合性能最强的尖端超精密装备。它在高速和高加速度下,达到纳米级的同步精度、单机套刻精度和匹配套刻精度等,这与传统的精度提升环境完全不同。精度和性能是超精密光刻机的生命,其精度和性能提升一点点,通常都要付出几倍,乃至十几倍的代价。

1.2 现有光刻机是集成全球超精密制造和测量能力的高精尖技术的结晶

由于光刻机制造与集成难度极大,目前全世界只有少数几家公司能够研制和生产。光刻机主要以荷兰ASML,日本Nikon和Canon这3大品牌为主,而最高端EUV光刻机仅有ASML一家公司有能力制造。其中用于7 nm节点制程的EUV光刻机拥有10万多个光机零件,涉及上游5 000多家供应商^[2]。这些零部件对精度、性能和可靠性的要求极高,只有发挥供应链上所有顶尖制造商的技术优势,确保全部零部件都满足设计要求,达到验收标准,最终超精密光刻机才有可能研发成功。

超精密光刻机不仅依赖全球超精密制造能力,同时依赖全球尖端的超精密测量的能力,如光刻机主要零件加工中的超精密测量、部件集成调试中的超精密测量、分系统集成调试中的超精密测量、整机集成调试中的超精密测量、整机性能调试中的超精密测量和嵌入光刻装备内部的数以千计的超精密测量单元及传感器,涉及几何、力学、电学、磁学、热学、光学等多学科的、种类繁杂的几十万个指标参数。需要通过超精密测量手段,对每一个

指标参数进行精准测量,对每一个零件、部件、分系统、整机的精度与性能进行层层管控。目前,用于最先进EUV超精密光刻机测量的通用仪器和专用仪器有1 000多种。超精密测量能力是光刻机制造和运行水平的集中体现。

1.3 国内外光刻机市场需求

2022年,前3大ASML、Nikon、Canon的集成电路用光刻机出货达超过500台,达到551台,较2021年的478台增加73台,涨幅为15%。而2021年,全球光刻机产品出货量达650台,其中集成电路制造用光刻机出货约500台,占比77%;面板、LED用光刻机出货约150台,占比23%。目前,全球光刻机市场的主要供货企业是荷兰的ASML,日本Nikon和日本佳能Canon这3家,3家企业的合计市场份额占到了全球光刻机市场的90%以上。前3大企业ASML、Nikon、Canon的集成电路用光刻机出货达478台,较2020年的413台增加了65台,增幅为15.74%。从EUV光刻机、浸没式ArF光刻机、干式ArF光刻机3个高端机型的出货来看,2021年共出货152台,较2020年的143台增长6.29%。其中ASML出货145台,占有95.4%的市场,较2020年增加10.4%;Nikon出货7台,占有4.6%的市场,较2020年15%减少10.4%。

在EUV光刻机方面,仍然是ASML独占鳌头,市场占有率高达100%;在浸没式ArF光刻机方面,ASML市场占有率高达96%,较2020年增加10%;在干式ArF方面ASML市场占有率达88%,较2020年增加21%;在KrF光刻机方面,ASML也是占据75%的市场份额,较2020年增加4个百分点;在i线光刻机方面,ASML也有21.71%的市场份额。2020年全球光刻机出货量为583台,2021年达650台,同比增长11.49%。

国内光刻机产业尚属于初期阶段,虽未形成体系,但已形成一定规模,支撑着低端光刻机、各类专用光刻机的研发与生产,同时支撑着部分高端光刻机的研发。国产光刻机未来有相当大的发展空间。2022年中国低端光刻机行业(后道封装光刻机、手动或半自动接触式光刻机等)产量95台,预计2028年该类光刻机产量有望达到373台^[3-5]。

随着第三次全球半导体产业向中国转移,国内晶圆厂投资加速,光刻机作为新建晶圆厂的核心资本支出,市场空间进一步打开。28 nm作为当前关键技术节点,工艺制程从90 nm突破至28 nm,对于国产替代具有重大战略意义。受益于5G时代、AI、自动驾驶等技术的普及与对芯片的迫切需求,我国光刻机市场需求有望在未来几年持续强劲增长。2022年中国光刻机市场需求为652台,2028年预计市场需求在1 210台左右^[4]。

