



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Laser Micro/Nano-Manufacturing—Article

面向纳米加工的亚衍射极限量子精密测量

叶文怡^{a,b,c,d,#}, 李阳^{a,b,c,#}, 陈澍微^{a,b,#}, 蒲明博^{a,b,c,d}, 孟哲廷^{a,b,c,d}, 黄远建^e, 郭恒硕^f, 李晓银^{a,b,c}, 郭迎辉^{a,b,c,d}, 李雄^{a,b,c,d}, 龙云^{a,b,c,d}, Emmanuel Stratakis^{g,h}, 罗先刚^{a,b,d,*}

^a National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

^b State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

^c Research Center on Vector Optical Fields, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

^d College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

^e Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438, China

^f Tianfu Xinglong Lake Laboratory, Chengdu 610299, China

^g Institute of Electronic Structure and Laser, Foundation for Research and Technology-Hellas, Heraklion 71110, Greece

^h Department of Physics, University of Crete, Heraklion 70013, Greece

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 September 2024

Revised 22 February 2025

Accepted 3 April 2025

Available online 22 April 2025

关键词

纳米加工
精密测量
衍射极限
量子计量学

摘要

在物体定位与对准方面实现纳米级精度的光学监测对于精密测量应用(如微纳制造、弱力传感和显微成像等领域)至关重要。传统光学纳米计量方法通常依赖精密纳米结构制备、多光束干涉测量或后处理算法,这限制了其实际应用。本研究提出了一种简化且可靠的量子测量技术,其理论分辨率可达2.2 pm,并实验验证了1 nm的分辨率,这使其有别于基于多个参考光束的传统干涉测量技术。通过设计具有模式转换功能的超构表面,将入射高斯光束转换为高阶横电磁模。结合费希尔信息的理论分析表明,本方法在纳米尺度位移测量中能够保持优异的精度。本研究为纳米加工及其他精密工程领域的对准与计量提供了新的技术途径。

© 2025 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

精密测量微小位移的光学方法对于众多应用领域(包括微纳加工、纳米级监测、弱力传感、显微成像等[1])至关重要。高精度位移传感器(如中间膜的光机械腔与宏观干涉仪)已取得多项重大科学突破,包括实现运动量子基态、引力波和单声子的观测[2–7]。早期的位移测量依赖机械工具(如卡尺和千分尺),这些工具缺乏微米或纳米级测量所需的精度。光学位移测量技术此后便成为精密

测量的基石[8–9]。研究人员已研发出各种先进技术,如反作用规避测量[10]、变分读出[11]、偏振编码超构表面[12–13]、线性光子齿轮[14]以及压缩光注入[15–16]。干涉仪和光栅位移测量系统[17]被广泛使用,后者利用光栅的衍射原理来测量位移。然而,在大尺度(最大可达米量级)上制造纳米结构需要进行长距离测量,成本高昂。干涉仪能提供低至纳米级别的高分辨率,但在长距离、长时间的测量过程中,会因介质湍流等噪声影响而产生累积误差。

* Corresponding author.

E-mail address: lxc@ioe.ac.cn (X. Luo).

These authors contributed equally to this work.

在长程测量中实现纳米级分辨率颇具挑战性，特别是在纳米加工工艺要求光学架构简单、鲁棒性强、成本效益高且易于集成的情况下。由瑞利判据[18]描述的衍射极限，对许多光学系统构成了根本性挑战。光子的粒子特性为精确位置的探测带来了随机性。为了分析分辨率中的噪声问题，统计推断理论提供了一个有用的框架。Tsang等[19–20]提出了一项基于超分辨率量子理论的突破性技术，该技术能够突破瑞利判据的限制，估算两个非相干光学点源的间距。该方法已在超分辨率显微技术和望远镜成像领域被广泛探索[21–43]。

在本研究中，我们拓展了双源量子成像理论，将其应用于精确测量单光束的位移。基于量子光学、量子计量学及统计分析的框架，我们通过实验演示了测量精度达到衍射极限约 1/290 000（计算方式为测量精度除以焦平面零阶艾里斑尺寸）的位移测量技术。实验装置通过设计模式转换图案并制备相应的超构表面[40,42,44]实现：将该超构表面安装于一维纳米位移台上，进行横向位移测量。入射的高斯光束经超构表面转换为高阶横电磁模（TEM），随后由光学传感器进行探测。通过分析扩展量子理论框架下的位移以及计算纳米级位移的费希尔信息，我们发现即使低于衍射极限，对超构表面位置的探测能力仍能保持精确。实际实验中，通过探测分离 TEM 模式的强度，我们实现了精度达 1 nm 的位移测量——这并非理论极限，而仅受限于纳米位移台的性能约束。该方法具有广泛适用性，因模式转换图案可制备于任意类型基底表面。此外，我们提出了两种进阶的配置方案：一是可实现 1 nm 分辨率测量的集成化芯片内位移传感器，适用于多种基底材料；二是面向 7 nm 及以下先进集成电路制造工艺的多维反馈系统，具备亚纳米级对准精度。

2. 方法

2.1. 制备

目前存在多种制备超构表面的方法[45–55]。本研究采用的制备技术是近期提出的一种新方法通过在透明基底内部创建超原子来实现高鲁棒性相位调控。关于该制备流程的详细说明及其优势与局限性可参考文献[56]。该超构表面利用玻璃内由激光诱导的双折射纳米孔，纳米孔平均直径为 35~45 nm。该超构表面基于几何相位调制原理工作，使我们能够通过调整入射光偏振，将相移从 0 调节到 2π 。附录 A 中的第 S1 节和第 S2 节分别展示了激光源稳定性测试的结果和实验测量的原始数据。附录 A 中的第 S3 节提供了超构表面的光学图像和纳米孔的扫描式电子

