

纳米长度溯源链融合计量研究

张玉杰^{1,2}, 雷李华^{1,2}, 管钰晴^{1,2}, 刘丽琴^{1,2}, 郭创为^{1,2}, 谢张宁^{1,2}, 徐瑞书^{1,2},
梁利杰^{1,2}, 李 强³, 凌 刚^{1,2*}

- (1. 上海市计量测试技术研究院, 上海 201203;
2. 上海市在线检测与控制技术重点实验室, 上海 201203;
3. 航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘 要: 为了更好地研究量子扁平化的溯源体系, 提出一种纳米长度溯源链融合计量的方法。溯源性是纳米测量中的基础性问题, 多种溯源途径与测量方法的融合测量已经成为未来微纳结构测量的趋势。建立“自上而下”型和“自下而上”型溯源相融合测量体系, 需要确保两种溯源体系之间的测量准确性、等效性与可比性。利用激光会聚原子沉积技术与软 X 射线干涉光刻技术相结合的方式, 制作直接溯源至原子跃迁频率的光栅, 理论准确性可达到 0.001 nm 量级, 在保证准确性极高的同时也在其整体结构面积内均能保持良好均匀性。通过制作高精度的小尺寸光栅作为两条溯源链的比对载体, 有效规避以线宽为载体时产生的误差来源。文中利用基于原子光刻-软 X 射线干涉光刻制备的 53.2 nm 硅光栅作为有效载体, 提升自上而下的计量型原子力显微镜测量水平以及自下而上的基于硅晶格常数测量的准确性, 提升国内“自上而下”型和“自下而上”型溯源的测量准确性、等效性与可比性水平。

关键词: 融合计量; 自溯源光栅; 纳米溯源链; 硅晶格常数

中图分类号: TB96 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20250074

引用格式: ZHANG Yujie, LEI Lihua, GUAN Yuqing, et al. Fusion metrology of nano-length traceability chain[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(5): 20250074.

张玉杰, 雷李华, 管钰晴, 等. 纳米长度溯源链融合计量研究[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(5): 20250074.

0 引 言

纳米科技是创新制造技术的主要途径。世界各国都在加强纳米制造的基础和应用研究, 如德国的工业 4.0、美国的“制造业复兴”计划等, 力求在世界科技经济格局中处于领先地位。而纳米制造已成为国家战略和新兴产业的制高点, 对国家安全和国民经济建设具有重大推动作用。

纳米制造, 测量先行。纳米测量的准确性和一致性直接影响纳米加工制造的精度和准确度, 是纳米制造的基础性支撑。纳米测量不仅是表征纳米材料和器件从而确保器件性能的基础, 同时在纳米加工工艺

控制和质量管理领域也扮演着重要角色, 是集成电路、超精密加工、纳米机械、纳米医学、纳米生物学等领域中不可避免的关键科学和技术问题^[1]。溯源性是纳米测量中的基础性问题^[2], 多种溯源途径与测量方法的融合测量已经成为未来微纳结构测量的趋势。建立“自上而下”型和“自下而上”型溯源相融合测量体系, 需要确保两种溯源体系之间的测量准确性、等效性与可比性。纳米测量要求通过一条连续的、不间断的长度溯源链连接到“米”定义^[3], 溯源链的缺失或者长度量值传递过程中的误差积累会导致纳米测量仪器的测量准确性、一致性和可比性降低, 从而限制了纳米制造的发展^[4]。溯源链方式的创新和

收稿日期: 2025-01-23; 修订日期: 2025-02-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFF0619901); 国家自然科学基金项目 (52475563); 上海市创新行动计划项目 (24ZR1492200); 计量与校准技术重点实验室基金项目 (JLKG2024001B001)