2 超精密测量是支撑光刻机产品制造质量提升的基石

成体系的超精密测量能力是光刻机产品制造质量有效管控与质量提升的基础能力与核心能力。光刻机产品制造链主要包括零件制造、部件集成、分系统集成、整机集成、整机性能调试、试验线上考核试验和产品在役监测等,在这个全制造链、全产业链和全生命周期过程中,对超精密测量的需求无处不在、无时不在。

2.1 零部件层面的超精密测量

在光刻机零部件制造层面,以光刻机硅片台核心零件微晶方镜的制造为例来考察超精密测量的不可替代性。该零件用于光刻机硅片台对晶圆的承载,同时也是甚多轴激光干涉仪的目标反射镜。对微晶方镜的加工精度特别是反射面形精度、各反射面间的位置精度、微晶方镜整体刚度、模态、轻量化等都具有极高的要求。该零件包含 108 项尺寸公差和 62 项形状/位置/方向公差要求,需要 20 余种通用及专用测量仪器,才能完成这一个零件的测量。

以光刻机投影物镜中主透镜元件为例,透镜面形精度要求从亚纳米级达到了皮米级,例如低频面形精度 RMS 要求从早期的 0.35 nm 发展为现在的 75 pm ($1 \text{ nm} = 1000 \text{ pm}$),中频面形精度 RMS 要求从 0.25 nm 发展为 80 pm,高频粗糙度 RMS 要求从 0.3 nm 发展为 100 pm。低频面形精度影响投影物镜的波像差,中频面形精度影响投影物镜的眩光和光刻图案对比度,而高频粗糙度则与投影物镜的光能损失有关。对于透镜面形的测量精度要求则更加的严苛^[6],其测量重复性误差 RMS 需求达到 10 pm, EUV 光刻机物镜需要实现在 450 mm 口径内达到 50 pm 面形精度,这相当于在德国整个国土面积上(直径约 850 km),土地平整度为 0.15 mm。

2.2 分系统层面的超精密测量

在光刻机分系统层面,以光刻机运动台分系统为例,双工件台与掩模台系统是光刻机 3 大核心分系统之一,其运动性能直接影响光刻机的曝光精度和产率。对于 45 nm 节点光刻机,工件台与掩模台在 m/s 级运动速度下的同步运动误差需达到 3 nm^[7],这相当于两架波音 747 飞机在以 1000 km/h 飞行时,两架飞机之间的相对位置差小于 1 μm 。工件台和掩模台的同步运动精度主要通过甚多轴(>20 轴)激光干涉仪来保证。只有激光干涉仪的动态测量精度达到 10 nm,才能支撑 90 nm 光刻机的研发;只有激光干涉仪的动态测量精度达到 1 nm 量级,才能支撑 7 nm 光刻技术的研发。除三维线位移之外,运动台三维姿态角度的超精密测量同样由甚多轴激

光干涉仪完成。对于 45 nm 光刻节点,要求激光干涉仪在 m/s 级运动速度、几个 g 到几十个 g 加速度下的动态角度测量精度需要优于 100 nrad;同时,为了支撑运动控制系统的高精度和高效调节,45 nm 光刻机节点要求激光干涉仪的位移测量分辨力优于 0.6 nm、角度分辨力优于 30 nrad、数据更新率达到 20 MHz、任意测量轴之间的时延差异小于 1 ns;在目前顶尖的 EUV 光刻机中,激光干涉仪的有效位移测量分辨力已经达到惊人的 38 pm。此外,作为光刻机的嵌入式核心测量单元,激光干涉仪还需要具有封闭式自校准的手段和功能,从而在光刻机内部或多台光刻设备之间构建起稳定一致的量值溯源体系。

以光刻机环控系统为例,在光刻过程中,环控分系统将电机运动、光源曝光产生的热量及时转移到外界,保证关键区域温度、相对湿度、压力的稳定性,同时维持整机内部的洁净度。EUV 光刻机中每秒需要 4000 L 水用于精确控制冷却激光器温度,关键区域的温度测量与控制精度要达到 mK 量级,相对湿度的测量与控制精度达到 1% RH 量级。光刻机工作时所需的无尘环境要求非常高,如 1 m³ 内直径 0.1 μm 的粒子不超过 10 个。如果将 1 m³ 等比例放大到整个太平洋,粒子等效成其中的鱼,那么,最大的鱼的体积为 3.7 L 且不超过 10 尾。为了满足光刻机超洁净的需求,环控分系统的最小可探测的粒子直径必须达到 0.1 μm 量级。