显微镜（SEM）图像。附录中 A 中的第 S4 节和第 S5 节则分别列出了实验设备清单以及其他先进测量方法与本研究所提方法之间的参数对比。

2.2. 测量原理与理论模拟

图 1 (a) 和 (b) 展示了所提出的基于超构表面的光学模式转换配置示意图。在该装置中，模式转换由一个特殊设计的超构表面实现，该表面将 π 相位偏移施加于入射光束的一半。在超构表面的空间平面上，光波的振幅分布可表示为厄米-高斯模式（Hermite-Gaussian mode），对应 TEM00 模式作为初始信号。入射光的复振幅 (u_{mn}) 由公式 (1) [57] 给出：

$$u_{mn} \approx C_{mn} H_m(x) H_n(y) e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2}} \quad (1)$$

式中， m 和 n 分别表示 x 和 y 方向的模数； C_{mn} 是与 m 和 n 相关的常数，其值为 1； x 和 y 表示对应于真实空间中物理位置的空间坐标。 $H_m(x)$ 和 $H_n(y)$ 是厄米多项式，可表示为

$$H_m(x) = (-1)^m e^{x^2} \frac{d^m (e^{-x^2})}{dx^m} \quad (2)$$

$$H_n(y) = (-1)^n e^{y^2} \frac{d^n (e^{-y^2})}{dy^n} \quad (3)$$

因此，基模 TEM00 的复振幅 u_{00} 可简化为

$$u_{00} \approx e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2}} \quad (4)$$

如前所述， π 相移是实现所需模式转换的关键。这可通过使用具有不同快轴方向的液晶聚合物薄膜[58–59]制备超构表面并将整个超构表面划分为两个快轴相互垂直的区域来实现。通过调节超构表面与入射光束的相对位置，可以精确控制进入 0 相位区和 π 相位区的功率比例。超构表面被安装在分辨率为 1 nm 的位移台上，以便进行微调。根据菲涅耳衍射原理，衍射屏 Σ 的透射复振幅 $t(x_0, y_0)$ 可表示为

$$t(x_0, y_0) = A(x_0, y_0) e^{j\varphi(x_0, y_0)} \quad (5)$$

式中， (x_0, y_0) 表示衍射屏上的空间坐标； $A(x_0, y_0)$ 表示幅值（等于 1）； $\varphi(x_0, y_0)$ 表示相位（其中一半为 0，另一半为 π ），由 0 到 π 的相移线（PSL）分隔； j 表示虚数单位。我们定义 $u(x_0, y_0)$ 为衍射面 ε 上的光场复振幅， $u(x_0, y_0)$ 为观察面上 r 点处的复振幅。

$$u(x, y) = u_{00} \times t(x_0, y_0) \quad (6)$$

图 1 (b) 展示了入射光束通过超构表面后的衍射过程，最终在探测屏上形成衍射斑，这一过程由公式 (7) 的菲涅耳衍射积分描述：

$$u(x, y) = \frac{e^{jk d}}{j \lambda d} \int_{-\infty}^{\infty} u(x_0, y_0) e^{j \frac{k}{2d} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]} dx_0 dy_0 \quad (7)$$

式中， λ 为入射光波长； $k = 2\pi/\lambda$ 为波数； d 表示衍射面到观察面的距离。公式 (7) 可改写为

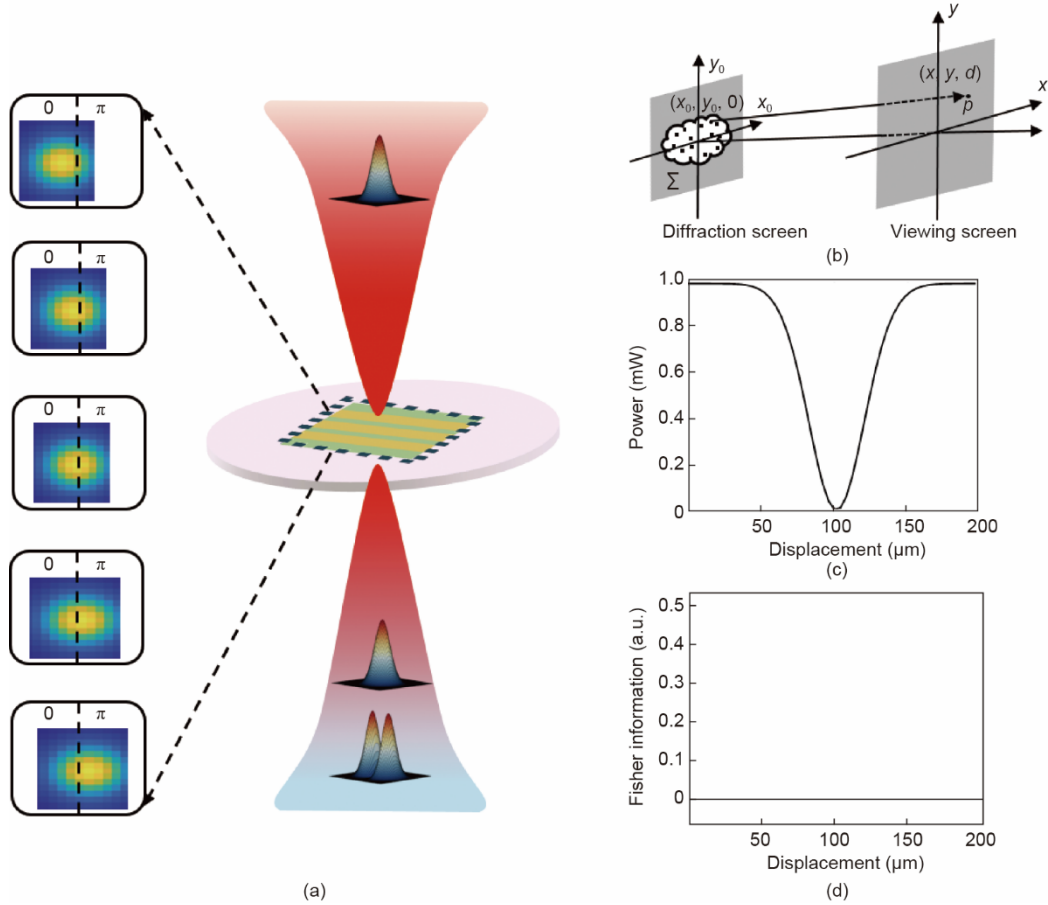


图1. 基于超构表面的量子位移测量。(a) 超构表面位移测量原理可理解为通过探测转换后光束不同模式的功率实现。入射光照射超构表面后被转换为不同模式。当超构表面产生位移时, 这些转换模式的功率随之变化。通过探测并比较相应模式的功率, 即可表征位移量。(b) 入射光透过超构表面后的衍射过程与坐标示意图。 Σ 代表衍射屏, p 为观察面上的探测光斑。(c) 基模输出功率随位移变化的仿真结果。(d) 系统量子费希尔信息计算结果。

$$u(x, y) = \frac{e^{ikd}}{j\lambda d} e^{\left[\frac{jk}{2d}(x^2+y^2)\right]} \iint u(x_0, y_0) e^{\left[\frac{jk}{2d}(x_0^2+y_0^2)\right]} \times e^{\left[-j2\pi\left(\frac{xx_0}{\lambda d} + \frac{yy_0}{\lambda d}\right)\right]} dx_0 dy_0 \quad (8)$$

