席鹏团队 LAM
旋转扇区光栅实现简约高效的结构光超分辨

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/42998.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！

席鹏团队 LAM 旋转扇区光栅实现简约高效的结构光超分辨。 Light: Advanced Manufacturing 深度解读

北京大学席鹏团队

旋转扇区光栅实现简约高效的结构光超分辨

近期，北京大学席鹏教授团队在 Light: Advanced Manufacturing 发表了题为Sector-Rotational Structured Illumination Microscope for Large-Field-of-View Super-Resolution Imaging的研究论文。

结构光照明显微镜（Structured Illumination Microscopy，SIM）具有光毒性低、分辨率高、探针兼容性好等诸多优点，是目前活细胞超分辨成像的重要技术之一。然而，现有SIM系统通常依赖空间光调制器、数字微镜器件等像素化数字器件生成和快速切换结构光图案，不仅系统成本较高、控制复杂，还存在光能利用率低、杂散衍射强烈等问题。

针对上述问题，研究团队提出了一种旋转扇区结构光照明显微镜（SEctor-ROtational SIM，Sero-SIM），将结构光照明方向切换和相位移动两种调制功能集成到一个旋转式透射光栅中，以极低的器件成本和简洁的控制方式实现近两倍横向分辨率提升。进一步地，通过在系统中引入特殊设计的金字塔透镜，Sero-SIM解耦了光栅扇区尺寸与成像视场之间的限制，使成像视场扩大超过13倍，在100×物镜下实现了107 μm × 107 μm的大视场超分辨成像。该系统在固定细胞和活细胞中的多种亚细胞结构成像中均表现出良好的成像性能，为从组织切片、细胞群体到单细胞和亚细胞结构的多尺度超分辨成像提供了一种简洁、低成本且具有良好扩展性的SIM方案。

研究背景

突破光学衍射极限、观察细胞内部更加精细的结构，是现代荧光显微成像的重要目标。使用条纹结构光来照明样品，可以将原本无法被传统荧光显微镜直接探测的精细结构信息编码到可观测的莫尔条纹中（多个细条纹图案的叠加会产生粗条纹，称为莫尔条纹）。再结合不同方向和相位的多幅原始图像进行计算重建，SIM可以获得约两倍于传统宽场显微镜的横向分辨率。

相比其他超分辨显微技术，SIM无需特殊荧光探针，并具有较低的光漂白和光毒性，因此特别适合活细胞和动态生物过程的持续观察。而获得SIM超分辨图像的前提，是快速、准确地产生不同

方向和不同相位的结构光图案。

早期SIM通常通过旋转光栅、压电位移平台等机械器件完成结构光调制。近年来，可编程的空间光调制器（SLM）和数字微镜器件（DMD）逐渐成为主流方案。这些数字器件具有灵活、高速等优势，但复杂的同步控制以及较高的器件成本，也提高了SIM系统的技术门槛，限制了SIM技术的推广与应用。同时，像素化器件本身的离散结构还可能产生额外杂散衍射级次、光束畸变和光能损失。