作者简介: 张玉杰, 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事精密几何量计量方面的研究。

通讯作者: 凌刚, 男, 工程师, 硕士, 主要从事计量测试技术方面的研究。

合理运用可有效地提升纳米测量的准确性和一致性。

在微纳结构测量定值方面,多种溯源途径与测量方法的融合测量已经成为未来测量的趋势。2018年,美国国家标准与技术研究院(NIST)的Dr ORJI N G博士在Nature Electronics撰文指出,随着摩尔定律往10 nm以下演进,以线宽测量为例,单一的计量测试方法难以提供准确的结构信息,必须依赖于多种测量方法(如扫描电镜测量法^[5]、光散射测量法^[6]、小角度X射线测量^[7])和溯源途径(计量型原子力法和透射电镜测量法)的充分结合^[8]。更为重要的是,2019年,国际计量大会通过了关于“修订国际单位制(SI)”的1号决议,在纳米长度溯源,建议采用国际科学技术数据委员会(CODATA)数据库的、22.5 °C 真空环境下硅晶格220方向的晶面间距 $d_{220}=192.015\ 571\ 4\times 10^{-12}\text{ m}$ ^[9],作为“米”定义的补充复现方法,这为纳米测量的“自下而上”型(Bottom-up Approach)溯源提供了国际指导性意见。微纳尺度“米”定义的复现方式和量值传递的重要变化正在对先进制造产生深远影响^[10-12]。国际权威计量机构和国美一些高等院校已经在两种溯源链条之间的等效性比对方面布局研究,其中包括PTB、NIST、中国计量科学研究院、国家纳米科学中心、同济大学^[13-14]等。

基于以上情况,文中提出使用原子光刻与软X射线干涉光刻相结合的倍频硅光栅作为比对载体开展纳米长度溯源比对的思路,有效地规避以线宽为载体进行比对所存在的误差来源,提升国内“自上而下”型和“自下而上”型溯源的测量准确性、等效性与可比性水平至少一个数量级,基于此研究可以促进测量溯源链比对的载体创新。因此文中重点开展基于原子光刻技术的光栅比对载体的研究,基于高精度、小尺寸的光栅比对载体对两种溯源链等效性和一致性水平进行分析。

1 基于原子光刻技术的光栅比对载体

1.1 激光会聚原子沉积技术

原子光刻是一种激光会聚原子沉积光栅的技术,是研制自溯源光栅的有效途径,自溯源光栅的特征参数(如周期)可以直接溯源到某些天然基准,具有极高的纳米测试应用价值。图1为铬原子光刻技术的原理图。具体地,选取铬原子跃迁频率($^7\text{S}_3\rightarrow^7\text{P}_4$)作为

自然基准,将激光波长严格锁定在与该跃迁频率对应的波长(425.55 nm)上,使准直铬原子束正交地通过上述波长激光相向而行构成的驻波场沉积到基板上,铬原子被会聚到与驻波场对应的波腹或波节位置,在基板上形成周期性平行光栅结构。铬原子光刻可看做是铬原子跃迁频率严格对应波长的“物化”,光栅周期严格溯源于原子跃迁频率对应波长的一半(212.8 nm,即4700线/mm),具备自溯源特征。一维铬原子光刻光栅理论平均周期值为 $(212.770\ 5\pm 0.004\ 9)\text{ nm}$,理论准确性可达到0.001 nm量级,准确性极高,且在其整体结构面积内均能保持良好的均匀性。

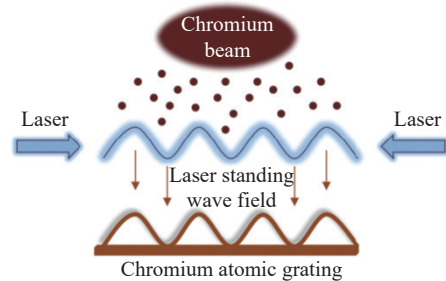


图1 铬原子光刻技术原理图

Fig.1 Schematic diagram of chromium atomic lithography technique

1.2 原子光刻-软X射线干涉光刻技术

基于原子光刻技术研制的光栅标准物质周期一般与中性原子跃迁频率相对应,光栅周期为固定值。随着半导体行业的Scaling down的持续推进,研制更小尺度的光栅标准物质成为新的需求。基于以上需求,为了保证良好的光栅一致性,上海市计量测试技术研究院与同济大学合作研发出了一种采用原子光刻技术与软X射线干涉光刻(Soft X ray interference lithography, XIL)相结合的方式研制更小尺度的光栅标准物质。软X射线干涉光刻的核心原理为:第 m 级衍射光干涉光场周期为掩模版节距的 $1/2m$, ± 1 级和 ± 2 级衍射光干涉制备的光栅节距分别为掩模版节距的 $1/2$ 和 $1/4$ 。