根据公式(8), 观察屏上的光场复振幅可视为透过衍射屏后光场复振幅的傅里叶变换。图1(c)展示了基于该理论的仿真结果。我们采用简化数学方法对激光模式转换的强度分布进行建模, 其中假设模式转换效率遵循高斯分布, 以此模拟使用单模光纤作为接收器的场景。该模型中, 耦合效率 η 由 u_{00} 与光纤传输模式(其轮廓高度近似高斯分布)的重叠积分决定, 如公式(9)所示:

$$\eta = \frac{\left| \iint u_{00} \times u(x, y) dx dy \right|^2}{\iint |u_{00}|^2 dx dy \times \iint |u(x, y)|^2 dx dy} \quad (9)$$

根据光学理论, 理想的平行光束或球面波通过理想光学透镜后应会聚于衍射极限点。然而, 由于各种像差的存在, 实际焦斑尺寸取决于多个参数, 包括波长、焦距和光束直径等。这种焦斑尺寸限制构成了光学检测分辨率的瓶颈。20世纪60年代初, Helstrom对量子检测理论进行了总结和推广。近年来, 许多科学家应用量子理论来解决成

像挑战, 其中费希尔信息[60–61]成为这些研究的关键工具。本节我们将通过量子费希尔信息来分析测量精度极限。如图1(c)所示, 接收屏上的光强呈连续分布, 我们可以通过公式(10)计算系统的费希尔信息, 其中 θ 表示超构表面的位移量:

$$F_\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} dx \frac{1}{u} \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} \right)^2 \quad (10)$$

式中, u 表示光纤收集的光强, 其数值随超构表面的位移变化而改变。根据公式(9), 仅有TEM00模式的光能够耦合进入单模光纤。因此, 我们将接收TEM00模式的概率记为 q , 非TEM00模式的概率记为 $(1-q)$, 对应的费希尔信息可表示为

$$F_\theta = \frac{1}{q} \left(\frac{\partial q}{\partial \theta} \right)^2 + \frac{1}{1-q} \left[\frac{\partial(1-q)}{\partial \theta} \right]^2 \quad (11)$$

图1(d)展示了本系统的费希尔信息分布特性。结果表明, 即使超构表面的位移低于衍射极限, 系统的量子费希尔信息仍保持稳定, 不随位移变化而改变, 这证明在亚衍射区域测量精度始终维持一致。

2.3. 位移测量的实验装置与流程

如图2(a)所示,我们搭建了一套用于演示水平方向高精度位移测量的实验系统。从光纤激光器输出的准直线性偏振光经分束器分为两束等功率光束,并通过两个光阑确保光束处于同一高度。为测量激光功率,其中一束光通过线性偏振片后直接由功率计探测。基于Pancharatnam-Berry(PB)相位设计的超构表面要求入射光为左旋圆偏振光,因此另一束光在分束后先通过线性偏振片和 $\lambda/4$ 波片。为记录入射至超构表面的初始功率,该光束经另一个分束器再次分束后由功率计探测。为提高测量精度,左旋圆偏振光束通过焦距为250 mm的透镜聚焦至超构表面。超构表面安装在具有1 nm分辨率的高精度电动位移台(Sigma SHRC-203, SIGMAKOKI, 日本)上,可通过计算机控制产生横向位移。经超构表面转换的光束由另一个250 mm透镜准直后,通过耦合器进入单模光纤。光纤连接至功率计,用于测量不同超构表面位移下的基模激光功率。图2(b)展示了多组实验数据,这些数据重现了图1(c)中由公式(10)描述的拟合曲线分布规律。

在测量过程中,我们首先通过从超构表面边缘开始水平扫描,确定了0相位区和 π 相位区的边界——该边界可通过探测光功率的最小值点进行定位。随后采集的多组数据显示,当功率降至入射功率约一半时,曲线斜率达到最大值,该点对应着位移测量的最高分辨率。

3. 长程测量与1 nm分辨率位移测量结果

我们对不同微小位移的测量结果进行了量化分析,以表征系统分辨率。如图3(a)所示,实验测量了超构表

面在不同步长下的响应性能。图3(a)中黑色水平线表示压电驱动级别下超构表面分别以5 nm和2 nm步长进行的位移。实验数据明确显示,2 nm步长能够被清晰区分。为进一步凸显所提出系统的测量能力,我们在装置最敏感区域对1 nm位移进行了多次重复实验,并分析了每次位移前后的功率差值。这种方法使我们能够精确测量更小的位移步长。图3(b)展示了四个不同位置处的功率分布直方图。每个直方图均采集450个测量点计算平均值,并采用高斯函数进行拟合。各条黑色水平线代表完成1 nm水平位移后探测到的平均光功率。

实验数据表明,1 nm位移能够被清晰且稳定地分辨。需要说明的是,1 nm并非本系统的极限精度——通过采用更稳定的实验装置、更高精度的探测器以及锁相放大器来抑制环境噪声,还可以实现更高的测量精度。系统整体误差测量数据详见附录A。