2.3 整机集成层面的超精密测量

光刻机整机集成方面,首先要考虑超精密测量框架,它是光刻机整机的装配基准、运动基准和测量基准,直接决定了光刻机整机精度与性能^[8]。其次要考虑隔微振系统^[9],它用于抑制运动台高速、高加速运动产生的冲击和振动,并隔离地基传递上来的各类振动,为超精密测量框架提供超静内部环境,是光刻机工作精度与性能生成的必要保障。隔微振系统的关键技术指标包括:固有频率、振动传递率、响应时间、调平精度等指标。其中固有频率和振动传递率主要用于衡量对地基振动的隔离能力,响应时间和调平精度主要用于衡量对负载直接扰动的抑制能力。对于 45 nm 节点光刻机,为了满足运动台运动平均误差 < 3 nm,运动标准误差 < 6 nm 等指标,内部框架残余振动的功率谱密度要求须小于 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 量级,对应隔微振系统固有频率优于 0.5 Hz,在 10 Hz 处振动传递率达到 -40 dB 以上。这相当于把喧嚣嘈杂的闹市区环境噪声降低至静谧安逸的图书馆等级。

2.4 整机性能层面的超精密测量

在整机性能层面,为了高效、精确地将掩模板上的图案转移到硅片上,光刻机整机需在各分系统性能满足指标需求的前提下,根据芯片工艺制程约束对各分系统进行协同调控^[10]。在充分发挥各分系统精度与性能,使其达到极致的基础上,确保芯片的产率和良率。

从光刻机流程调控方面看,为了实现各分系统工作时序的紧密衔接,必须采用统一、精准的时间基准。例如硅片传输系统与运动台需要精准的时序配合才能实现安全、高速的上下片操作,其时间精度需达到 $1\ \mu\text{s}$ 。从精度性能调控方面看,对准系统、调平调焦系统与运动台系统需在高动态运动中实现测量数据的同步传输,其时间精度需达到 $10\ \text{ns}$ 。同时,调平调焦系统获得的硅片形貌信息要精准地映射到运动台系统,进而完成整机轨迹规划,由运动台快速精准调控实现对不平整硅片表面的信息补偿。从工艺参数性能调控方面看,光源与照明、物镜、运动台、光刻对准等分系统的协同更为紧密,整机软件需根据光源功率、物镜畸变、硅片形貌实时调整运动台轨迹。通过曝光剂量调控、运动补偿实现在给定工艺参数下的扫描曝光流程,最大限度地提高芯片良率。同时,环控分系统除了给其他分系统提供基础保障之外,也需紧密参与协同工作。例如,运动台分系统需根据温度、压力、湿度乃至流场的超精密测量数据调节光程信息;物镜分系统需根据温度、振动等超精密测量数据驱动内部可动镜组实现动态波相差调节。

2.5 测量仪器的计量校准与量值溯源

测量仪器是光刻机各环节性能指标量化的设备,测量仪器的准确性将直接决定光刻机各环节的性能指标。光刻机由几万至十几万个零件组成,涉及全球范围内的几千家供应商。为保证各个供应商之间产品的性能一致性与同类产品的互换性,国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)等有关组织机构制定了一系列标准与规范,依据这些标准与规范,把国际计量局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)建立的计量单位基准量值传递给测量仪器^[11],保证计量单位基准量值在全世界范围内准确一致,进而保证产品之间的性能一致性与同类产品的互换性。测量仪器只有在规定的时间周期内进行校准,方可确定测量仪器相应示值与测量标准提供的量值之间的确定关系,才能保证测量仪器的测量结果在一定范围内的准确性与可靠性。

测量仪器校准过程中的计量溯源链长短决定测量仪器的精度水平和效率。测量仪器校准过程中,如果能够直接溯源到国际单位制7个基本量定义,将是计量溯源链最短的校准过程,也将是精度等级最高的校准结果。因此,要提高光刻机全制造链、全产业链和全生命周期中专用超精密测量仪器的精度水平,应尽量采用计量溯源链最短的校准过程。特别是,超精密光刻机全生命周期中的部分关键核心指标已接近超精密装备现阶段工作精度与性能的极限,而其对应的测量仪器均为专用超精密测量仪器,其校准时需要直接向国际单位制7个基本量