通过原子光刻技术与软X射线干涉光刻技术相结合的方式,基于铬原子自溯源光栅,制作出光栅间距为铬原子自溯源光栅 $1/2$ 的更小尺度光栅标准物质。其制作过程为:将相干EUV光束垂直入射至掩膜光栅(铬原子自溯源光栅)上发生衍射现象,衍射方程可表示为:

$$d_0 \cdot \sin\theta = m \cdot \lambda_{\text{EUV}} \quad (1)$$

式中: d_0 为铬原子自溯源光栅的光栅间距; λ_{EUV} 为入射相干 EUV 光束的波长; m 为衍射级次; θ 为相应衍射级次对应的衍射角。铬原子自溯源光栅的 1 级衍射光在空间发生干涉, 干涉条纹对光刻胶进行曝光, 经显影工艺后得到光刻胶光栅结构, 通过刻蚀工艺将光栅图案转移到硅衬底上, 在硅衬底上形成的光栅间距由干涉条纹图案的周期决定, 其方程可表示为:

$$d = \frac{\lambda_{\text{EUV}}}{2\sin\theta} \quad (2)$$

式中: d 为硅衬底上形成的光栅间距; λ_{EUV} 为入射相干 EUV 光束的波长; θ 为相应衍射级次对应的衍射角。将公式 (1) 和公式 (2) 相结合可得:

$$d = \frac{d_0}{2m} \quad (3)$$

通过公式 (3) 可以看出, 硅衬底上形成的光栅间距值由掩膜光栅铬原子自溯源光栅的光栅间距和衍射光的衍射级次决定, 与入射 EUV 光束的波长无关, 由于高衍射级次的衍射效率不高, 故选用第一级衍射。相干 X 射线光源的入射光是近平行光, 发散角小于 1 mrad, 波长范围 1~20 nm, 掩膜版节距值大于光源波长 3 倍; 使用的光刻胶为 PMMA、HSQ、ZEP 或者其他灵敏度较高的光刻胶, 通常选择 PMMA 光刻胶, 可使用旋转涂胶的方式涂在衬底上, 该衬底材料可以是 Si₃N₄、Si、Cr、Mo 等, 通常选择 Si。制作出的硅光栅的光栅间距值为掩膜光栅铬原子自溯源光栅间距值的 1/2, 为 106.4 nm。

值得一提的是, 衍射光干涉光场周期仅与掩膜版光栅节距有关, 与其他因素如软 X 射线波长等均无关。由于原子光刻过程可以认为是与 Cr 跃迁谱线严格对应的激光驻波场周期被“物化”为自溯源光栅结构, 而 XIL 过程可以认为是掩膜版节距“物化”为倍频的自溯源光栅结构。因此, 通过原子光刻技术与 XIL 相结合, 选用的 Cr 跃迁谱线 ($^7\text{S}_3 \rightarrow ^7\text{P}_4$, 425.6 nm) 自溯源特性会通过“Cr 跃迁谱线→原子光刻→Cr 自溯源光栅→XIL→自溯源光栅→XIL→自溯源光栅...”的顺序逐级传递, 制备光栅节距逐渐缩小的同时依然保持自溯源特性, 其中采用二级衍射光进行干涉光刻, 可以实现亚 100 nm 范围一维自溯源光栅 (53.2 nm) 的研制。

2 “自上而下”型和“自下而上”型溯源链等效性研究

纳米长度测量溯源链一般有两种实现方式: “自上而下”型 (Top-down Approach) 溯源和“自下而上”型 (Bottom-up Approach) 溯源。如图 2 所示, “自上而下”型溯源, 一般指的是通过激光干涉仪溯源到“米”定义。以计量型原子力显微镜 (AFM) 为例, 纳米结构的测量通过扫描头的位移实现, 而扫描头位移通过频率被稳频激光或者光梳校准过的激光干涉仪测量来完成, 从而实现了纳米结构测量溯源到“米”定义。“自下而上”型溯源, 一般指的是通过硅晶格常数来溯源到“米”定义。具体地, 在纳米测量过程中, 通过选用合适的硅晶向, 使用硅晶格常数直接对纳米结构进行比对测量定值。