我们进一步研究了影响位移测量精度的因素,并验证了在超构表面大范围内实现高精度、大行程位移测量的能力。由于检测精度取决于功率曲线的最大斜率,因此能够在扩展范围内实现跨尺度的高精度位移测量。我们分析了光斑尺寸和旋转角度对位移精度的影响。图4(a)展示了系统在不同位移区段的整体功率转换结果,这些数据分别在235 μm 和2030 μm 的完整量程范围内进行采样。我们观察到,当入射光束一半落在超构表面的0相位区、另一半落在 π 相位区时,能量并未如理论模拟图1(c)预测的那样衰减至零。这种偏差源于超构表面制备缺陷导致的模式转换效率低于100%。需要强调的是,超构表面尺寸是测量的关键限制因素——超构表面必须完全覆盖聚焦光斑。图4(b)展示了在235 μm 和2030 μm 量程的最敏感

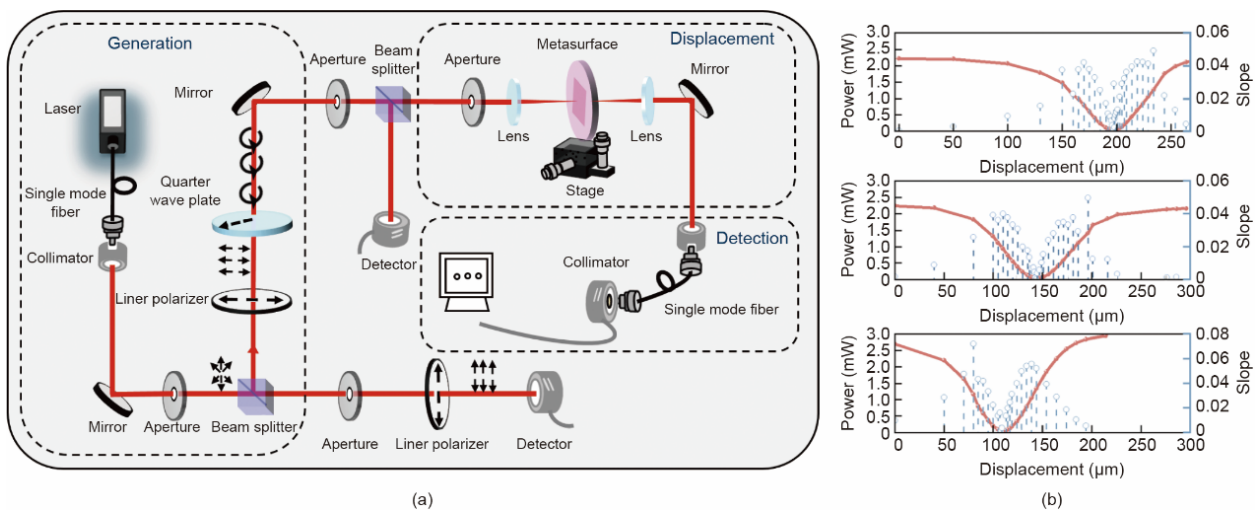


图2. 超构表面量子位移测量的实验实施。(a) 实验布局示意图及各组成部分。(b) 不同光斑尺寸下对应的输出功率实验曲线(用于位移测量); 曲线斜率的最大值出现在入射光功率一半所对应的位置。

