

基于量子技术的原子沉积光栅的研究进展与典型应用

雷李华^{1,2}, 梁利杰^{1,2}, 邓 晓^{3*}

- (1. 上海市计量测试技术研究院, 上海 201203;
2. 上海在线检测与控制技术重点实验室, 上海 201203;
3. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于量子基准的精密测量技术建立在量子力学原理上, 以超越经典方法的测量精度, 成为现代科技发展的重要推动力。铬原子光刻光栅基于冷原子量子态的操控技术而制备, 是精密测量领域的关键元件, 其制备技术与应用研究备受关注。其可作为纳米级长度标准物质, 实现微纳尺度高精密度检设备的长度溯源。文中分析了铬原子光刻光栅的制备原理; 综述了国内外原子光刻光栅的研究现状及其在几何量精密测量中的应用, 并探讨了未来的发展方向, 以提升铬原子光刻光栅在计量领域的应用水平。

关键词: 光栅标准物质; 原子光刻; 原子跃迁频率; 量子基准

中图分类号: TB9;TB921 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240443

0 引言

2018 年第 26 届国际计量大会正式通过决议, 2019 年 5 月 20 日开始实施基于基本物理常数的国际基本单位的新定义, 标志着精密测量正式全面步入量子时代^[1]。2022 年 1 月, 国务院印发的《“十四五”市场监管现代化规划》, 明确提到要建立以量子计量为核心的国家现代先进测量体系, 要研建量子计量基准, 研究基于量子效应和物理常数的量子计量技术, 推进计量基标准体系的升级换代。

基于量子基准的精密测量技术基于量子力学基本原理, 依据粒子能级跃迁、量子纠缠与相干等量子现象, 精准操控原子、光子等微观粒子的量子态, 实现磁场、频率、电场、时间、长度等关键物理参数突破海森堡极限的极致精度测量^[2]。随着各国聚焦于高端芯片领域, 基于量子基准的精密测量技术正迈向芯片化新纪元, 旨在通过量子效应构建芯片级计量基标准, 为传感器与测量仪器的校准带来前所未有的精确性。

基于国际单位制基本单位, 利用量子系统、量子特性或量子现象复现测量单位量值或实现直接溯源到基本物理常数的测量便是量子计量。传统计量体系是通过国家基准溯源至测量单位定义的量值复现, 实现量值传递以保证测量结果可靠一致^[3-4]。以纳米级长度溯源体系为例 (图 1 蓝线所示), 虽然目前带有激光干涉仪的计量型纳米测量仪 (Scanning Probe Microscope, SPM) 测量准确性在纳米量级, 但是现行量值传递链的最大短板在于纳米尺度的标准样板这一关键环节。纳米尺度的标准样板主要存在以下问题: 1) 样板需逐步计量定值; 2) 样板特征参数误差较大, 如线边缘粗糙度较大形成周期误差; 3) 样板均匀性欠佳。综上, 现有纳米尺度标准样品的结构准确性、一致性和均匀性问题是限制纳米测量溯源链的关键技术之一。

基于量子效应的纳米长度标尺——原子光刻光栅, 其栅距溯源于原子跃迁频率, 可直接用于仪器校准而不再依托计量型仪器定值, 有效缩短纳米长度计量溯源链。如图 1 红线所示, “计量单位量子化”颠覆

收稿日期: 2024-06-20; 修订日期: 2024-09-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFF0603300); 计量与校准技术实验室基金项目 (JLKG2024001B001); 国家市场监督管理总局科技计划项目 (2023MK025)

作者简介: 雷李华, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事纳米计量方面的研究。

通讯作者: 邓晓, 男, 副教授, 博士, 主要从事纳米光栅标准物质、线宽标准物质、超精密测量及校准技术方面的研究。

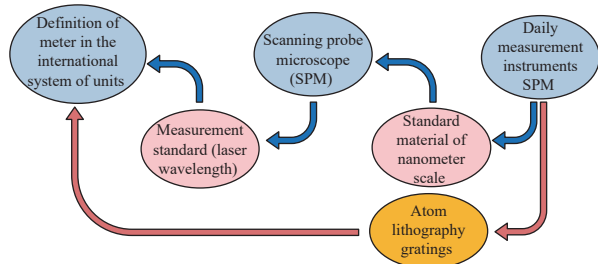


图 1 纳米级长度溯源体系

Fig.1 Nano-length traceability system

了传统逐级传递的量传体系,通过采用量子计量基准,大幅提高量值复现准确度与稳定性,可在任意时刻、任意地点、由任意主体复现量值,实现扁平化溯源。

原子光刻光栅准确性高达亚纳米量级,具有良好的的一致性,可实现批量制备,在纳米级长度计量体系的建立、量子精密测量、仪器校准等领域具有良好的应用前景。文中将重点从原子光刻光栅的制备技术、研究现状以及应用三个方面进行综述,首先基于相关的量子技术,分析原子光刻光栅的制备原理和制备过程,随后详述国内外对于原子光刻光栅制备的研究进展,最后介绍原子光刻光栅在仪器校准、超精密位移测量、光栅栅距标定以及纳米位移台校准中的典型应用。

1 基于量子方法的原子光刻光栅制备技术

1.1 制备原理

原子光刻光栅是基于量子技术,采用原子光刻技术制备,光栅节距可直接溯源于特定的自然界物理能级-铬原子的跃迁能级 $7S^3 \rightarrow 7P^4$ 。该光栅理论上无需经过计量仪器的测量定值便可作为标尺使用,原子光刻光栅的准确度可以达到皮米量级,可达到最先进的带有激光干涉仪的计量型纳米测试仪器的精度。