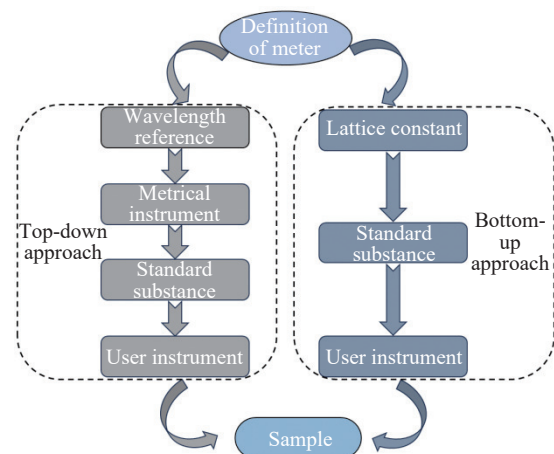


图2 “自上而下”型和“自下而上”型纳米长度溯源链

Fig.2 "Top-down" and "bottom-up" nano-length traceability chains

国际权威计量机构和国内一些高等院校已经在两种溯源链条之间的等效性比对方面布局研究, 其中包括 PTB、NIST、中国计量科学研究院、国家纳米科学中心、同济大学等。目前比对载体一般为线宽结构, 但由于受线宽边缘和探针效应限制, 比对最佳一致性水平停留在 0.3 nm 左右。高精度的小尺寸光栅可以有效地规避以线宽为载体进行比对所存在的误差来源, 从而提升两种溯源链的比对准确度。而铬原子光刻与软 X 射线干涉光刻技术相结合产生的倍频光栅为实现以光栅为载体的溯源链比对提供了新的机遇。2020 年, 同济大学李同保院士课题组创新的提

出将 212.8 nm 铬原子光刻光栅进行软 X 射线干涉光刻倍频, 实现了周期为 106.4 nm 和 53.2 nm 硅光栅的研制^[15]。该光栅的成功研制奠定了该研究进行以超精密光栅作为比对载体的研究基础。

以线宽为载体的溯源链比对水平受线宽边缘和探针效应的限制, 导致比对准确性水平遭遇瓶颈。图 3(a) 为以线宽为比对载体时测量图像的轮廓及关键参数对比图。以线宽为载体时, 存在以下问题难以解决: 1) 在“自下而上”型溯源中, 线宽左右两侧存在氧化层, 这会引入在确定线宽边界时的困难和人为误差, 导致不确定度降低, 这已经成为溯源链比对误差的主要来源; 2) 在“自上而下”型溯源链中, 所使用的方法为计量型 AFM, 由于探针和线宽结构的相互作用, 带来线宽的展宽 (“膨胀效应”), 即使使用图像重建技术也无法难以彻底消除, 同样带来了溯源链比对误差的增大。因此, 亟需寻求新的比对载体作为突破口来提升溯源链比对的准确性水平。

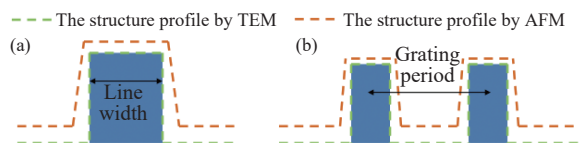


图3 以线宽和光栅分别为比对载体时测量图像的轮廓及关键参数对比图

Fig.3 The line width and grating are used to compare the contours and key parameters of the measured images when comparing the carriers, respectively

高精度的小尺寸光栅可以有效地规避以线宽为载体进行比对所存在的误差来源, 从而提升两种溯源链的比对准确度。图 3(b) 为以光栅为比对载体时测量图像的轮廓及关键参数对比图。具体地, 以光栅进行比对有以下优势: 1) 光栅进行量值比对时使用的关键参数为光栅的周期, 一般以相邻线宽部分的重心作为参考点作为特征点, 该特征点的选取是整个线宽结构的平均值, 相比于人为确定单侧线宽边缘来讲, 误差大大降低; 2) 同理, 由于光栅周期确定时使用的是相邻线宽的等效重心的间距, 那么每个线宽和探针结构带来的“膨胀效应”相互抵消, 从而将探针带来的展宽误差基本消除。

必须明确指出的是, 以光栅为载体进行溯源链比

对必须要求光栅具有以下两个方面的关键特征: 1) 高精度; 2) 小尺寸。一方面, 要求光栅精度极高 (即不确定度极小)。德国 PTB 的溯源链比对水平在 0.3 nm 左右, 因此要求光栅作为载体时其周期不确定度至少比 0.3 nm 小一个数量级 (最好能达到皮米量级), 否则光栅自身即是较大的误差来源; 另一方面, 要求光栅周期尺寸较小。因为“自下而上”型溯源使用的是透射电子显微镜, 其达到较好的原子级成像分辨率要求成像尺度在 50 nm 及以下, 因此, 50 nm 左右周期的光栅尺寸是必须的。国际上目前已知的最小尺度计量标准光栅周期为 70 nm, 其不确定度为 0.027 nm^[16], 无法同时满足上述要求。高精度小尺寸计量标准光栅的缺乏导致以光栅为载体进行溯源链比对的研究思路长期未被提出。