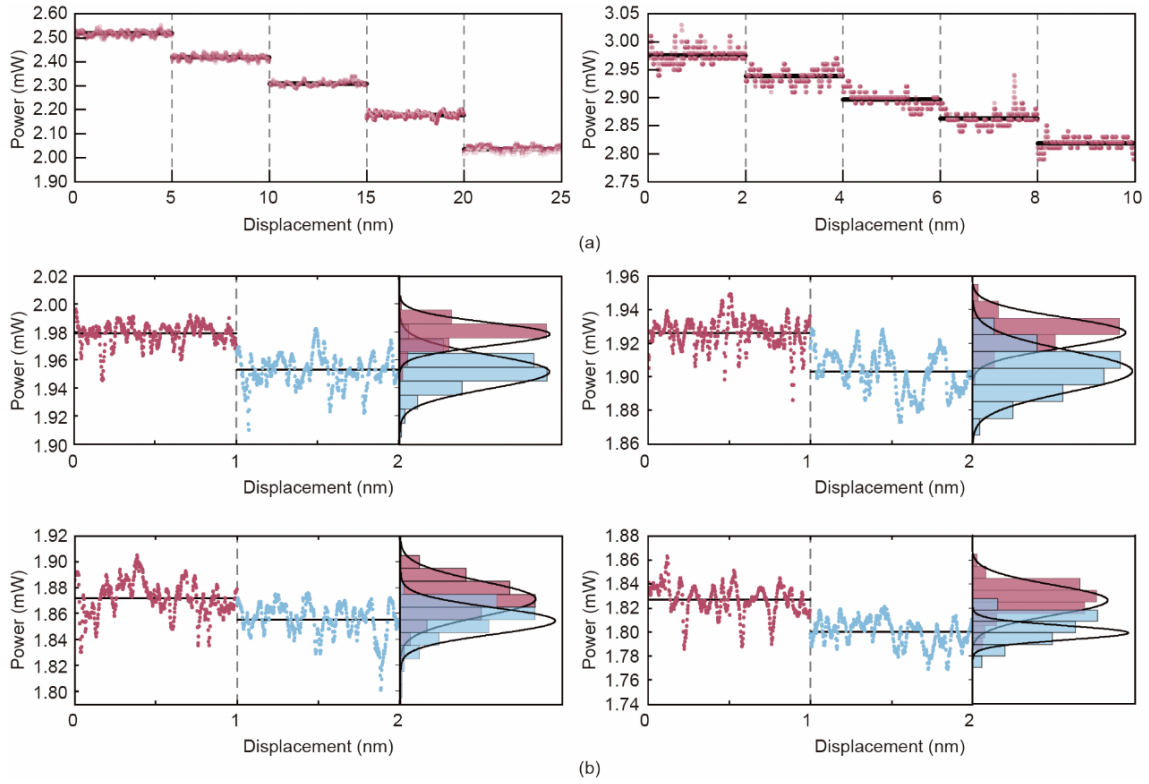


图3. (a) 超构表面在 5 nm (左) 和 2 nm (右) 不同位移步长下的测量结果。(b) 1 nm 位移的测量结果。该微小位移能够被清晰分辨。

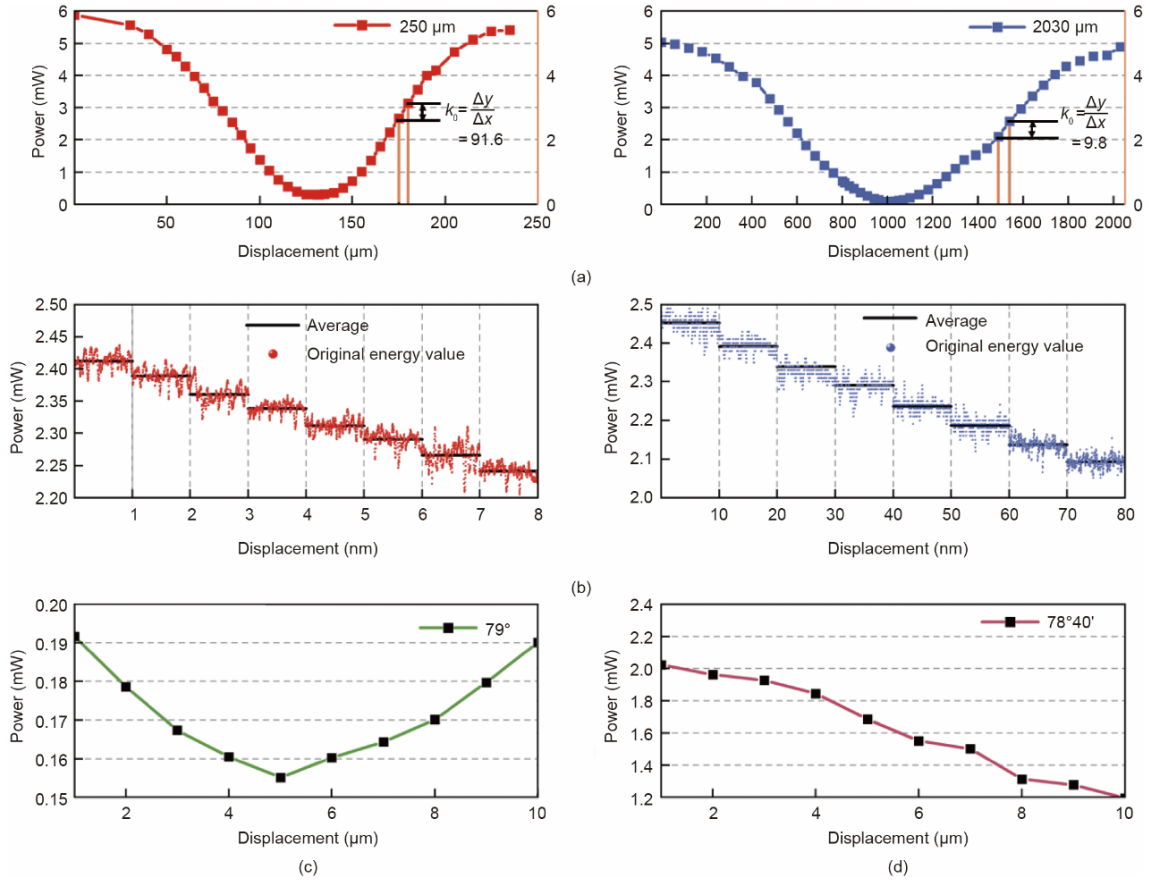


图4. (a) 超构表面在 235 μm 和 2030 μm 不同位移范围内的输出功率。表征测量精度的斜率提升了 10 倍。 k_0 表示曲线上最大斜率点，该点定义了峰值灵敏度区域。(b) 最大斜率对应位置的测量结果，展示了最佳位移测量分辨率。(c)、(d) 不同入射角度对应的位移测量结果。

区域获得的 1 nm 和 10 nm 位移测量结果。数据表明，测量精度随光斑尺寸减小而提升，且较小光斑在相同步进扫描下能产生更集中的功率分布和更高的转换效率。

此外，我们分析了角度对测量系统的影响。为确保光斑以最佳状态入射超构表面并提高光学模式转换效率，我们将超构表面安装在旋转台上。图 4 (c) 和 (d) 分别展示了 79° （相对于旋转中心）和 $78^\circ 40'$ 时的实验结果。在 79° 最佳入射角度下，超构表面垂直扫过光斑中心，将大部分 TEM00 模转换为 TEM10 模，此时功率达到最小值。作为对比，将转台旋转 20 角分（约为机械旋转台最小精度的 1/4）并使压电位移台回归初始位置后，入射功率相较于 79° 位置提升了 110 倍。这一显著增长表明转换效果不佳，因为本应降至最低的功率仍维持在较高水平。

4. 讨论

本节将探讨面向不同应用的潜在系统构型，如图 5 所示。超精密测量技术对诸多科学领域（包括激光微纳加工、光刻定位和星际探测等）仍具有不可替代的重要性。对物理量进行日益精确的测量已成为现代科学与技术的关键

目标。以芯片制造为例，极紫外光刻是推动半导体制造工艺向 5 nm、3 nm 等更小节点迈进的关键技术。精密位移测量在确保精确对准、光学稳定性和晶圆台定位方面发挥着关键作用。目前高精度干涉测量技术被广泛用于实时监测和校正运动误差，能有效减小套刻偏差并提升晶圆台定位精度。与传统激光干涉仪相比，本方法在实现皮米级分辨率的同时，具有更易于集成的优势且工作原理更为简洁。我们提出的超构表面模式解耦位移测量系统可用于晶圆台位置的实时监测。未来工作将重点把该方法拓展至大行程六自由度测量领域。此外，如图 5 (b) 所示，该方案能有效消除干涉测量中固有的误差累积问题，并提供更具成本效益的解决方案。

精密测量技术在激光束计量领域同样发挥着关键作用。激光束指向波动会对诸多高精度光学应用（如超分辨率显微成像、纳米光刻及光学镊子等）产生不利影响。在长距离传输路径中，受热膨胀、机械振动和时空不均匀性等非线性效应影响，激光束指向会产生波动。这类波动可分为位置偏差（ x 、 y 方向）和角度偏差（ θ 、 φ 方向）。研究人员通常采用位置敏感探测器和四象限探测器来监测激光束位置与方向的变化。如图 5 (b) 所示，本方案结构简单、鲁棒性强且易于集成，非常适合上述应用场景。这

