

---

# 基于直接反馈实现近场动态控制与操控

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/31983.html>

*本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！*

## 基于直接反馈实现近场动态控制与操控。 导读

调控光的能力在包括成像和光谱学，光捕获，量子光子学，光通信，非线性光学等广泛领域具有重要意义。早期的光整形是在自适应光学的框架内进行的，而当代控制光的方法包括空间光调制器（SLM），它能够以高空间分辨率和大动态范围控制光波的相位和振幅。光学波前整形的重要性在许多领域都有所体现，例如通过全息光镊捕获和操纵纳米粒子，这在生物学、生物医学和物理科学中具有广泛应用。此外，它还证明光线能够穿过不透明介质聚焦光线，从而为非侵入性成像开辟了新的可能性。

波前整形在纳米光子学中可以提供亚波长尺度上的光控制，可以在纳米级焦点之间分配功率，以改善超分辨率成像；以及通过精确寻址纳米发射器或旋转粒子来增强光与物质的相互作用。然而，这种整形在没有直接反馈的情况下会受到限制，因为利用光栅等纳米光子模式的耦合机制不会保留入射光束的波前。基于光栅扫描、后处理或大集成时间的近场成像方法能够监测由入射光束偏振或SLM形成的近场，但不能提供实时监测，例如跟踪近场的变化或修复破损或畸变波面。直接反馈只能由扰动场的散射体提供，这限制了纳米级波前整形在动态过程中的适用性

近日，以色列理工学院Guy

Bartal等人提出通过实时反馈对纳米光子场进行主动控制。该研究方法由SLM主动控制并实时监控，这种动态控制包括以30 nm的精度将等离子体焦点平移和分裂，以及动态切换近场模式的角动量。该研究进一步展示了如何利用此功能修复和纠正被结构缺陷破坏的纳米光子图案。该研究的实时映射技术提供实时反馈机制，利用表面等离子体极化子(SPP)研究了金属的3阶非线性。

该成果发表在国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》，题为Dynamic Control and Manipulation of Near-Fields Using Direct Feedback。以色列理工学院Jacob Kheireddine为论文第一作者，Guy Bartal为论文通讯作者。

## 创新研究

### 1. 控制等离子体焦点

该研究通过简单地调整SLM上的相位模式，可快速控制焦点位置。这种调整在样品上产生线性相位梯度，从而在SLM模式偏移对应的位置上生成SPP的干涉。图1展示了在数平方微米范围内对纳米尺度SPP焦点位置的完全控制，焦点在不同位置之间的距离为1.5

$\mu\text{m}$ 。焦点位置的精度由SLM的像素数决定，在当前光学系统中， $1.5\ \mu\text{m}$ 的焦点位移需要SLM上移动50个像素。实时近场映射可以逐像素监测和记录SPP焦点的位移。虽然焦点大小受限于等离子体波长，但位移精度受限于光学系统和SLM的像素密度。检测分辨率则受限于光学系统的放大倍数和摄像头的像素密度。这种紧凑聚焦能力与精确调节的结合可对纳米光子学领域产生影响，如近场自适应光学、等离子体显微镜、纳米颗粒捕捉与操控等。