铬原子光刻与软 X 射线干涉光刻技术相结合产生的倍频光栅为实现以光栅为载体的溯源链比对提供了新的机遇。铬原子光刻通过选取铬跃迁频率作为自然基准, 将激光波长严格锁定在与该跃迁频率对应的波长 (425.55 nm) 上, 使铬原子正交地通过上述波长相互对射形成的驻波场沉积到基板上, 汇聚到与驻波场对应的波腹或波节位置, 在基板上形成周期性的高度平行的光栅结构。一维铬原子光刻光栅理论平均周期值为 $(212.770\,5 \pm 0.004\,9)$ nm, 准确性极高。软 X 射线干涉光刻通过使用通过光栅掩膜版的衍射光进行干涉曝光, 可以对掩膜版进行二分之一倍频和四分之一倍频。同济大学、中国计量科学研究院、中国科学院上海应用物理所已经联合申请该光栅获批成为国家一级标准物质 (一维硅纳米光栅标准物质, GBW13983)。目前, 由于 53.2 nm 硅光栅的研制和 106.4 nm 硅光栅的差别仅在于选用的 X 射线衍射级次的差异, 可以预测的是, 53.2 nm 硅光栅的周期误差同样处于皮米量级。因此, 基于原子光刻与软 X 射线干涉光刻制备的 53.2 nm 硅光栅满足为两种溯源链比对提供载体的核心要求。

3 “自上而下”型和“自下而上”型溯源链一致性水平分析

建立“自上而下”型溯源和“自下而上”型溯源融合测量体系, 需要确保两种溯源体系之间的测量准确性、等效性与可比性。国际权威计量机构和高等院

校已经在两种溯源链条之间的等效性比对方面布局研究,其中包括德国联邦物理技术研究院 (PTB)、NIST、中国计量科学研究院、国家纳米科学中心、同济大学等。目前选用的比对载体一般为线宽结构,以德国 PTB 为例,他们通过使用计量型 AFM 和透射电镜 (TEM) 对多种量值的线宽结构进行测量,指出两种溯源方式在线宽测量结果高度相符,一致性水平在 0.3 nm 左右。

“自上而下”型溯源-计量型原子力显微镜测量线宽。计量型原子力显微镜具有高分辨三维测量能力,在半导体计量领域有着广泛的应用。纳米结构的测量通过扫描头的位移实现,而扫描头位移通过频率被稳频激光或者光梳校准过的激光干涉仪测量来完成,从而实现了纳米结构测量溯源到“米”定义。

“自下而上”型溯源-基于硅晶格常数的纳米线宽测量。国际长度咨询委员会 (Consultative Committee for Length, CCL) 在 2019 年将 Si 晶格间距作为“米”的定义在纳米尺度下的复现方法,此举为纳米线宽测量校准提供了新的方向和技术支撑。根据精确的 X 射线测量,单晶硅 (111) 中的间距为 313.560 11 pm,利用透射电子显微镜 (Transmission Electron Microscope, TEM, 简称“透射电镜”) 的高分辨率对线宽和单晶硅进行同时成像,以硅晶格常数为基本刻度实现纳米线宽原子级准确度测量。其中,线宽校准方法如图 4 所示,当线宽样品为单晶样品时,采用图 4(a) 所示的直接溯源法,直接使用内部的硅晶面间距信息进行自溯源测量;当线宽样品为无定形硅材料时,不具备硅晶面信息,采用图 4(b) 所示的比较溯源法,采用同一帧 TEM 图像中基底的硅晶面间距信息进行测量。

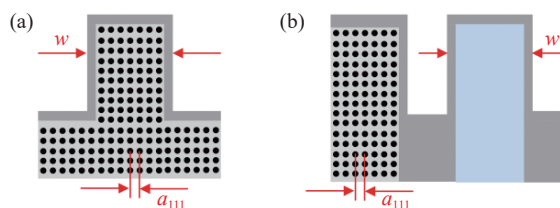


图 4 基于硅晶面间距的线宽校准方法。(a) 直接溯源法; (b) 比较溯源法

Fig.4 Linewidth calibration method based on silicon crystal plane spacing. (a) Direct traceability method; (b) Comparative traceability method