定义溯源。只有这样才能确保其测量结果的准确度达到要求,进而保证光刻机工作状态下的精度与性能指标准确可靠。

3 光刻机产品精密测量能力提升的途径

光刻机产品精密测量能力快速提升的途径是,建立一个面向光刻机产业全制造链、全产业链和全生命周期,能全面有效监控产品质量的专业化超精密测量机构,同时建立能全面有效对所有超精密测量仪器、检测工装、嵌入式测量系统和传感器进行高效率计量校准的计量机构,这两个机构可以合二为一。这个合二为一的技术机构就是光刻机产业计量测试中心。

该中心的使命是,围绕光刻机产品全制造链、全产业链、全寿命周期的超精密测量与计量校准需求,将计量测试融入到光刻机设计、试验、生产、使用、维护等全过程,促进和保障光刻机产业高质量发展。该中心具有基础支撑性和技术先导性,即可起到光刻机零部件、分系统和整机产品质量检测与质量调控的基础保障作用;同时,充分发挥计量测试中心技术先导优势,可引领光刻机技术不断迭代与创新。

3.1 制造链上超精密测量能力建设

在光刻机零部件生产制造阶段,计量测试作为“工业生产的眼晴”,是实现制造工艺过程控制的技术基础。超精密测量能力与质量调控能力不仅影响着产品的质量,也影响着生产效益;即便是在原材料的制造过程中,超精密测量能力与质量调控能力同样会直接影响到原材料性能、质量与生产效益。以运动台分系统中的直线电机为例,其制造过程涉及磁钢的加工、充磁、装配、线圈绕制、胶封、装配、水冷板的加工、装配等复杂工序。为了保证直线电机的出力特性和热特性需求,在出厂前必须对电机的峰值力、持续力、波动力、表面温升及电磁辐射等指标进行精确测试,其中力值测量精度需达到 $0.5\ \text{N}$,温度精度需达到 $0.1\ \text{K}$ 。

由此可见,光刻机产业计量测试中心面向所有光刻机零部件超精密和超性能制造需求,能完成数以几十万计的几何学、电学、磁学、力学、热学、光学等各类物理参数和工程参数测量,建立功能完善、精确可靠的工业测量体系和计量校准体系,满足光刻机零部件生产制造质量与生产效益的需求。

3.2 产业链上产品超精密测量能力建设

在光刻机产业链方面,光刻机研制严重依赖如光源与照明、物镜等核心上游产品^[12]。以ASML为例,其供应商都是国际上相关产品质量顶尖的供应商。其中,镜头供应商为德国卡尔-蔡司;极紫外光源供应商为美国

Cymer(被ASML收购);机电设备供应商为美国Sparton;激光系统供应商为美国磁谷光刻;污染控制与先进材料供应商为美国Entegris公司;仪表和控制系统供应商为美国MKS Instruments公司;高阶线材、PCB与整机组装来自中国台湾信邦电子公司。其下游产业主要为芯片生产线。在晶圆刻蚀的工艺中,以及晶圆刻蚀完成后的工艺中,需要对晶圆进行多重多类检测,如膜厚检测、膜应力检测、关键尺寸检测、光刻机套刻精度检测、晶圆表面缺陷检测等^[13]。

为满足上投投影物镜产品系统性能的检测检验,需要研制专用测试平台,并考虑不同型号物镜的兼容性、集成与测试的便捷性。测试平台的测试流程主要包括物镜集成、系统整机上电、Set-up、波像差测试、畸变测试、NA测试、倍率测试、远心测试、透过率测试等。光刻机对投影物镜系统的波像差要求不断提高,从 $RMS=0.7\text{ nm}$ 到 $RMS=0.25\text{ nm}$,再到 $RMS=0.2\text{ nm}$ 。投影物镜畸变的峰谷(peak valley, PV)值需要控制在 0.7 nm 以内,畸变检测精度需要达到 0.1 nm ^[14]。专用物镜测试台的精度要求也不断提升。

光刻机产业计量测试中心面向国内外众多供应商提供的光机电控算各类产品的质量与性能需求,能完成数以几十万计的各类物理参数和工程参数测量,建立功能完善、精确可靠的检验检测体系和计量校准体系,具备对所有供应商提供的产品进行检验检测的能力。

3.3 光刻机产品在役测量能力建设

在光刻机在役使用阶段,用户将根据工艺制程参数对芯片量产的质量进行严格在线控制。这要求光刻机必须实时获得光刻机工作链上的无处不在的测量数据,再根据无处不在的精确测量数据进行闭环反馈控制,以确保无故障、高精度和高性能运行;同时,根据无处不在的精确测量数据,对光刻机各个分系统进行精度调控、性能调控和质量调控。