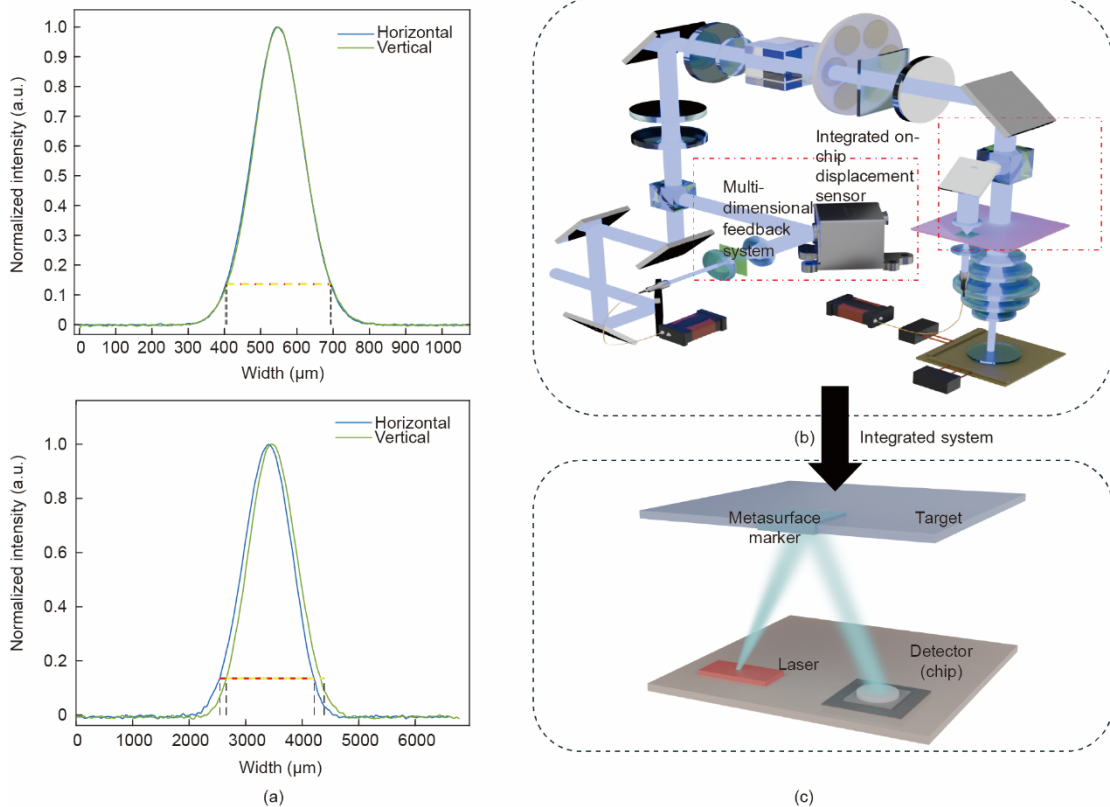


图 5. (a) 面向实际应用的超构表面量子传感器变体实现的不同位移测量方案；(b) 光学纳米加工系统中高精度运动传感器设计；(c) 集成化片上位移量子传感器。

类传感器能精确探测光束位置的微小变化，通过实时反馈控制有效维持光束稳定性。

本研究采用最小测量功率为 20 pW 的探测器，系统使用 25 cm 透镜聚焦时，在最敏感点处测得斜率 $K_{\max} = 91.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 。根据公式 (12) 计算得出，可实现的分辨率检测灵敏度达到 2.18 pm。我们的测量方案实现了任意尺寸光斑的纳米级精度测量。未来工作将聚焦于该技术的实际应用转化与精度的进一步的提升。

$$\text{Achievable limit} = \frac{P_{\min}}{K_{\max}} \quad (12)$$

式中， P_{\min} 表示传感器的探测精度。

5. 结论

本研究展示了一种利用超构表面实现模式转换的新型量子计量方法，可实现亚衍射极限位移测量。通过采用能将入射高斯光束转换为高阶 TEM 模式的超构表面，我们成功实现了一种高精度位移传感技术，实验分辨率达 1 nm。基于费希尔计算的理论分析证实，即使低于衍射极限，测量精度仍能保持稳定。

与传统光学干涉仪及光栅位移传感器相比，本方法具有独特优势：光学架构简化、鲁棒性强且集成成本低。该方法无须依赖复杂的多光束干涉系统或大规模纳米结构加工，即可实现皮米级灵敏度，这一特点使它在精密计量、半导体光刻和高分辨率显微成像等应用领域展现出显著吸引力。此外，研究结果表明，通过优化实验配置（包括提升探测器灵敏度与抑制环境噪声），还能获得更高的测量分辨率。

后续研究将着力于把该技术拓展至大行程、多自由度位移测量，并集成到极紫外光刻的晶圆台实时监测等实际应用中。同时，通过引入压缩光注入、量子增强信号处理等先进量子测量策略，有望进一步突破测量精度的理论极限。这项基于超构表面的量子计量方案不仅为超精密位移传感提供了重要工具，更为量子增强光学测量技术的广泛发展开辟了新路径。

CRedit authorship contribution statement

Wenyi Ye: Writing-original draft. **Yang Li:** Project administration, Conceptualization. **Lianwei Chen:** Project administration, Conceptualization. **Mingbo Pu:** Investigation. **Zheting Meng:** Writing-review & editing. **Yuanjian Huang:** Software. **Hengshuo Guo:** Writing-review & editing.

Xiaoyin Li: Writing-review & editing. **Yinghui Guo:** Writing-review & editing. **Xiong Li:** Writing-review & editing, Investigation. **Yun Long:** Writing-review & editing. **Emmanuel Stratakis:** Writing-review & editing. **Xiangang Luo:** Writing-review & editing, Investigation.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

致谢

本研究获得中国科学院西部之光项目(xbzgzdsys-202206)、国家重点研发计划(2021YFA1401003)、国家自然科学基金(62222513、U24A6010、U24A20317)及四川省数字材料工程研究中心的资助。

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.04.010>.