“自上而下”型和“自下而上”型溯源链间的测量误差传递和数据融合规律是提升两种溯源链比对等效性水平的关键科学问题。一方面,量值传递过程也是误差传递和积累过程,误差水平的高低决定了量值传递的成败。通过分析两种误差传递过程中的误差来源与传递规律,建立规避和降低误差积累的策略,可以有效提升每条溯源链的准确性水平。另一方面,两种溯源链比对的结果是实现不同溯源链的测量数据融合和综合利用,为纳米结构的关键参数测量定值服务。通过明确溯源链之间的数据融合规律,评估测量数据的有效性水平,选用合理测量数据进行使用并修正数据融合过程,从而实现融合测量的准确度协同提升。

在国内开展基于光栅的纳米长度溯源链等效性比对的研究条件和基础基本具备。在“自上而下”溯源方面,上海市计量测试技术研究院、中国计量科学研究院和航空工业北京长城计量测试技术研究所等均拥有计量型原子力显微镜,可以为实现“自上而下”溯源提供仪器支撑和多单位比对保障。在“自下而上”溯源方面,上海市计量测试技术研究院与同济大学已经联合研制出国际上尺度最小的周期为 53.2 nm 的硅单晶光栅,预期周期不确定度在 pm(0.001 nm) 量级,这为实现两种溯源链的等效性比对提供了良好的载体保障。同时,未来 26.6 nm 的硅单晶光栅的研制成功使比对研究更加丰富。

4 结 论

基于国际上量值传递扁平化的趋势,面向微纳结构测量定值对融合测量的需求,文中在基于原子光刻技术制作的光栅基础上将软 X 射线干涉光刻技术与其相结合,制作出可以用作纳米长度溯源链融合计量的光栅对比载体,提出使用原子光刻与软 X 射线干涉光刻相结合的倍频硅光栅作为比对载体开展纳米长度溯源链的比对新思路,有效提升国内“自上而下”型和“自下而上”型溯源的测量准确性、等效性与可比性水平。上海市计量测试技术研究院的计量型仪器以及与合作研发的小尺寸光栅奠定了文中思路的可行性。文中提到的纳米长度溯源链融合计量成功实施对于建立多种溯源途径与测量方法相融合测量体系、提升国内先进纳米制造水平均具有重要奠

基础性意义。

参考文献:

- [1] 李同保. 纳米计量与传递标准 [J]. *上海计量测试*, 2005, 32(1): 6.
- [2] DAI G, KOENDERS L, FLUEGGE J, et al. Two approaches for realizing traceability in nanoscale dimensional metrology [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(9): 091407.
- [3] GAO S T. Research on metrological atomic force microscopy investigate[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [4] BOSSE H, BODERMANN B, DAI G, et al. Challenges in nanometrology: high precision measurement of position and size [J]. *Technisches Messen*, 2015, 82(7-8): 2.
- [5] KAWADA H, KE C M, CHENG Y C, et al. Methodologies for evaluating CD-matching of CD-SEM[C]//Proceedings of SPIE, 2009, 72720: 72720Y.
- [6] BODERMANN B, HEIDENREICH S, PROBST J, et al. OCD metrology for advanced lithography[C]//International Conference on Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics, 2017.
- [7] BERNADO P, MYLONAS E, PETOUKHOV M V, et al. Structural characterization of flexible proteins using small-angle X-ray scattering. [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, 129(17): 5656-5664.
- [8] ORJI N G, BADAROGLU M, BARNES B M, et al. Publisher correction: Metrology for the next generation of semiconductor devices [J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(12): 662.
- [9] MOHR P J, NEWELL D B, TAYLOR B N, et al. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014 [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2016, 88(3): 035009.
- [10] STOCK M, DAVIS R, MIRANDÉS E De, et al. The revision of the SI—the result of three decades of progress in metrology [J]. *Metrologia*, 2019, 56: 022001.
- [11] FANTON J P. A brief history of metrology: Past, present, and future [J]. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2019, 10(5): 8.
- [12] BROWN R J C. Evolution of the international system of units: considering the challenge of user adoption [J]. *Metrologia*, 2020, 57(2): 023001.
- [13] WU Z, CAI Y, WANG X, et al. Amorphous Si critical dimension structures with direct Si lattice calibration [J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(3): 030601.
- [14] DIXSON R G, GUTHRIE W F, ALLEN R A, et al. Process optimization for lattice-selective wet etching of crystalline silicon structures [J]. *Journal of Micro/Nanolithography Mems & Moems*, 2016, 15(1): 014503.
- [15] LIU J, ZHAO J, DENG X, et al. Hybrid application of laser-focused atomic deposition and extreme ultraviolet interference lithography methods for manufacturing of self-traceable nanogratings [J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(17): 175301.
- [16] DIXSON R, CHERNOFF D A, WANG Shihua, et al. Multilaboratory comparison of traceable atomic force microscope measurements of a 70 nm grating pitch standard [J]. *Journal of Micro/Nanolithography*, 2011, 10(1): 13015.