原子光刻技术^[5]又称为激光汇聚原子沉积技术,基本原理是通过激光与原子相互作用产生自发辐射力和偶极力,从而实现激光对原子运动轨迹的操纵。自发辐射力产生的原因是原子重复吸收频率和自身跃迁频率一致的光子吸收后,原子跃迁到激发态,同时自发的向各个方向辐射光子,从而使原子获得一定方向的动量,改变原子运动的速度,利用这一量子现象可以横向冷却从原子炉出射的原子束,达到准直原

子束的目的。偶极力是原子在光场中受到交变电场感应产生震荡的电偶极距与电场相互作用,从而产生与场强梯度成正比的力。原子在激光驻波场中受到偶极力的作用,向驻波场的波节或波腹位置移动,沉积到基片形成周期性的纳米条纹结构,其节距严格等于激光半波长。

图 2(a) 为原子光刻技术制备一维铬原子光刻光栅的过程示意图^[5-6]。依据原子光刻技术的原理可知,光栅的制备主要步骤为原子束生成、激光冷却准直、激光汇聚、原子沉积,整个制备过程均在高真空环境进行,一维汇聚激光驻波场的波长为 425.55 nm,对应铬原子的跃迁能级为 $7S^3 \rightarrow 7P^4$,基板为硅片基板。在真空环境中将加入铬粉的原子炉加热至一定温度,使原子喷发而出,形成铬金属原子束,波长相同传播方向相反的一对激光束形成了一维激光冷却驻波场,原子束经过激光冷却准直以后垂直入射到激光驻波场中,原子在驻波场中受偶极力的作用,向驻波波峰或波谷位置移动,最后沉积到硅基板上,形成周期为激光半波长的纳米级光栅量子结构,见图 2(b)。

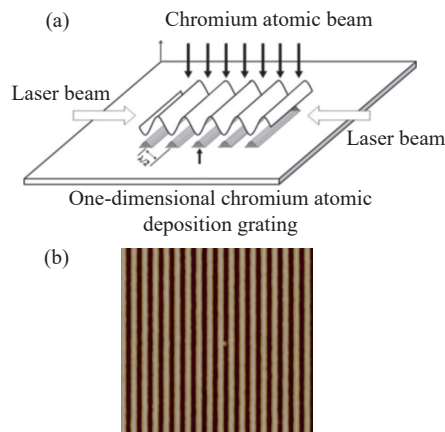


图 2 (a) 铬原子光刻原理图^[5]; (b) 铬原子光刻光栅二维结构图

Fig.2 (a) Schematic of chromium atom lithography^[5]; (b) Two-dimensional structure of chromium atom lithography grating

1.2 研究现状

国外对于使用原子光刻技术制备光栅的研究较早。1992 年, TIMP G 等人首次使用中性原子光刻技术,进行了钠原子沉积实验研究,制备了周期为 (294.3 ± 0.3) nm 的光栅,如图 3 所示,这是光对原子进行亚微米汇聚的首个直接证据,代表了亚微米光刻的全新方案^[7]。1993 年, MCCLELLAND J J 等人采用铬

原子,利用原子光刻技术将铬原子沉积在硅衬底上,得到了周期为 212.78 nm,高度为 (34 ± 10) nm,面积为 $0.4\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的铬原子沉积光栅(图 4),相比于钠光栅,铬光栅在空气中仍能具备稳定的纳米级结构,且制备过程中可以使用更简单的激光束排列^[5]。1995 年, MCGOWAN R W 等人通过使用近共振激光和直写光学光刻技术,将中性铝原子沉积在基板上,得到周期为 154.7 nm 的光栅^[8]。1997 年, MCCLELLAND J J 等人又利用铬原子光刻技术制备了周期为 212.78 nm,半峰全宽小于 38 nm 的一维光栅,并进一步进行二维光栅、周期为 $\lambda/4$ 和 $\lambda/8$ 的光栅制备研究^[9-10]。1999 年, SCHULZE T 等人通过利用原子与光相互作用,制备周期低于半波长的结构,在硅基板上形成了一维和二维的 100 nm 铬结构^[11]。2003 年, OHMUKAI R 等人使用近共振激光和直写原子光刻技术在基板上成功制作了周期值约为 200 nm 的周期性镱(Yb)光栅^[12]。2004 年, SLIGTE E 等人将直写原子光刻方案应用于铁原子,使用 372 nm 激光驻波形成周期为 186 nm 的光栅^[13]。

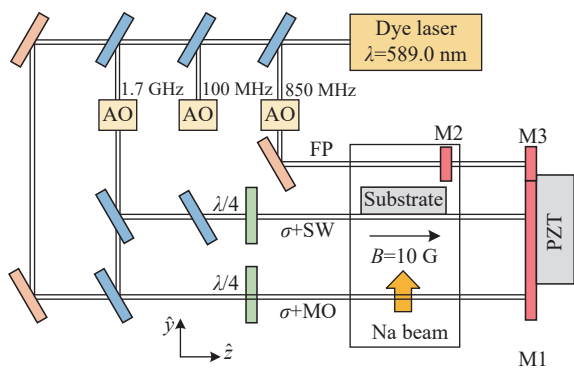


图 3 钠原子光栅制备设备原理图^[7]

Fig.3 Schematic of sodium atom grating fabrication equipment^[7]

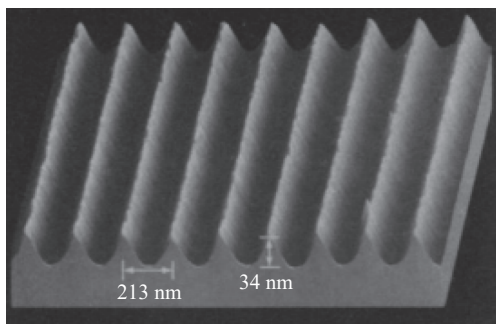


图 4 国外首次制备的铬原子沉积光栅^[8]

Fig.4 The first Chromium atom deposition grating fabricated abroad^[8]