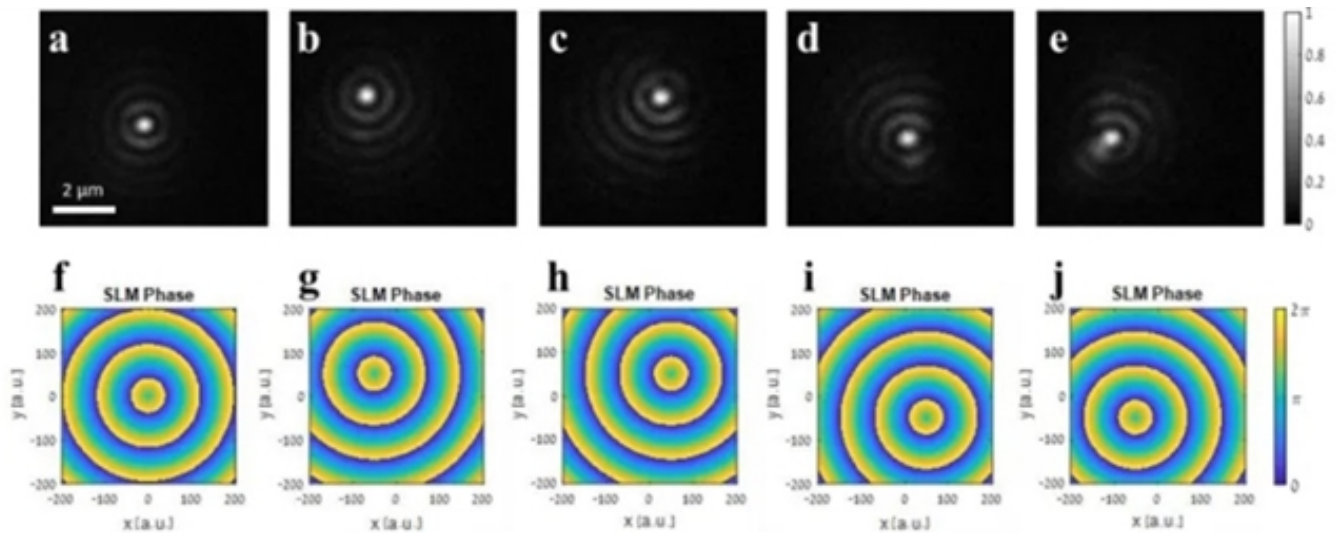


图1. 控制等离子体焦点

## 2. 同时操纵不同的等离子体焦点

尽管控制单个纳米光学焦点的位置至关重要，但某些应用需要对表面上的多个焦点进行控制和操作。例如，同时动态光学捕捉多个粒子常用于DNA展开，而在纳米尺度上实现这种操作可以为这些应用开辟新的途径。在此本研究通过在SLM上叠加平移相位模式来创建实现可单独操控和旋转的焦点对。图2展示了这种焦点对的生成及其在分离度和旋转方面的操控过程。