因此，研究团队思考的问题是：能否使用更简约高效的方法实现SIM所需要的方向和相位精准调制？

研究亮点

研究团队给出的答案，是一块特殊设计的光栅轮盘。

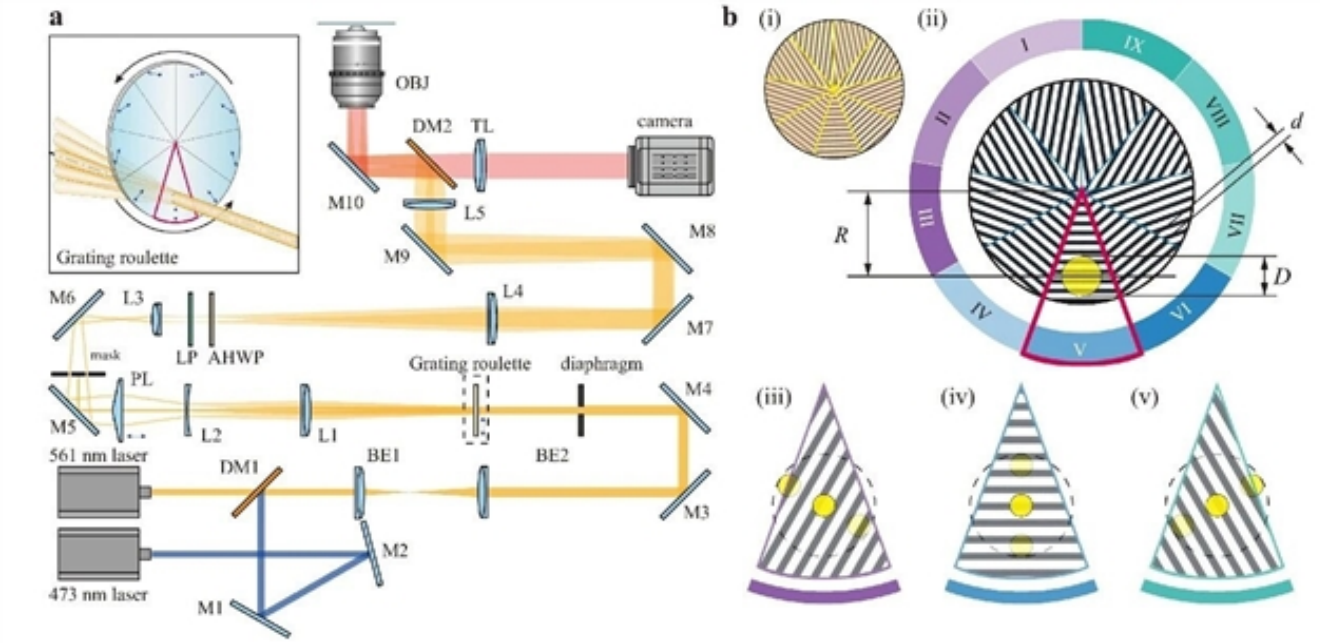


图1：Sero-SIM的光学设计和光栅轮盘的示意图

Sero-SIM将一块透射式衍射光栅划分为九个具有不同结构参数的扇区，并将SIM成像所需要的照明方向和相位信息预先编码于不同扇区之中。随着光栅旋转，不同扇区依次进入光路。一个形象的比喻是，光栅轮盘就像左轮手枪那样进行单向匀速旋转，定点停止，其机械原理简单直观，未来还有望进一步简化。

Sero-SIM设计的关键在于用简单可循环的单个器件一维旋转实现了结构光方向切换和相位移动的二维调制。原本需要多个数字或机械器件协同完成的调制过程，也就由此被集成到了一个简单的光学元件及其一维旋转运动之中。

这种设计不仅简化了硬件架构，也降低了系统同步控制的复杂程度，整个Sero-SIM系统只有旋转座和相机两个有源器件。与此同时，连续的非像素化透射光栅避免了SLM和DMD离散像素结构所带来的杂散衍射和光能损失，在正负一级衍射级次上大幅提高了光能利用率。与此同时，Sero

-SIM的核心光学调制器件成本低于1000美元，是现今主流SIM系统核心器件（如DMD、SLM、扫描振镜等）成本的5%到40%。

在此基础上，研究团队还进一步引入了宁波东方理工大学张昊博士、苏州医工所文刚博士等人发明的金字塔透镜（Gang Wen et al., Optica 12, 1180-1191 (2025)），从而解耦光栅尺寸与成像视野，大幅提高了系统的空间通量。配合不同放大倍率和数值孔径的物镜，Sero-SIM还能够适应从组织切片到亚细胞结构等不同空间尺度的超分辨观察需求。

研究团队利用固定样品和活细胞样品对系统进行了验证，表明这种简化的结构光调制方式能够稳定实现高质量超分辨荧光成像，并适用于动态生物过程的长时程成像。

可以说，Sero-SIM通过设计新型的高效光学调制元件，以简驭繁，同时保持了科研级超分辨显微镜的成像质量。

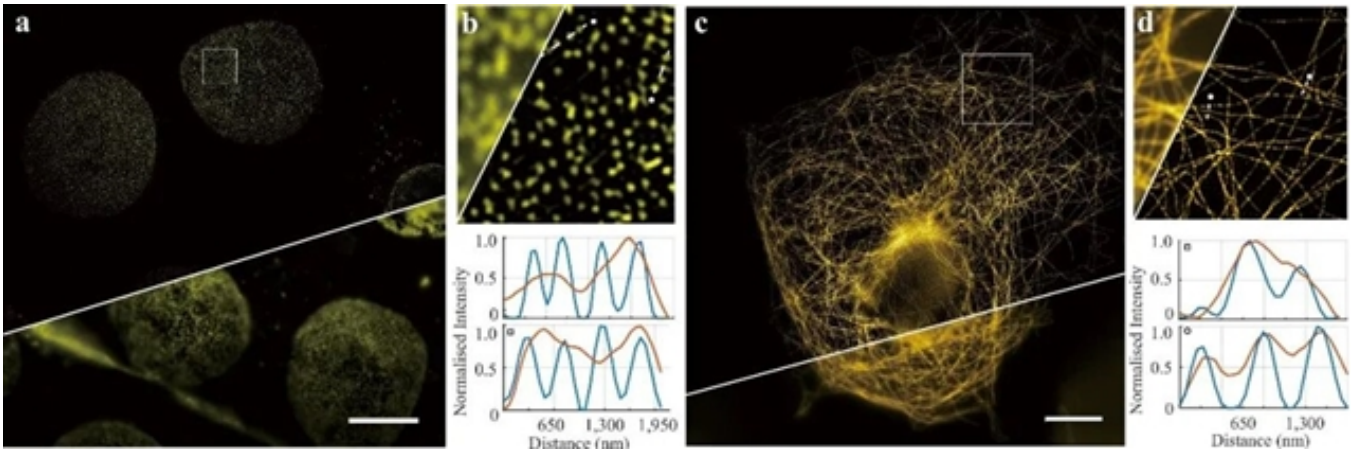


图2：用Sero-SIM实现核孔复合物和微管网络等亚细胞结构的超分辨成像

总结与展望

通过一块旋转扇区透射光栅，Sero-SIM将方向切换与相位移动集成为统一的旋转调制，在降低成本和控制复杂度的同时兼顾光学效率与超分辨成像能力。这种简约高效的实现方式有望降低SIM系统的搭建和使用门槛，为超分辨荧光成像技术在生命科学研究中的进一步普及带来助力——

而这块光栅轮盘的意义还不止于此，它展示了一种有趣的思路：面对日益复杂的数字化光场调控方案，通过充分开发光学器件自身结构，将复杂的调制功能编码进简单的物理运动之中，或许能为突破数字器件垄断的高性能显微系统提供可行的技术路径。

北京大学未来技术学院席鹏教授、生命科学学院李美琪博士、未来技术学院博士生曹睿杰为论文共同通讯作者。北京大学未来技术学院博士生王瀚、曹睿杰为论文共同第一作者。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.121

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等事宜，请与我们接洽。
作者：席鹏等 来源：《光：先进制造》

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转发