就国内而言,1999 年中国科学院上海光学精密机械研究所王育竹院士课题组首先介绍了量子光学的最新成果,即原子光刻技术的基本原理、总体方案、单元技术以及制备结果^[14],同时,他们还研究了红移大失谐驻波光场在高功率的情况下对原子束的聚焦特性^[15]。但他们也仅是对原子光刻技术制备光栅进行了初步探索研究。直到 2002 年,同济大学李同保院士课题组开始对原子光刻技术进行系统且深入的理论与实验研究,初步分析了原子光刻技术中的激光稳频^[16-17]、激光倍频^[18]、原子束的冷却与准直^[19-22]等关键技术,并于 2007 年在国内首次利用该技术制备得到铬原子沉积光栅样品^[23],如图 5(a)所示,经过长期的理论研究与实验优化,于 2014 年成功制备了跨尺度大面积、节距统一、峰谷高度可达 40 nm 的光栅样

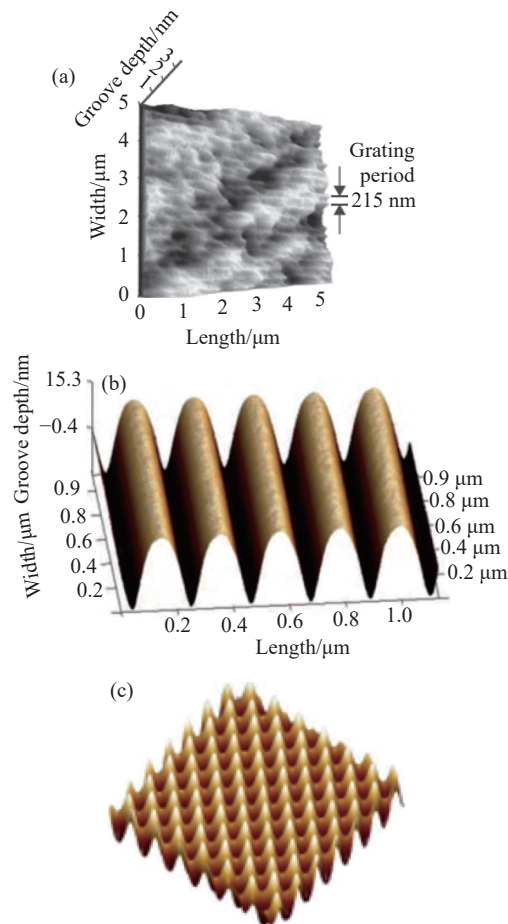


图 5 (a) 国内首次制备的量子光栅^[23]; (b) 实验优化后得到的量子光栅^[24]; (c) 二维量子光栅^[25]

Fig.5 (a) The first quantum grating fabricated in China^[23]; (b) Quantum grating obtained after experimental optimization^[24]; (c) Two-dimensional quantum grating^[25]

品^[24], 如图 5(b) 所示, 之后, 课题组的邓晓等人于 2018 年提出了基于分步沉积的原子光刻技术, 研制出了二维原子光刻光栅结构^[25], 如图 5(c) 所示。与此同时, 其他研究学者也在努力攻克原子光刻制备量子光栅技术, 如马艳等人针对激光冷却原子在 30 min 沉积时间内无法监测结果的问题, 提出了一种三孔沉积技术, 采用 425 nm 激光驻波聚焦铬原子束, 制备周期为 (213±0.1) nm, 高度为 4 nm, 半最小全宽为 (64±6) nm 的量子光栅^[26]; 张文涛等人分别对椭圆型激光驻波场作用下铬原子的汇聚特性^[27]、铬原子束以及中性钠原子束在激光驻波场中的运动特性^[28-29]、原子运动速度对激光驻波场作用下纳米光栅沉积特性的影响^[30]等开展了深入的研究与分析; 张宝武等人分别基于直边衍射高斯激光驻波光学势阱以及直边衍射的高斯激光驻波场进行了仿真实验与分析^[31-32], 为原子光刻技术制备量子基准光栅提供了理论参考。除了光栅的制备技术研究, 林子超、梁利杰等人^[33-34]分别对铬原子光刻光栅的衍射特性进行了详细分析, 推导了光栅的结构函数, 通过仿真和实际测量, 明确了铬原子光刻光栅的结构参数对光栅衍射效率的影响规律, 为光栅的制备技术优化和应用提供了理论依据。

2 基于量子技术的原子沉积光栅的典型应用

2.1 仪器校准

原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 作为一种强大的具有纳米级精度的表面表征工具, 可直接扫描并成像样品表面的三维形貌, 从而获取样品的纳米级结构特征, 如表面粗糙度、晶格排列、缺陷分布等。为确保 AFM 测量结果的准确性和可靠性, 必须对其进行溯源性校准。基于量子技术的原子光刻光栅具有精确的可溯源的空间尺度和周期性结构, 可为 AFM 提供一个理想的校准基准。通过将 AFM 的测量结果与铬原子光刻光栅的已知参数进行比对, 可校正 AFM 在测量过程中产生的系统漂移、非线性响应等误差, 实现 AFM 的溯源性校准。

2018 年, 同济大学邓晓等人^[35]率先使用铬原子光刻光栅对 AFM 进行校准研究, 通过使用 AFM 扫描光栅不同大小的区域, 计算出了 AFM 的非线性误差。同时由于光栅图形同时具有大范围和小范围的

均匀性, 只要随机选择一个或几个测量位置, 便能很好地标定原子力显微镜。2021 年, 上海市计量测试技术研究院吴俊杰等人^[36]利用 Cr 原子沉积光栅对 AFM 的横向特征进行校准, 在实验中, 用 AFM 在 3 μm 光栅样品的相同位置扫描十次, 校准前光栅样品的平均值为 2609.3 nm, 标准差为 2.91 nm, 校准后光栅样品的平均值为 2998.6 nm, 标准差为 2.86 nm, 验证了校准方案的有效性。