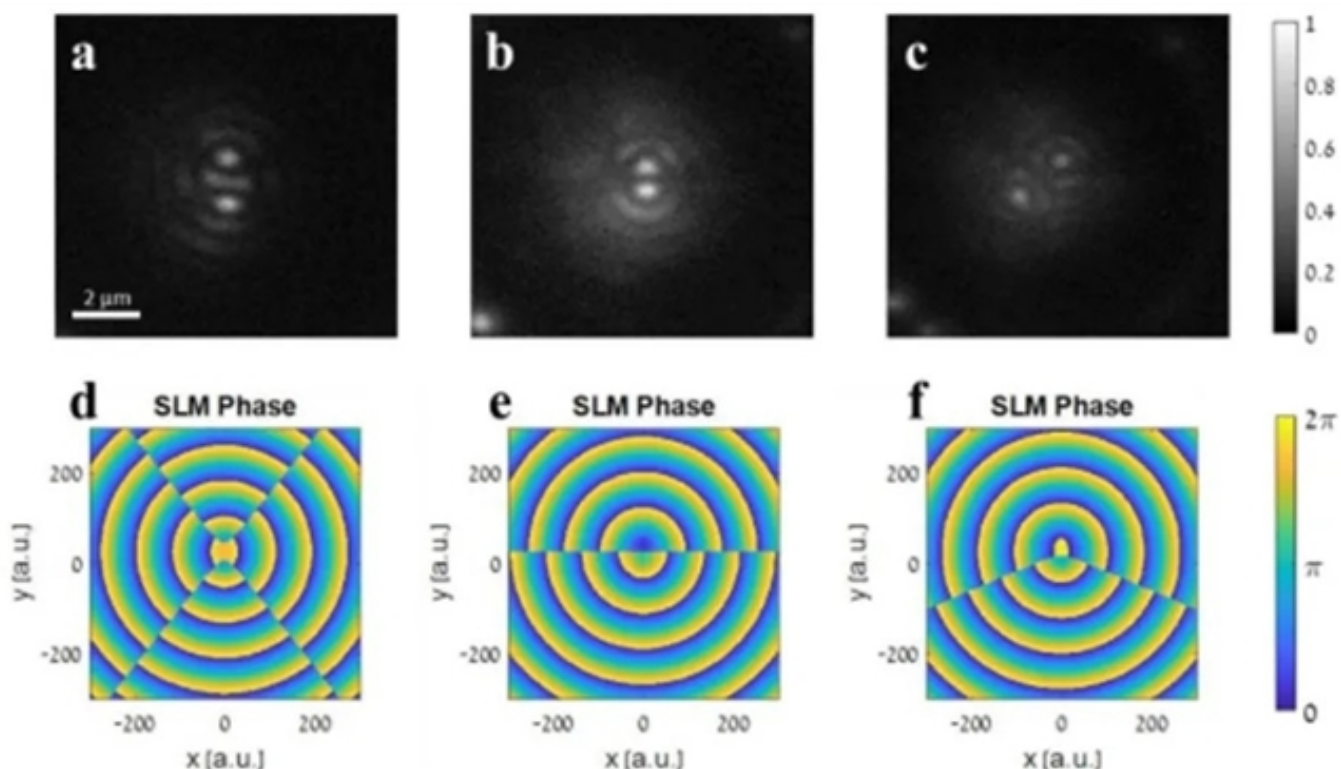


图2. 同时操纵不同的等离子体焦点

### 3. 通过塑造远场相位来控制近场角动量

本研究首次通过SLM实现不同近场角动量间切换，且未受光栅几何的限制。本研究通过在SLM上施加径向递增的相位梯度，可控制近场的轨道角动量(OAM)。由此产生的波前呈螺旋状，使近场模式获得与之相应的拓扑电荷，即 $m$ 次近场贝塞尔模式。图3展示了通过在SLM上施加附加的径向相位梯度，实时映射具有更高角动量的面内近场模式。本研究还展示了这些不同模式之间的无缝切换，范围可达 $m=6$ ，如图3(a-f)所示。