Fusion metrology of nano-length traceability chain

ZHANG Yujie^{1,2}, LEI Lihua^{1,2}, GUAN Yuqing^{1,2}, LIU Liqin^{1,2}, GUO Chuangwei^{1,2}, XIE Zhangning^{1,2},
XU Ruishu^{1,2}, LIANG Lijie^{1,2}, LI Qiang³, LING Gang^{1,2*}

(1. Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Online Test and Control Technology, Shanghai 201203, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, AVIC, Beijing 100095, China)

Abstract:

Objective In terms of micro-nano structure measurement and determination, the fusion measurement of multiple traceability methods and measurement methods has become a trend of future measurement. Taking linewidth measurement as an example, it is difficult for a single metrological measurement method to provide accurate structural information, and it must rely on the full combination of multiple measurement methods (such as scanning electron microscopy measurement, light scattering measurement, and small-angle X-ray

measurement) and traceability methods (metrological atomic force method and transmission electron microscopy measurement). The comparison level of the traceability chain with line width as the carrier is limited by the line width edge and the probe effect, which leads to the bottleneck of the comparison accuracy. Therefore, it is urgent to seek new alignment carriers as a breakthrough to improve the accuracy of traceability chain alignment. The idea of using a frequency-doubling silicon grating combining atomic lithography and soft X-ray interference lithography as the comparison carrier to carry out nano-length traceability comparison was proposed.

Methods A smaller-scale grating reference material with a grating spacing of $1/2$ of the chromium atom self-traceable grating is developed based on the combination of atomic lithography and soft X-ray interferometric lithography, which can be directly traced to the wavelength corresponding to the atomic transition frequency and has the characteristics of self-traceability. Based on the characteristics of high precision and small size, it can be used as a comparison carrier, and the fusion measurement of nano-length traceability chain is proposed, which can effectively improve the measurement accuracy, equivalence and comparability of "top-down" and "bottom-up" traceability in China by studying the data fusion law between "top-down" and "bottom-up" traceability chains.

Results and Discussions The high-precision small-size grating can effectively avoid the error source of comparison with line width as the carrier (Fig.3), so as to improve the comparison accuracy of the two traceability chains. A new method for fusion metrology of nano-length traceability chain is proposed by using the frequency-doubling grating generated by the combination of chromium atom lithography and soft X-ray interferolithography as the carrier (Fig.1). The traceability chain comparison with the grating as the carrier satisfies the two necessary conditions of high precision and small size, and the accuracy of fusion measurement can be effectively improved through the study of measurement error transmission and data fusion law.

Conclusions On the basis of the grating made based on atomic lithography technology, the soft X-ray interferometric lithography technology is combined with the grating technology to produce a grating comparison carrier that can be used as the fusion measurement of nano-length traceability chain, and a new idea of using a frequency-doubling silicon grating combined with atomic lithography and soft X-ray interferometric lithography as a comparison carrier to carry out the comparison of nano-length traceability chain is proposed, which can effectively improve the measurement accuracy, equivalence and comparability level of "top-down" and "bottom-up" traceability in China. The successful implementation of the fusion measurement of nano length traceability chain mentioned in this paper is of great foundational significance for establishing a measurement system that integrates multiple traceability pathways and measurement methods and improving the level of advanced nano manufacturing in China.

Key words: fusion metering; self-traceable gratings; nano traceability chain; silicon lattice constant

Funding projects: National Key Research and Development Program (2024YFF0619901); National Natural Science Foundation of China (52475563); Shanghai Innovation Action Plan (24ZR1492200); Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory (JLKG2024001B001)