AFM 的具体校准过程如下^[37]:

1) AFM 扫描: 使用 AFM 扫描原子光刻光栅, 扫描范围 10 μm×10 μm, 扫描方向为光栅矢量方向和栅线方向;

2) 光栅调平: AFM 扫描数据导入数据处理软件, 绘制原始高度轮廓曲线, 由于样品人工放置导致倾斜, 会影响测量精度, 需对其进行一次或多次调平, 校正光栅位置;

3) 低通滤波: 扫描过程中会引入噪声等误差, 需对轮廓曲线进行低通滤波去噪, 便于后续的寻峰计算;

4) 寻峰: 对轮廓曲线在 x 方向进行随机截取, 在光栅截面确定波峰和波谷坐标;

5) 计算光栅栅距: 计算出波峰和波谷的平均值分别为 M 和 m , 取信任区域为 0.6, 以纵坐标 $y = m + (M - m) \times 0.6$ 选阈值线, 去除阈值线以下的区域, 从而减少探针效应。对所选区域进行二值化处理, 通过异或方法找出光栅起点和终点坐标, 利用质心坐标公式进行质心计算。

$$x_m = \frac{\sum x_i z_i}{z_i} \quad (1)$$

式中: x_i 为第 i 测量点的水平坐标; z_i 为第 i 测量的的高度值。

根据 4) 随机选取 10 次, 均计算出每个区域的各个质心坐标, 从而得到光栅栅距 d_{mn} , 平均光栅栅距 $\overline{D_m}$, 以 10 个区域 $\overline{D_m}$ 的平均值 $\overline{D}$ 作为最终的光栅栅距测量值。

$$\overline{D} = \frac{1}{MN} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N d_{mn} \right) \quad (2)$$

6) 获取校准因子 K : 根据校准因子公式进行计算, D 为铬原子光刻光栅的标准值。

$$K = \frac{D}{\bar{D}} \quad (3)$$

AFM 测量并处理的原子光刻光栅如图 6 所示, 多次测量光栅栅距的平均值为 213.5170 nm, 光栅实际周期值为 (212.7705 ± 1) nm, 根据公式 (3) 得校准因子为 0.9966。

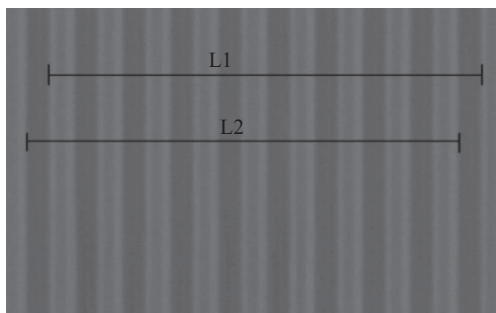


图 6 原子光刻光栅 x 方向测量校准示意图

Fig.6 Schematic diagram of measurement and calibration of atomic lithography grating in x direction

以周期值为 200 nm 的光栅标准样板为例, 使用 AFM 进行光栅栅距测量, 校准后的值为测量值与校准倍率的乘积, AFM 校准前后的光栅间距测量值如表 1 所示。

表 1 AFM 校准前后的光栅栅距测量结果

Tab.1 Measurement results of grating pitch before and after AFM calibration

The i -th measurement	Before calibration/ nm	After calibration/ nm
1	202.4825	201.7941
2	202.0756	201.3885
3	202.1163	201.4291
4	201.9128	201.2263
5	201.8925	201.2061
6	201.8722	201.1858
7	201.4391	200.7542
8	201.709	201.0236
9	201.6890	201.0033
10	200.7477	200.0652
Pitch average/nm	201.7937	201.10762
Measurement standard deviation/nm	0.4626	0.4610

由表 1 可知, 使用校准后 AFM 的光栅栅距测量

结果更接近真实数据值。

2.2 超精密位移测量

超精密位移测量技术是实现高端芯片制造的关键技术, 它直接决定了高端芯片制备过程中的高精度二维定位台的定位能力, 可对半导体芯片生产中的尺寸和表面形态进行测量与检测, 实现制造工艺的控制和产品质量的提升。光栅干涉技术作为超精密位移测量技术的主流技术之一, 具有较强的抗干扰能力、结构紧凑简单以及静态噪声小等优点被广泛研究和应用, 其中光栅作为光栅干涉技术中的核心部件, 其精确度决定着光栅干涉仪的测量精度和准确度。原子光刻技术制备的光栅经德国联邦物理技术研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) 测量定值表明, 任意两个光栅平均节距相差 0.001 nm, 不确定度为 0.008 nm, 具有极高的均匀性和一致性。基于原子光刻光栅发展的光栅干涉仪可实现超精密位移测量, 且测量结果天然具有溯源性^[38]。

光栅干涉仪基本原理如图 7 所示, 以光栅间距为测量基准, 广泛应用于精密位移测量系统中。该系统主要根据光栅对称级次衍射光发生干涉, 从干涉信号中获取光栅位移信息。当光栅沿其矢量方向移动时, 干涉条纹产生明暗变化, 这种明暗变化的光信号中携带了光栅的实际位移信息, 通过光电转换模块将其转换成电信号, 再利用硬件或软件的方式对干涉信号进行相位提取便可实现高精度、高分辨力的位移测量。