具体而言,光刻机整机会根据芯片制造的工艺制程,采用数字孪生技术建立芯片质量、产率与运行数据的映射模型^[15]。在此基础上一方面可以根据大数据分析结果进一步调控工艺制造参数,保证量产芯片的质量;另一方面,光刻机整机还可以对各分系统及关键零部件层开展健康监测,根据预先制定的故障处理机制及时对漂移类故障在役校准、补偿或修复,对确定性故障进行及时预警,确保光刻制程的产率、良率和安全性。

以运动台分系统为例,多自由度运动台中的多项几何参数、运动学参数、动力学参数和质量特性参数会在长时间工作过程中受振动冲击、外界力干扰和热力学干扰等的影响下发生漂移,导致运动台本身的测量解耦和出力分配精准度下降,进而影响运动精度以及芯片的特征尺寸。这就需要整机系统对相关数据进行实时监测,将

尺寸类参数在溯源至干涉仪测量系统的基础上适时的调整至出厂校准状态,确保光刻机的最佳性能。

光刻机产业计量测试中心面向光刻机全生命周期中对工作精度、性能和可靠性需求,能完成数以万计的在线工程参数测量,建立功能完善、精确可靠的嵌入式测量系统和嵌入式计量校准系统,实现处处精准,时时精准,满足对光刻机整机产品在线工作状态下的精准可靠测量与可靠运行的需求。

3.4 光刻机行业测量能力建设

光刻机测量体系建设是光刻机行业测量能力建设的首要任务^[16]。光刻机行业与各个领域的发展息息相关,我国的光刻机行业,特别是先进制程的光刻机行业,尚处于发展的初期,部分相关人员对测量体系对光刻机行业能力的提升与促进作用,还存在认识严重不足的问题。因此,要解决光刻机的精度提升、性能提升和质量提升问题,必须在其全制造链、全产业链的各个环节和全生命周期中建立起各自的测量体系,这是解决上述问题的核心与关键。光刻机行业的测量体系必须做到,在光刻机产品全制造链、全产业链的各个环节上和全生命周期中,“无处不测,无时不测;处处精准,时时精准”。

对光刻机工程测量仪器的计量校准能力建设是我国光刻机行业测量能力建设的另一重要任务^[17]。光刻机产品工程测量仪器包括实验室测量仪器、全制造链上的临床测量仪器、在线测量仪器;全产业链上的检验检测仪器;光刻机运行时的嵌入式测量仪器、处理单元和传感器系统等。所有这些数以万计的光刻机产品工程测量仪器构成了光刻机产业工程测量体系。另一方面,光刻机产品全制造链、全产业链、全生命周期中的各个环节所需要的所有工程测量仪器,均需保证其测量结果“处处精准,时时精准”。这些数以万计的光刻机产品工程测量仪器的测量准确度都必须由相对应的数以千计的计量校准仪器管控,所有这些数以千计的计量校准仪器构成了光刻机产业计量体系。上述两个体系构成了光刻机产业测量体系,或可称之为计量测试体系。

4 结 论

要想研制出合格的超精密光刻机,特别是批量生产出合格的超精密光刻机产品,就必须建立起超精密光刻机产业测量体系。该测量体系由两部分构成:一是能管控超精密光刻机产品制造质量的工业测量体系;二是能管控光刻机产品工业测量体系量值准确可靠的计量体系。

超精密测量是光刻机产品制造质量管控与质量提升的基石。当前,我国普遍关注光刻机核心技术短板,而忽视了建立超精密光刻机产业测量体系这一基础与前提条

件。建立超精密光刻机测量体系,必须把测量仪器、测量系统、传感测量系统和管控它们的的计量校准单元嵌入到超精密光刻机产品的制造链、产业链和运行中的光刻机产品中,实现“无处不测,无时不测;处处精准,时时精准”。

