

《零差相位比对法反射光栅校准规范》编制说明

一、任务来源及必要性

反射光栅是微纳光学测量的关键元件，广泛应用于光通信、光学精密仪器、超精密位移测量等领域，并在集成电路制造、半导体微纳加工等先进制造环节中发挥着重要的基础支撑作用，是相关产业不可或缺的核心器件。当前，我国相关光学测量设备发展迅速，但在对一维、二维光栅结构参数进行校准时，仍需补充多种新型量值溯源链与校准方法，以建立完整的反射光栅校准体系。基于光栅标准物质及相应的零差光栅干涉仪，依据零差相位比对原理，建立科学、完整且统一的反射光栅校准规范，已成为保障反射光栅量值准确可靠、提升光学测量仪器性能以及产业整体测量能力的迫切需求。为切实保证反射光栅计量标准的科学性与量值传递的准确性，亟需制定反射光栅校准规范，为我国精密制造、半导体等关键领域的高质量发展提供坚实技术保障。

二、制定规范主要参考的文件和依据

本规范为首次制定，JJF1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本校准规范制定的基础性系列文件。

主要技术内容和计量特性参考了以下文件：JJF1967—2022《激光衍射法反射光栅校准规范》、IEC/TS 62622:2012《纳米技术—人工光栅的描述、测量及尺寸质量参数》(Nanotechnologies—Description, measurement and dimensional quality parameters of artificial gratings)。

三、规范的主要内容及主要技术关键

规范的主要内容

本规范围绕反射光栅的量值溯源需求，对一维、二维反射光栅的关键计量特性、校准流程与数据处理要求进行了系统化规定。规范起草组结合零差相位比对法与光栅标准物质，对反射光栅核心参数的计量特性作出统一、合理且符合工程实际的技术规定，明确了反射光栅的校准位置选取、校准项目、校准方法及校准数据处理等内容。同时，对校准条件、环境要求、校准过程及校准证书格式进行了统一要求。规范中的技术指标和校准方法均经过实验验证，并对校准结果的测量不确定度进行了系统分析，进一步证明所采用的校准流程科学、可行，可有效

保证反射光栅量值传递的准确性与可溯源性。

规范的主要技术关键

1) 校准用设备的选择

反射光栅的校准使用零差相位比对法,采用光栅标准物质及对应零差光栅干涉仪、位移台和位移数据采集系统。光栅标准物质的间距及不确定度由国家标准物质定级证书提供,使用光栅干涉仪位移测量不确定度 $\leq U_L \leq 10\text{nm} + 7 \times 10^{-4}L$, $k=2$,位移台全行程范围内线性度 $l \leq 4 \times 10^{-4}$,线性度不确定度 $U_l \leq 9 \times 10^{-5}$, $k=2$,位移数据采集系统同步采样频率不小于 250kHz,不确定度 $U \leq 1 \times 10^{-7}$, $k=2$,确保能够获得反射光栅的真实计量特性。

2) 校准前准备

反射光栅和校准装置的环境温度应在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 范围内,校准过程中温度波动应 $\leq 0.1^\circ\text{C/h}$;湿度应在 $(50\% \pm 10\%)$,校准过程中相对湿度波动应 $\leq 5\%$;测试环境下应无明显振动,以保证系统处于稳定工作状态,从而确保测量的准确性和重复性。

3) 测量标准光栅和待测反射光栅信号

测量范围限定在激光光斑所能覆盖的区域,根据该原理确定测量区域。若激光光斑无法覆盖校准要求的整个区域,则需选择多个位置进行测量。每个位置进行 5 次重复测量,得到该位置的间距平均值。随后,将所有测量位置的间距平均值再次取平均,得到待测反射光栅指定区域的间距平均值。选定测量区域时,应选择具有代表性的光栅区域。

对于一维反射光栅,将待测反射光栅与标准光栅安装在位移台上,确保两光栅的测量轴与位移台运动轴平行。标准光栅干涉仪的激光束以利特罗角入射到标准光栅上,其衍射光沿原光路返回。驱动位移台运动时,零差构型的待测反射光栅干涉仪和标准光栅干涉仪分别产生两束正弦余弦信号 $S_{n,\sin}$ 、 $S_{n,\cos}$ 、 $S_{s,\sin}$ 、 $S_{s,\cos}$,四路信号输入数据采集系统并被同步采样。

4) 校准数据处理

由原始数据 $S_{n,\sin}$ 、 $S_{n,\cos}$ 、 $S_{s,\sin}$ 、 $S_{s,\cos}$ 根据公式计算待测反射光栅和标准光栅相位,并以最小二乘法计算待测反射光栅与标准光栅的相位比值,最后相位比值与标准光栅间距的乘积即为一次测量待测反射光栅间距,待测反射光栅间距为多次测量的平均值。

对于二维反射光栅，测量方法与上述相同，但需分别测量行方向间距 d_x 、列方向间距 d_y 和对角线方向间距 d_{xy} 。并以公式计算二维反射光栅正交性。

四、专题研讨会中讨论的主要争议及解决方法

本规范制定过程中举行了专题研讨会，主要针对 3 方面问题进行讨论：（1）校准方法的兼容性是否不足，是否应删去某些限定性的描述；（2）部分技术文字的表述是否精简准确；（3）部分图示的表示是否清晰准确。

针对校准方法的兼容性是否不足，是否应删去某些限定性的描述的问题，本规范进行了修改，删去了关于待测反射光栅和标准光栅安装的详细描述、待测光栅干涉仪构型的描述，改为更宽泛的描述语句，增加了校准规范的兼容性和适用性。针对一些有歧义的技术文字的表述，采用更精简更准确的叙述方式。针对部分图示存在的问题，重新修改绘制了相关图示，保证图示清晰、明确、直观。

五、总结

在本规范的制定过程中，我们以国内外资料及相关标准、大量实验数据为技术依据，本着科学合理、易于操作的原则，并结合全国几何量长度计量技术委员会专家的意见和建议，制定了表面结构标准样板校准规范。