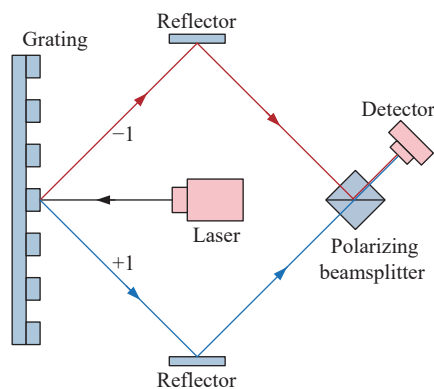


图 7 光栅干涉仪测量原理

Fig.7 Measurement principle of grating interferometer

根据光的多普勒频移原理、差频干涉原理以及位移转换原理可知, 干涉光强 I 与光栅位移 x 之间的关

系为:

$$I \sim \cos(4\pi m \frac{v}{d} t) = 2a^2 + 2a^2 \cos \left[4\pi m \frac{1}{d} \int_0^t v(t) dt \right] = \cos \left(4\pi m \frac{x}{d} \right) \quad (4)$$

式中: m 为光栅衍射级次; v 为光栅运动速度; t 为光栅运动时间; a 为光波的振幅; d 为光栅周期。则光栅的位移信息与干涉信号的相位之间的关系为:

$$\varphi(t) = \frac{4\pi m x(t)}{d} \quad (5)$$

根据公式 (4) 和公式 (5) 可知, 光栅移动一个光栅间距时, 相位变化 4π , 干涉信号变化两个周期; 相位变化 2π 时, 干涉光强明暗变化一次, 光栅位移 $x = d/2m$, 说明位移测量系统具有 $2m$ 倍的光学细分。

2.3 光栅栅距标定

光栅栅距是光栅的关键参数之一, 直接影响到光学系统的分辨率、衍射效率及成像质量。故光栅栅距的高精度标定能够保证光学仪器, 如光谱仪、激光干涉仪、光栅尺的高精度运行。

原子光刻光栅的周期值可以直接溯源到铬原子的能级跃迁, 刻线密度高达 4700 l/mm , 该光栅无需经过计量仪器的测量定值即可作为标尺使用。将原子光刻光栅引入到光栅干涉仪或激光反馈光栅干涉仪中, 可以实现对光栅栅距值的高精度标定, 并且该标定值可以间接的溯源到铬原子的能级跃迁, 这种溯源方法打破了传统层层递进的传统计量溯源方法, 溯源过程极大缩短, 成本降低, 减小了溯源误差。

由 2.2 小节可知, 光栅干涉仪可实现高精密度位移测量, 位移信息与相位变化和光栅周期值有关, 已知光栅周期, 可以通过干涉信号的相位提取得到光栅位移值。光栅干涉仪标定法是通过控制原子光刻光栅和待标定光栅沿光栅矢量方向进行同步的位移, 激光器出射的光束经过光路以对称的 Littrow 角入射至光栅表面, 两束衍射光发生干涉, 获取原子光刻光栅干涉光强 I_1 和待标定光栅干涉光强 I_2 , 干涉信号中携带位移和相位信息, 可得两个光栅的位移信息与相位之间的关系 $\varphi_1(t)$ 和 $\varphi_2(t)$, 通过测量两块光栅同时沿光栅矢量方向平移时干涉信号的相位变化量, 结合已知的原子光刻光栅栅距和相同的光栅位移量, 从而计算得到待标定光栅栅距 d_2 。

$$\begin{aligned} I_1 &\sim \cos \left(\frac{4\pi x}{d_1} \right) \\ I_2 &\sim \cos \left(\frac{4\pi x}{d_2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: x 为待测光栅沿光栅矢量方向位移; d_1 为铬原子光刻光栅栅距; d_2 为待标定光栅栅距。

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= \frac{4\pi x(t)}{d_1} \\ \varphi_2(t) &= \frac{4\pi x(t)}{d_2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$d_2 = \frac{\Delta\varphi_2}{\Delta\varphi_1} \times d_1 \quad (8)$$

式中: $\Delta\varphi_1$ 为原子光刻光栅移动 x 距离产生的相位变化量; $\Delta\varphi_2$ 为待标定光栅移动 x 距离产生的相位变化量。

对于激光反馈光栅干涉仪标定法来说, 其原理与光栅干涉仪标定法类似, 同样是控制两光栅沿光栅矢量方向同步运动, 不同的是, 衍射光沿入射光原路返回至激光器, 在激光器内腔发生干涉, 对激光器的功率和频率进行调制, 通过被原子光刻光栅调制的激光器功率变化可以得到原子光刻光栅的位移, 再通过位移量结合待标定光栅调制的激光器功率变化反推待标定光栅的光栅栅距。

目前, 同济大学、上海市计量测试技术研究院、南京理工大学等高校研究院均对光栅栅距标定方法进行了大量的研究和实验。2022 年, 同济大学首次提出并设计了使用原子光刻光栅干涉仪实现光栅栅距值的标定^[39], 同时也在标定装置的小型化、集成化与智能化方面做了大量探索。2023 年, 上海市计量测试技术研究院创新团队开展了光栅干涉仪标定方法的研究, 搭建了基于原子光刻光栅的光栅干涉仪标定系统, 如图 8 所示。标定系统的原始干涉信号如图 9 所示, 实验结果表明该系统的光栅栅距标定能力可达纳米量级, 通过与计量型 AFM 的对比实验验证了该套装置的可行性与稳定性^[40]。2023 年, 张玉杰等人^[41]提出将原子光刻光栅引入激光反馈光栅干涉仪中, 实现对光栅栅距的标定工作, 相比于光栅干涉仪标定法, 激光反馈光栅干涉仪标定法选择激光二极管作为标定装置的光源, 成本更低, 但是其标定能力低于光栅干涉仪标定法。