建设光刻机产业计量测试中心是建立超精密光刻机产业测量体系的技术、条件和设施保障。加快建设超精密光刻机产业计量测试中心是当务之急。

参考文献

- [1] 韦亚一. 超大规模集成电路先进光刻理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2016.
WEI Y Y. Advanced lithography theory and application for ultra-large scale integrated circuits [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] ASML EUV 工厂探秘, HigH NA EUV 光刻机首亮相[Z/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1728516668538457913&wfr=spider&for=pc>.
ASML EUV factory exploration, HigH NA EUV lithography machine debut [Z/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1728516668538457913&wfr=spider&for=pc>.
- [3] 赵元闯. 2022 年度全球光刻机市场[Z/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Ldt3H8L0U1SmL16YJ5Y4m>.
ZHAO Y CH. Global lithography market 2022 [Z/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Ldt3H8L0U1SmL16YJ5Y4m>.
- [4] 2022—2028 年中国光刻机产业竞争现状及市场发展策略报告[R]. 智研咨询,2022.
Report of competition status and market development strategy on china lithography machine industry (2022-2028) [R]. Intelligence Research Group, 2022.
- [5] 2022—2028 年中国光刻机产业发展态势及投资决策建议报告[R]. 智研咨询,2022.
Report of development trend and investment decision suggestions on china lithography machine industry [R]. Intelligence Research Group, 2022.
- [6] DINGER U, EISERT F, LASSER H, et al. Mirror substrates for EUV lithography: Progress in metrology and optical fabrication technology [C]. Proc. SPIE, 2000, 4146: 35-46.
- [7] BUTLER H. Position control in lithographic equipment: An enabler for current-day chip manufacturing[J]. IEEE Control Systems, 2011, 31(5): 28-47.
- [8] 吴飞, 王茜, 袁志扬, 等. 光刻机多面体主基板的设计与算法[J]. 中国机械工程, 2013, 24(9): 1164.
WU F, WANG Q, YUAN ZH Y, et al. Design and algorithm for polyhedron metro frame of lithographic machine [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(9): 1164.
- [9] 闻荣伟, 谭久彬. 光学仪器隔微振系统的负刚度特性分析与验证[J]. 光电子·激光, 2013, 24(12): 2355-2359.
WEN R W, TAN J B. Negative stiffness characteristic analysis and verification of optical instruments damping system [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(12): 2355-2359.
- [10] 刘杨, 李理, 陈思文, 等. 面向 IC 光刻的超精密运动台控制技术[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922013.
LIU Y, LI L, CHEN S W, et al. Ultra-precision motion stage control technology for IC lithography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922013.
- [11] QUINN T. From artefacts to atoms: The BIPM and the search for ultimate measurement standards [M]. Oxford University Press, 2011.
- [12] 陈修国, 王才, 杨天娟, 等. 集成电路制造在线光学测量检测技术: 现状、挑战与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922025.
CEHN X G, WANG C, YANG T J, et al. Inline optical measurement and inspection for IC manufacturing: State-of-the-art, challenges, and perspectives [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922025.
- [13] 卢荣胜, 吴昂, 张腾达, 等. 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815002.
LU R SH, WU ANG, ZHANG T D, et al. Review on automated optical (visual) inspection and its applications in defect detection [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815002.
- [14] OHMURA Y, TSUGE Y, HIRAYAMA T, et al. High-order aberration control during exposure for leading-edge lithography projection optics [C]. Optical Microlithography XXIX. SPIE, 2016, 9780: 98-105.
- [15] 宋学官, 来孝楠, 何西旺, 等. 重大装备形性一体化数字孪生关键技术[J]. 机械工程学报, 2022,

58(10): 298-325.

SONG X G, LAI X N, HE X W, et al. Key technologies of shape-performance integrated digital twin for major equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(10): 298-325.

- [16] 谭久彬. 超精密测量技术与仪器是高端制造发展的前提与基础[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 0312001.

TAN J B. Ultra-precision measurement technology and instruments are the prerequisite and foundation for the development of high-end manufacturing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 0312001.

- [17] 雷源忠. 我国机械工程研究进展与展望[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 1-11.

LEI Y ZH. Recent research advances and expectation of

mechanical engineering science in China[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 1-11.

作者简介



谭久彬(通信作者),2017年当选中国工程院院士,现为哈尔滨工业大学精密仪器工程研究院院长,主要研究方向为超精密测量与仪器工程。

E-mail: jbtan@hit.edu.cn

Tan Jiubin (Corresponding author) was elected as a member of the Chinese Academy of Engineering in 2017. He is currently the director of Precision Instrument Engineering Research Institute, Harbin Institute of Technology. His main research interests include the ultra-precision measurement and the instrumentation engineering.