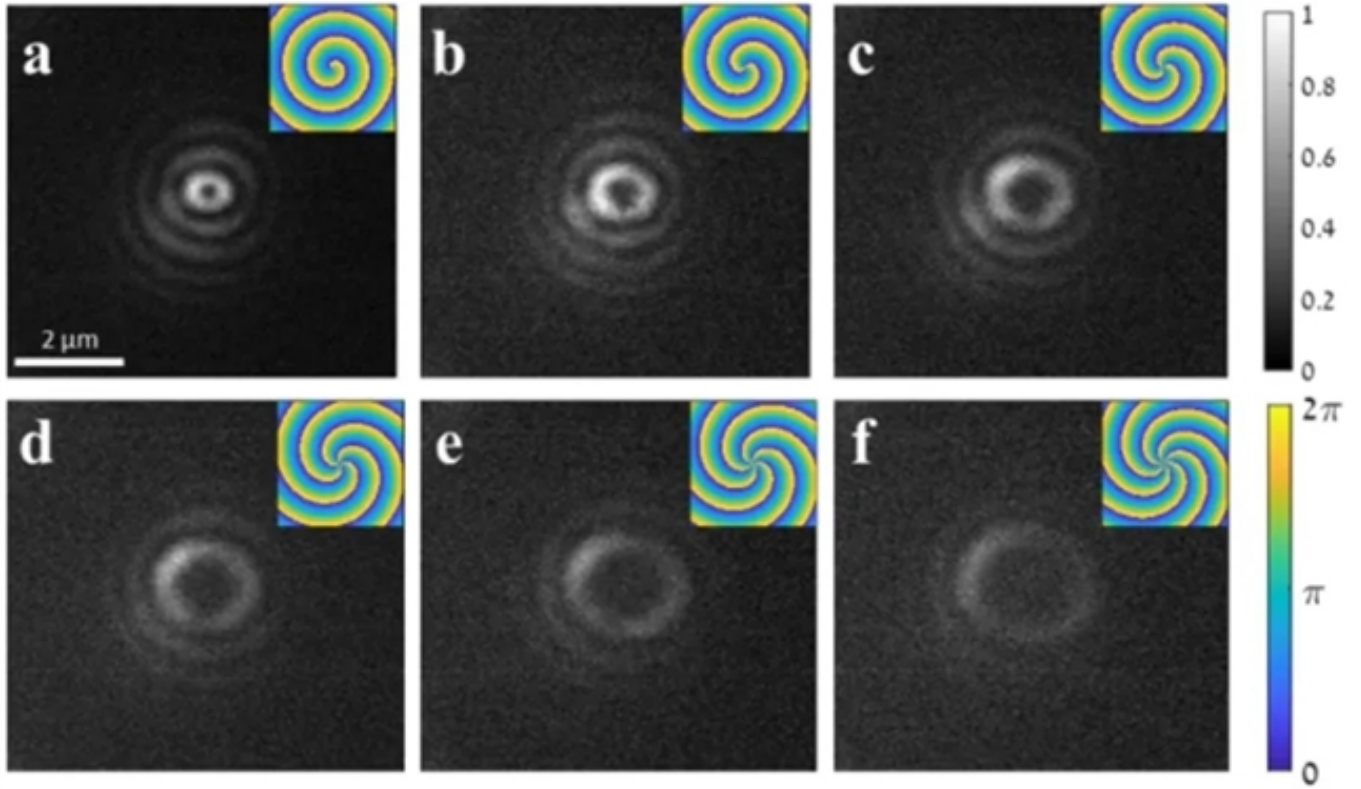


图3. 通过塑造远场相位来控制近场角动量

#### 4. 使用实时近场显微镜校正纳米光子模式作为波前整形的反馈

本研究展示了如何通过波前整形与实时近场成像的结合来纠正因生成光束的失调或耦合器及表面结构缺陷所导致的纳光子学图案损坏。为了增加波前整形的灵活性，本研究使用了圆锥透镜生成环形图案，并在该环形上编码了方位相位信息，随后测量了通过不完美光栅耦合生成的等离子体贝塞尔模式。图4(a)展示了损坏的等离子体系统。图4(b)描绘了由于耦合光栅结构缺陷造成的失真图案，显示了逆时针旋转的面内分量的近场测量，该分量对应于未编码相位的二阶贝塞尔光束。显然，未经相位校正的图案严重失真。由于结构缺陷对图案失真的具体影响尚不明确，波前整形的光束校正需要实时反馈，以便进行迭代过程并补偿失真。通过使用实时监测近场的反馈回路，能够校正光束失真并恢复二阶贝塞尔光束的形状（图4d）。