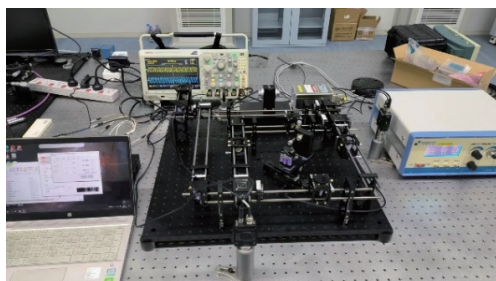


图 8 基于原子光刻光栅的光栅栅距标定系统

Fig.8 Grating pitch calibration system based on atom lithography gratings

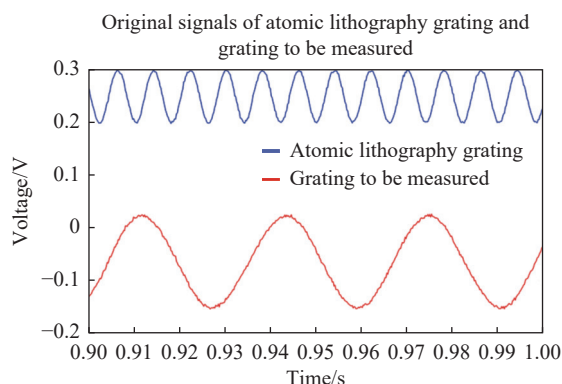


图 9 光栅栅距标定系统的原始干涉信号

Fig.9 Original interference signal of the grating pitch calibration system

2.4 纳米位移台校准

纳米位移台能够实现高度精确的纳米级位移控制, 广泛应用于芯片制备、超精密位移测量等领域。纳米位移台的校准可以提高其重复定位精度和线性度。光栅干涉仪作为纳米位移台的校准方法之一, 具有稳定的参考基准, 且校准准确度极高。通过 2.2 小节可知, 基于原子光刻光栅的光栅干涉仪测量结果经光栅栅距可间接溯源至“米”定义, 故利用其进行纳米位移台校准的量值同样具有溯源性, 校准后纳米位移台的溯源链为: 纳米位移台-基于量子基准的原子光刻光栅-“米”定义。

2023 年, 上海市计量测试技术研究院刘丽琴基于原子光刻光栅干涉仪, 针对二维纳米位移台的重复定位精度和线性度分别设计了校准方案如图 10 所示^[42]。光栅干涉仪 1 中的测量光栅放置在纳米位移台的 x 轴上, 用于测量 x 轴的位移, 光栅干涉仪 2 中的测量光栅放置在纳米位移台的 y 轴上, 用于测量 y 轴的位移。图 10(a) 中, 当信号发生器控制纳米位移台运动

时, 基于原子光刻光栅的光栅干涉仪进行实时测量, 且干涉信号分为相位相差 90° 的四路信号, 经过信号采集卡, 由上位机进行处理与解算, 从而实现位移台重复性定位精度校准。图 10(b) 中, 信号采集卡同时采集纳米位移台中电容传感器和光栅干涉仪的位移测量值进行比对, 实现线性度校准。

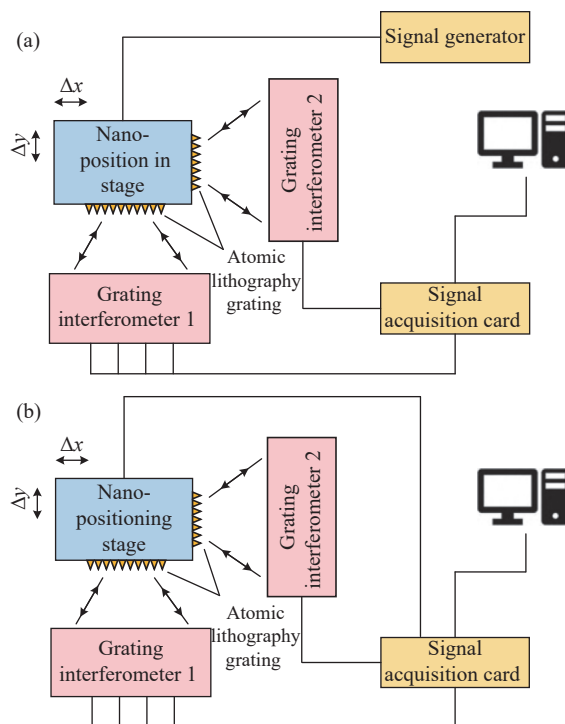


图 10 (a) 重复性校准方案; (b) 线性度校准方案

Fig.10 (a) Repetitive calibration scheme; (b) Linearity calibration scheme

根据上述校准方案, 刘丽琴通过实验进行了纳米位移台的重复定位精度以及线性度的实际校准工作。采用基于原子光刻光栅的光栅干涉仪针对纳米位移台进行 10 次重复性测量得到平均位移值为 $100.8171 \mu\text{m}$, 最大偏差为 $0.1333 \mu\text{m}$, 与纳米位移台的技术手册数据一致。均匀选取纳米位移台 90% 量程的 10 个位置, 并获取光栅干涉仪对应的测量值, 重复进行 5 次实验, 得到最大线性偏差均值为 $0.673 \mu\text{m}$, 线性度为 0.67%。通过实验验证了该校准方案的可行性, 缩短了纳米位移台的溯源链。

3 结 论

目前, 国内外关于原子光刻光栅的应用研究正处

于蓬勃发展阶段。原子光刻光栅能够直接溯源至原子跃迁频率的特性使其具备天然的计量优势。文中分析了使用原子光刻技术制备原子光刻光栅的原理,综述了原子光刻量子光栅的研究现状。通过对原子光刻光栅的关键性能参数研究表明其在计量仪器中代替关键部件具备可行性。使用原子光刻光栅制造光栅干涉仪或将其作为激光干涉仪的内部自校准的标准物质,将极大提高干涉仪的测量精度并大幅缩短溯源链。采用原子光刻光栅作为计量仪器的关键部件,如精密位移台、微振动传感器等,理论上可有效缩短溯源链,减小量值传递过程中产生的误差累积。通过对原子光刻光栅的研究进展的深入分析,为后续开展原子光刻光栅的应用研究提供发展方向,为我国集成电路中光刻机等关键仪器的研制与量传体系研究提供新思路。

参考文献:

- [1] STOCK M, DAVIS R, DE Mirandés E, et al. The revision of the SI—the result of three decades of progress in metrology [J]. *Metrologia*, 2019, 56(2): 022001.
- [2] GE Meng, ZHANG Tieli, LIU Hao, et al. Quantum precision measurement technology and its typical applications in measurement field [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2023, 43(6): 1-6. (in Chinese)
- [3] WANG Yueyu. Traceable transfer for nano- metrology [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2010, 30(1): 75-79. (in Chinese)
- [4] LI Tongbao. Nanometrology and transfer standard [J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2005(1): 8-13. (in Chinese)
- [5] MCCLELLAND J J, SCHOLTEN R E, PALM E C, et al. Laser-focused atomic deposition [J]. *Science*, 1993, 262(5135): 877-880.
- [6] CHEN Jie, LIU Jie, ZHU Li, et al. Optimization of atom flux in atom lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1202001. (in Chinese)
- [7] TIMP G, BEHRINGER R E, TENNANT D M, et al. Using light as a lens for submicron, neutral- atom lithography [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 69(11): 1636-1639.
- [8] MCGOWAN R W, GILTNER D M, LEE S A. Light force cooling, focusing, and nanometer-scale deposition of aluminum atoms [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(24): 2535.
- [9] MCCLELLAND J J, ANDERSON W R, CELOTTA R J. Nanofabrication via atom optics with chromium[C]//Atom Optics, SPIE, 1997, 2995: 90-96.
- [10] MCCLELLAND J J, CELOTTA R J. Laser-focused atomic deposition—nanofabrication via atom optics [J]. *Thin Solid Films*, 2000, 367: 25-27.
- [11] SCHULZE T, BREZGER B, SCHMIDT P O, et al. Sub-100 nm structures by neutral atom lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 1999, 46(1-4): 105-108.
- [12] OHMUKAI R, URABE S, WATANABE M. Atom lithography with ytterbium beam [J]. *Applied Physics B*, 2003, 77: 415-419.
- [13] TE Sligte E, SMEETS B, VAN der Stam K M R, et al. Atom lithography of Fe [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(19): 4493-4495. (in Chinese)
- [14] CAI Wei-quan, LI Chuanwen, HUO Yunsheng, et al. Atom lithography [J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, 48(8): 611-619. (in Chinese)
- [15] ZENG Qinglin, HUO Yunsheng, CAI Wei-quan, et al. Atom lithography in red far-detuning high-power standing wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(8): 918-922. (in Chinese)
- [16] ZHANG Baowu, LI Tongbao, ZHENG Chunlan. Frequency stabilization for laser by LIF of ^{52}Cr atomic beam [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2005, 18(6): 16-21. (in Chinese)
- [17] ZHANG Baowu, LI Tongbao, ZHENG Chunlan, et al. Theoretic analysis on laser frequency stabilization derived from Cr atomic beam laser induced fluorescence [J]. *China Measurement Technology*, 2006, 32(3): 4. (in Chinese)
- [18] ZHENG Chunlan, LI Tongbao, MA Yan, et al. The analysis on the stability of the ring frequency doubling cavity [J]. *China Measurement Technology*, 2005, 31(3): 1-4. (in Chinese)
- [19] ZHANG Wentao, LI Tongbao. Doppler laser cooling of chromium atom beam [J]. *Journal of Guilin University of Electronic Technology*, 2006, 26(3): 174-176. (in Chinese)
- [20] MA Zhanshan, MA Shanshan, MA Yan, et al. Knife-edge technique for laser cooling [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(1): 63-69. (in Chinese)
- [21] MA Yan, ZHANG Baowu, ZHENG Chunlan, et al. Experimental study of laser collimation of Cr beam [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(8): 4086-4090. (in Chinese)
- [22] MA Y, ZHANG B W, ZHENG C L, et al. Studies on a laser-collimated chromium beam [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(2): 201-204. (in Chinese)
- [23] MA Yan, ZHANG Baowu, ZHENG Chunlan, et al. The preliminary result of laser-focused Cr atomic deposition for fabricating nanostructure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(3): 1365-1369. (in Chinese)