References

- [1] Xu J, Mao Y, Li Z, Zuo Y, Zhang J, Yang B, et al. Single-cavity loss-enabled nanometrology. *Nat Nanotechnol* 2024;19:1472–7.
- [2] Abbott BP, Abbott R, Abbott TD, Abernathy MR, Acernese F, Ackley K, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys Rev Lett* 2016;116(6):061102.
- [3] Biercuk MJ, Uys H, Britton JW, Van Devender AP, Bollinger JJ. Ultrasensitive detection of force and displacement using trapped ions. *Nat Nanotechnol* 2010; 5(9):646–50.
- [4] Chien MH, Steurer J, Sadeghi P, Cazier N, Schmid S. Nanoelectromechanical position-sensitive detector with picometer resolution. *ACS Photonics* 2020;7(8): 2197–203.
- [5] Knobel RG, Cleland AN. Nanometre-scale displacement sensing using a single electron transistor. *Nature* 2003;424(6946):291–3.
- [6] Krieg M, Fläschner G, Alsteens D, Gaub BM, Roos WH, Wuite GJL, et al. Atomic force microscopy-based mechanobiology. *Nature Rev Phys* 2019;1(1): 41–57.
- [7] Song QL, Li Y, Zhou ZY, Xiao YW, Yang JS, Huang LH, et al. High-precision ground measurement technology research for measuring pointing deviation in space-based gravitational wave detection telescopes. *Opto-Electron Eng* 2024; 51(2):230234.
- [8] de Groot PJ. A review of selected topics in interferometric optical metrology. *Rep Prog Phys* 2019;82(5):056101.
- [9] Du J, Lin JB, Quan HY, Hu S. Displacement measurement analysis in distortion detection of lithography projection objective. *Opto-Electron Eng* 2023;50(2): 220226.
- [10] Hertzberg JB, Rocheleau T, Ndikum T, Savva M, Clerk AA, Schwab KC. Back-action-evading measurements of nanomechanical motion. *Nat Phys* 2010;6(3):