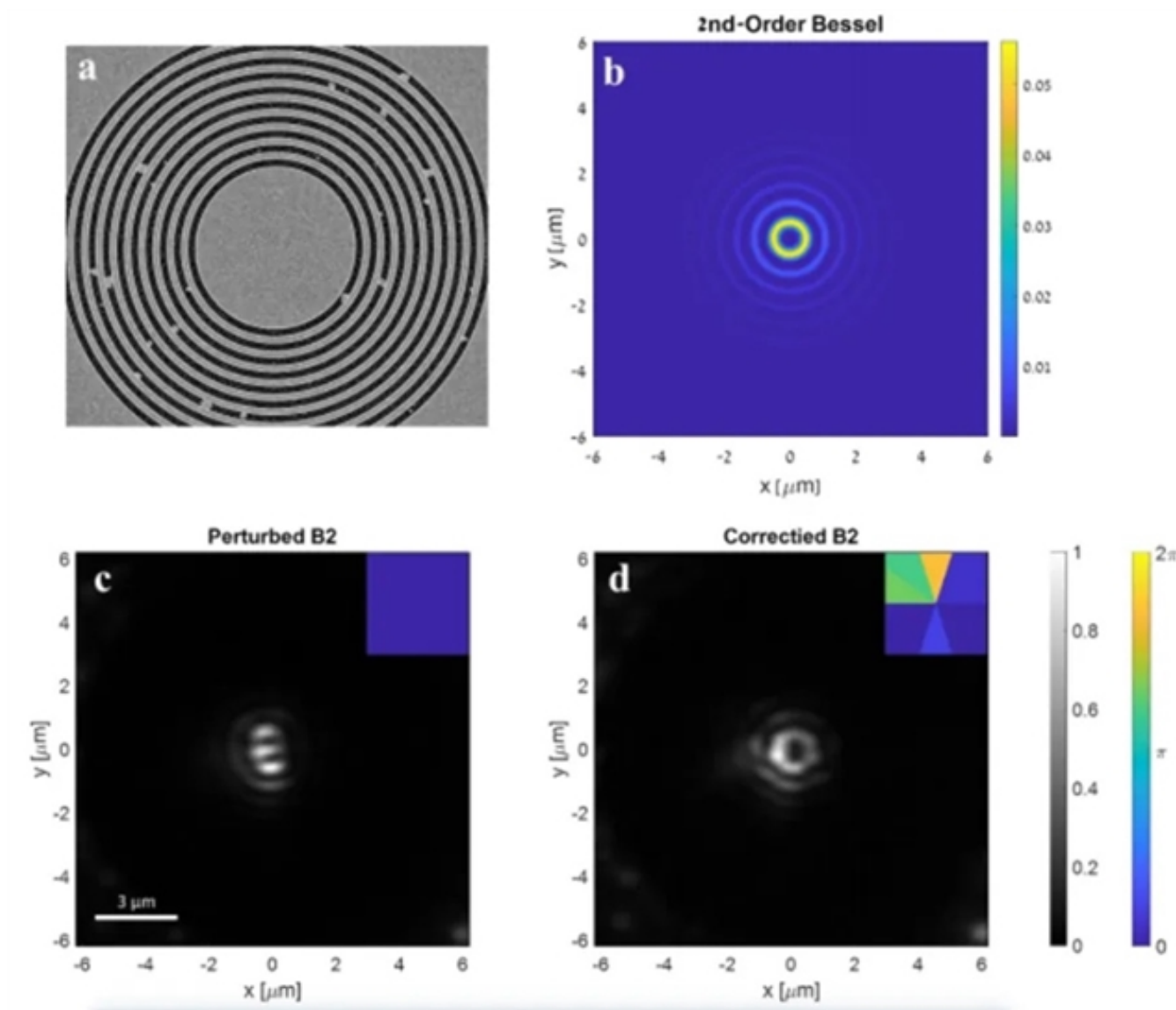


图4. 使用实时近场显微镜校正纳米光子模式作为波前整形的反馈

## 总结展望

在纳米尺度上塑造和控制电磁场对于推进光学通信、传感和计量等领域的高效紧凑型设备至关重要，同时也有助于探索光-物质相互作用和光学非线性的基本性质。实时反馈能够提升对光的主动控制，补偿不断变化的实验条件以及固有的设备缺陷。本研究通过实时近场成像来实现纳米光子学近场的主动控制，利用远场波前整形控制表面波中的纳米光子学图案，实现了纳米尺度的近场焦点平移和分裂、近场角动量的主动切换以及通过实时反馈修正结构缺陷引起的图案损伤。该技术在纳米尺度光学操控、集成量子发射体的光学地址标定和近场自适应光学等应用中具有重大影响，并为一系列新应用开辟了道路，如光镊中的纳米粒子捕捉和操控。该方法不仅能创造独特的近场图案，还能修正和补偿由制造或光束路径中散射体引起的缺陷和相位紊乱，最终实现复杂波函数的精确生成，如未来量子计算和通信应用中的高阶角动量近场模式。此外，先进算法的实现将进一步促进更复杂近场波前的创建，提高应用的多样性并进一步拓展纳米光子学的功能。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

---

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01610-2>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：Guy Bartal 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发