- [24] DENG X, LI T B, LEI L H, et al. Fabrication and measurement of traceable pitch standard with a big area at trans-scale [J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(9): 090601.
- [25] DENG X, LIU J, ZHU L, et al. Natural square ruler at nanoscale [J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(7): 075201.
- [26] MA Y, LI T B, WU W, et al. Laser-focused atomic deposition for nanoscale grating [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(7): 073202.
- [27] ZHANG Wentao, ZHU Baohua, XIONG Xianming. Focusing characteristic of chromium atoms under elliptical standing wave [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(12): 8199-8204. (in Chinese)
- [28] HE Fen, ZHANG Wentao, XIONG Xianming. 3-D simulation analysis of laser-collimating Cr atomic beam [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(6): 605-610. (in Chinese)
- [29] ZHANG Wentao, ZHU Baohua, XIONG Xianming. The research of motorial characteristic of sodium atoms in standing wave field [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(3): 183-189. (in Chinese)
- [30] ZHANG Wentao, ZHU Baohua, XIONG Xianming, et al. Characteristics of deposition for neutral atoms in laser standing wave with different velocities [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 063202. (in Chinese)
- [31] ZHANG Baowu, ZHI Lixiang, ZHANG Wentao. Simulation of optical potential of Gaussian laser standing wave by diffraction of straight edge [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(18): 183201. (in Chinese)
- [32] ZHANG Baowu, MA Yan, ZHANG Pingping, et al. Simulation of Gaussian laser standing wave based on diffraction by straight edge [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6): 810-813. (in Chinese)
- [33] LIN Z, YAO Y, XIE Z, et al. Chromium self-traceable length standard: investigating geometry and diffraction for length traceability chain [DB/OL]. [2023-06-25](2024-11-01) <http://arxiv.org/pdf/2306.14083>.
- [34] LIANG Lijie, LIU Liqin, GUAN Yuqing, et al. Analysis and study of the diffraction efficiency of self-traceable grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023(11): 20230356. (in Chinese)
- [35] DENG Xiao, LI Tongbao, CHENG Xinbing. Self-traceable grating reference material and application [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(21): 2608-2625. (in Chinese)
- [36] WU J, CAI X, LI Y, et al. Lateral characteristic calibration of an atomic force microscope using a Cr atomic deposition grating[C]//IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, IEEE, 2021.
- [37] CHEN Kaiqing, GUAN Yuqing, ZOU Wenzhe, et al. Research on the method of nanometer grating spacing comparison measurement based on Cr atomic lithography technology [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2023, 44(5): 671-678. (in Chinese)
- [38] 邓晓, 程鑫彬, 林子超, 等. 一种自溯源型光栅干涉精密位移测量系统: 中国, CN202110862699.2[P]. 2022-09-20.
- [39] 程鑫彬, 邓晓, 李同保, 等. 一种基于自溯源光栅零差干涉法的光栅周期标定系统: 中国, CN202211443973.3[P]. 2024-05-31.
- [40] ZHU Y, SUN J, GUAN Y, et al. Research on dual-grating spacing calibration method based on multiple improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise combined with hilbert transform [J]. *Photonics*, 2024, 11: 443.
- [41] ZHANG Yujie, XU Lei, GUAN Yuqing, et al. Research on laser self-mixing nano-displacement measurement based on plane reflective holographic grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(4): 20220676. (in Chinese)
- [42] LIU Liqin, GUAN Yuqing, ZOU Wenzhe, et al. Study on the calibration method of nano-positioning stages using grating interferometers [J]. *Metrology Science and Technology*, 2023, 67(6): 37-43. (in Chinese)

Research advances and typical applications of atomic deposition grating based on quantum technology

LEI Lihua^{1,2}, LIANG Lijie^{1,2}, DENG Xiao^{3*}

(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. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract:

Significance The implementation of the new definitions of international basic units based on fundamental physical constants in 2019 marked the official and comprehensive entry of precision measurement into the quantum era. In 2022, China clearly stated its intention to establish a national modern advanced measurement system centered on quantum metrology, with a focus on researching and establishing quantum measurement standards, exploring quantum metrology technologies based on quantum effects and physical constants, and promoting the upgrading and renewal of the measurement standard system. The atomic lithography grating, a nano-length scale based on quantum effects, has a grating pitch that is traced back to atomic transition frequencies. It can be directly used for instrument calibration without relying on the fixed value of metrological instruments, effectively shortening the traceability chain of nano-length measurement. The "Quantization of Measurement Units" has overturned the traditional hierarchical metrological traceability system. By adopting quantum measurement standards, it significantly improves the accuracy and stability of value reproduction, enabling the reproduction of values at any time, in any place, and by any entity, thereby achieving a flat traceability. Atomic lithography gratings achieve sub-nanometer accuracy with good consistency and can be mass-produced, making them promising for applications in the establishment of nano-scale length measurement systems, quantum precision measurement, instrument calibration, and other fields.

Progress First, the preparation principle and technology of atomic lithography quantum gratings are analyzed. A laser wavelength of 425.55 nm is selected, corresponding to the transition energy level of chromium atoms from $7S^3$ to $7P^4$, with a silicon substrate. In a vacuum environment, the atomic furnace containing chromium powder is heated to a certain temperature, causing the atoms to erupt and form a chromium metal atomic beam. A pair of laser beams with the same wavelength but opposite propagation directions create a one-dimensional laser standing wave field with an optical intensity period of $\lambda/2$. After laser cooling and collimation, the atomic beam is vertically incident into the laser standing wave field. Within this field, the atoms are subjected to a dipole force, causing them to move towards the peaks or troughs of the standing wave. Eventually, they deposit onto the silicon substrate, forming a nanoscale quantum grating with a period equal to half the laser wavelength. The grating pitch can be traced directly to specific natural constants, allowing the grating to serve as a ruler without the need for metrological instrument calibration. Theoretically, the accuracy of atomic lithography gratings can reach the picometer level, similar to the precision of metrological testing instruments equipped with laser interferometers. Subsequently, the research progress in the preparation of atomic lithography gratings, both domestically and internationally, is elaborated upon. As early as 1992, G. Timp and his team successfully utilized atomic lithography technology to produce a sodium grating, albeit an unstable one. Consequently,

MCCLELLAND J J and colleagues opted for chromium atoms, successfully fabricating a chromium grating. Since then, numerous researchers have embarked on preparing quantum gratings using various metal atoms. Domestic research into the preparation technology of quantum gratings commenced in 1999, and in 2002, LI Tongbao and his team achieved a milestone by utilizing atomic lithography technology to produce China's first quantum grating. Currently, the preparation technology of atomic lithography gratings is continually optimized and upgraded, with researchers actively exploring specific applications for these gratings. Finally, the applications of atomic lithography gratings in instrument calibration, ultra-precise displacement measurement, grating pitch calibration, and nano-positioning stage calibration are introduced.

Conclusions and Prospects Currently, both domestic and international research on the application of atomic lithography gratings is in a vigorous stage of development. The inherent metrological advantage of atomic lithography gratings stems from their ability to be directly traced back to atomic transition frequencies. This paper analyzes the research progress and typical applications of atomic lithography gratings, aiming to provide guidance for future research directions in this field and new insights for the development of key instruments such as photolithography machines in integrated circuits, as well as for the study of metrological traceability systems in China.

Key words: grating reference material; atomic lithography; atomic transition frequency; quantum benchmark

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2021YFF0603300); Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory (JLKG2024001B001); Science and Technology Program of State Market Regulatory Administration (2023MK025)