- 213–7.
- [11] LaRose R, Tikku A, O’Neel-Judy É, Cincio L, Coles PJ. Variational quantum state diagonalization. *npj Quantum Inf* 2019;5(1):57.
 - [12] Zang H, Xi Z, Zhang Z, Lu Y, Wang P. Ultrasensitive and long-range transverse displacement metrology with polarization-encoded metasurface. *Sci Adv* 2022; 8(41):eadd1973.
 - [13] Zang H, Zhang Z, Huang Z, Lu Y, Wang P. High-precision two-dimensional displacement metrology based on matrix metasurface. *Sci Adv* 2024; 10(2): eadk2265.
 - [14] Barboza R, Babazadeh A, Marrucci L, Cardano F, de Lisis C, D’Ambrosio V. Ultra-sensitive measurement of transverse displacements with linear photonic gears. *Nat Commun* 2022;13(1):1080.
 - [15] Yap MJ, Cripe J, Mansell GL, McRae TG, Ward RL, Slagmolen BJJ, et al. Broadband reduction of quantum radiation pressure noise via squeezed light injection. *Nat Photonics* 2020;14(1):19–23.
 - [16] Lu Q, Xiao Q, Liu C, Wang Y, Zhu Q, Xu M, et al. Inverse design and realization of an optical cavity-based displacement transducer with arbitrary responses. *Opto-Electron Adv* 2023;6(3):220018.
 - [17] Hu P, Chang D, Tan J, Yang R, Yang H, Fu H. Displacement measuring grating interferometer: a review. *Front Inf Technol Electron Eng* 2019;20(5):631–54.
 - [18] Rayleigh L. On the passage of waves through apertures in plane screens, and allied problems. *Lond Edinb Dublin Philos Mag J Sci* 1897;43(263):259–72.
 - [19] Tsang M. Resolving starlight: a quantum perspective. *Contemp Phys* 2019; 60(4):279–98.
 - [20] Tsang M, Nair R, Lu XM. Quantum theory of superresolution for two incoherent optical point sources. *Phys Rev X* 2016;6(3):031033.
 - [21] Tan XJ, Qi L, Chen L, Danner AJ, Kanchanawong P, Tsang M. Quantum-inspired superresolution for incoherent imaging. *Optica* 2023;10(9):1189–94.
 - [22] Zhang JD, Fu Y, Hou L, Wang S. Superresolution imaging of two incoherent optical sources with unequal brightnesses. *Opt Express* 2024;32(15):26147–56.
 - [23] Moreau PA, Toninelli E, Gregory T, Padgett MJ. Imaging with quantum states of light. *Nat Rev Phys* 2019;1(6):367–80.
 - [24] Tenne R, Rossman U, Rephael B, Israel Y, Krupinski-Ptaszek A, Lapkiewicz R, et al. Super-resolution enhancement by quantum image scanning microscopy. *Nat Photonics* 2019;13(2):116–22.
 - [25] Albarelli F, Barbieri M, Genoni MG, Gianani I. A perspective on multiparameter quantum metrology: from theoretical tools to applications in quantum imaging. *Phys Lett A* 2020;384(12):126311.
 - [26] Paúr M, Stoklasa B, Hradil Z, Sánchez-Soto LL, Rehacek J. Achieving the ultimate optical resolution. *Optica* 2016;3(10):1144–7.
 - [27] Nair R, Tsang M. Far-field superresolution of thermal electromagnetic sources at the quantum limit. *Phys Rev Lett* 2016;117(19):190801.
 - [28] Lupo C, Pirandola S. Ultimate precision bound of quantum and subwavelength imaging. *Phys Rev Lett* 2016;117(19):190802.
 - [29] Zanforlin U, Lupo C, Connolly PWR, Kok P, Buller GS, Huang Z. Optical quantum super-resolution imaging and hypothesis testing. *Nat Commun* 2022; 13(1):5373.
 - [30] Frank J, Duplinskiy A, Bearne K, Lvovsky AI. Passive superresolution imaging of incoherent objects. *Optica* 2023;10(9):1147–52.
 - [31] Tsang M. Subdiffraction incoherent optical imaging via spatial-mode demultiplexing. *New J Phys* 2017;19(2):023054.
 - [32] Tsang M. Quantum limit to subdiffraction incoherent optical imaging. *Phys Rev A* 2019;99(1):012305.
 - [33] Unternährer M, Bessire B, Gasparini L, Perenzoni M, Stefanov A. Super-resolution quantum imaging at the heisenberg limit. *Optica* 2018;5(9):1150–4.
 - [34] Yu Z, Prasad S. Quantum limited superresolution of an incoherent source pair in three dimensions. *Phys Rev Lett* 2018;121(18):180504.
 - [35] Astratov VN, Sahel YB, Eldar YC, Huang L, Ozcan A, Zheludev N, et al. Roadmap on label-free super-resolution imaging. *Laser Photonics Rev* 2023; 17(12):2200029.
 - [36] Pushkina AA, Maltese G, Costa-Filho JI, Patel P, Lvovsky AI. Super-resolution linear optical imaging in the far field. *Phys Rev Lett* 2021;127(25):253602.
 - [37] Schlichtholz K, Rudnicki Ł. Superresolution in separation estimation between two dynamic incoherent sources using spatial demultiplexing. 2024. arXiv: 2407.10507.
 - [38] Sajia A, Qian XF. Superresolution of two unbalanced point sources assisted by the entangled partner. *Phys Rev Res* 2022;4(3):033244.
 - [39] Tham WK, Ferretti H, Steinberg AM. Beating rayleigh’s curse by imaging using phase information. *Phys Rev Lett* 2017;118(7):070801.
 - [40] Luo XG. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces. *Sci China Phys Mech Astron* 2015;58(9):594201.
 - [41] Xie X, Pu M, Jin J, Xu M, Guo Y, Li X, et al. Generalized Pancharatnam–Berry phase in rotationally symmetric meta-atoms. *Phys Rev Lett* 2021; 126(18): 183902.
 - [42] Wang X, Wang H, Wang J, Liu X, Hao H, Tan YS, et al. Single-shot isotropic differential interference contrast microscopy. *Nat Commun* 2023;14(1):2063.
 - [43] Wang X, Hao H, He X, Xie P, Liu J, Tan J, et al. Advances in information processing and biological imaging using flat optics. *Nat Rev Electr Eng* 2024;1: 391–411.
 - [44] Hao H, Wang H, Wang X, Ding X, Zhang S, Pan CF, et al. Single-shot 3D imaging meta-microscope. *Nano Lett* 2024;24(42):13364–73.
 - [45] Luo X. Subwavelength artificial structures: opening a new era for engineering optics. *Adv Mater* 2019;31(4):1804680.
 - [46] Li X, Chen L, Li Y, Zhang X, Pu M, Zhao Z, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation. *Sci Adv* 2016;11(2):e1601102.
 - [47] Zhang F, Guo Y, Pu M, Chen L, Xu M, Liao M, et al. Meta-optics empowered vector visual cryptography for high security and rapid decryption. *Nat Commun* 2023;14(1):1946.
 - [48] Zheng C, Wang G, Li J, Li J, Wang S, Zhao H, et al. All-dielectric metasurface for manipulating the superpositions of orbital angular momentum via spin-decoupling. *Adv Opt Mater* 2021;9(10):2002007.
 - [49] Ahmed H, Intaravanne Y, Ming Y, Ansari MA, Buller GS, Zentgraf T, et al. Multichannel superposition of grafted perfect vortex beams. *Adv Mater* 2022; 34(30):2203044.
 - [50] Yoon G, Lee D, Nam KT, Rho J. Pragmatic metasurface hologram at visible wavelength: the balance between diffraction efficiency and fabrication compatibility. *ACS Photonics* 2018;5(5):1643–7.
 - [51] Cai H, Czaplowski D, Ogando K, Martinson A, Gosztola D, Stan L, et al. Ultrathin transmissive metasurfaces for multi-wavelength optics in the visible. *Appl Phys Lett* 2019;114(7):071106.
 - [52] Arbabi E, Arbabi A, Kamali SM, Horie Y, Faraon A. High efficiency double-wavelength dielectric metasurface lenses with dichroic birefringent meta-atoms. *Opt Express* 2016;24(16):18468–77.
 - [53] Yu YF, Zhu AY, Paniagua-Dominguez R, Fu YH, Luk’yanchuk B, Kuznetsov AI. High-transmission dielectric metasurface with 2π phase control at visible wavelengths. *Laser Photonics Rev* 2015;9(4):412–8.
 - [54] Arbabi E, Arbabi A, Kamali SM, Horie Y, Faraon A. Multiwavelength metasurfaces through spatial multiplexing. *Sci Rep* 2016;6(1):32803.
 - [55] Chen WT, Khorasaninejad M, Zhu AY, Oh J, Devlin RC, Zaidi A, et al. Generation of wavelength-independent subwavelength Bessel beams using metasurfaces. *Light Sci Appl* 2017;6(5):e16259.
 - [56] Wang QS, Fang Y, Meng Y, Hao H, Li X, Pu M, et al. Vortex-field enhancement through high-threshold geometric metasurface. *Opto-Electron Adv* 2024; 7(12): 240112.
 - [57] Liu Q, Pierce DA. A note on Gauss–Hermite quadrature. *Biometrika* 1994; 81(3):624–9.
 - [58] Kang D, Heo H, Yang Y, Seong J, Kim H, Kim J, et al. Liquid crystal-integrated metasurfaces for an active photonic platform. *Opto-Electron Adv* 2024; 7(6): 230216.
 - [59] Yang Y, Forbes A, Cao L. A review of liquid crystal spatial light modulators: devices and applications. *Opto-Electron Sci* 2023;2(8):230026.
 - [60] Helstrom CW. Quantum detection and estimation theory. *J Stat Phys* 1969;1:231–52.
 - [61] Braunstein SL, Caves CM. Statistical distance and the geometry of quantum states. *Phys Rev Lett* 1994;72(22):3439–43.