
为飞秒光波做时空“微分”

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40988.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！

为飞秒光波做时空“微分”。导读

在信息高速流动的今天，光作为信息载体，其速度和带宽的优势正被不断挖掘。其中，超快光学脉冲——在皮秒乃至飞秒的极短时间内闪烁的光信号，为超高速通信、超精密测量和前沿科学研究提供了可能。然而，如何对这些稍纵即逝的光子信使进行实时、有效的处理和计算，已成为制约其潜能进一步释放的核心瓶颈。传统的电子芯片在如此惊人的速度面前显得力不从心，其处理速度远跟不上飞秒光脉冲的变化节奏。浙江大学阮智超教授与中国科学技术大学黄坤教授领导的联合团队，设计并制造出一种特殊的介质超构光栅，巧妙地构建了一个时空微分器，首次在实验上实现了对飞秒超快光脉冲的同时空模拟微分运算。该时空微分器能够直接在光传播过程中对光波包络进行计算，其实验分辨率在空间上约14微米，时间上约260飞秒。研究进一步揭示了微分后光强与入射光脉冲横向速度间的抛物线关系，为超快运动的测量提供了新思路和方法。该成果为新兴的时空光学领域提供了基础计算模块，对发展超快光计算、构建新型光信息处理系统具有重要意义，在光通信、超精密测量、脉冲整形、高分辨率显微成像等领域展现了广阔的应用前景。

相关研究成果以Experimental demonstration of spatiotemporal analog computation in ultrafast optics为题，发表在期刊《Light: Science Applications》上。

研究内容

要实现对单个飞秒光脉冲的直接处理，挑战是巨大的。当一个光脉冲在空间中传播时，它不仅的时间维度上快速演进，其空间形态（如光斑的形状、位置）也在同步发生变化。这种时间和空间的交织耦合，即时空特性，蕴含着丰富的信息。传统的处理方式是先通过光电探测器将光信号转化为电信号，再由电子芯片进行计算，最后可能还需要再转回光信号。这一光-电-光的转换过程不仅引入了难以避免的延迟，更重要的是，其处理速度受到了电子器件物理极限的严格限制，完全无法匹配飞秒级别的信息更新速率。因此，学术界一直在探索一种全新的计算模式：能否跳过复杂的电学转换，直接在光传播的过程中，利用特定的光学器件对光波本身进行计算？这种模拟光计算的设想，尤其是在处理时空耦合的超快脉冲方面，一直缺乏有效的实验验证。

打破对称性，赋予器件时空计算能力

研究的核心在于一块精心设计的超构光栅。传统的光栅结构通常具有一定的对称性，而团队反其道而行之，通过在纳米尺度上非对称地排布硅结构单元，打破了这种镜像对称。这种结构上的不平衡，使其对不同频率（对应时间）和不同入射角度（对应空间）的光产生了线性且非对称的响

应。正是这种独特的响应特性，构成了时空微分运算的物理基础，使得光栅能够同时感知光脉冲在时间和空间上的变化率。

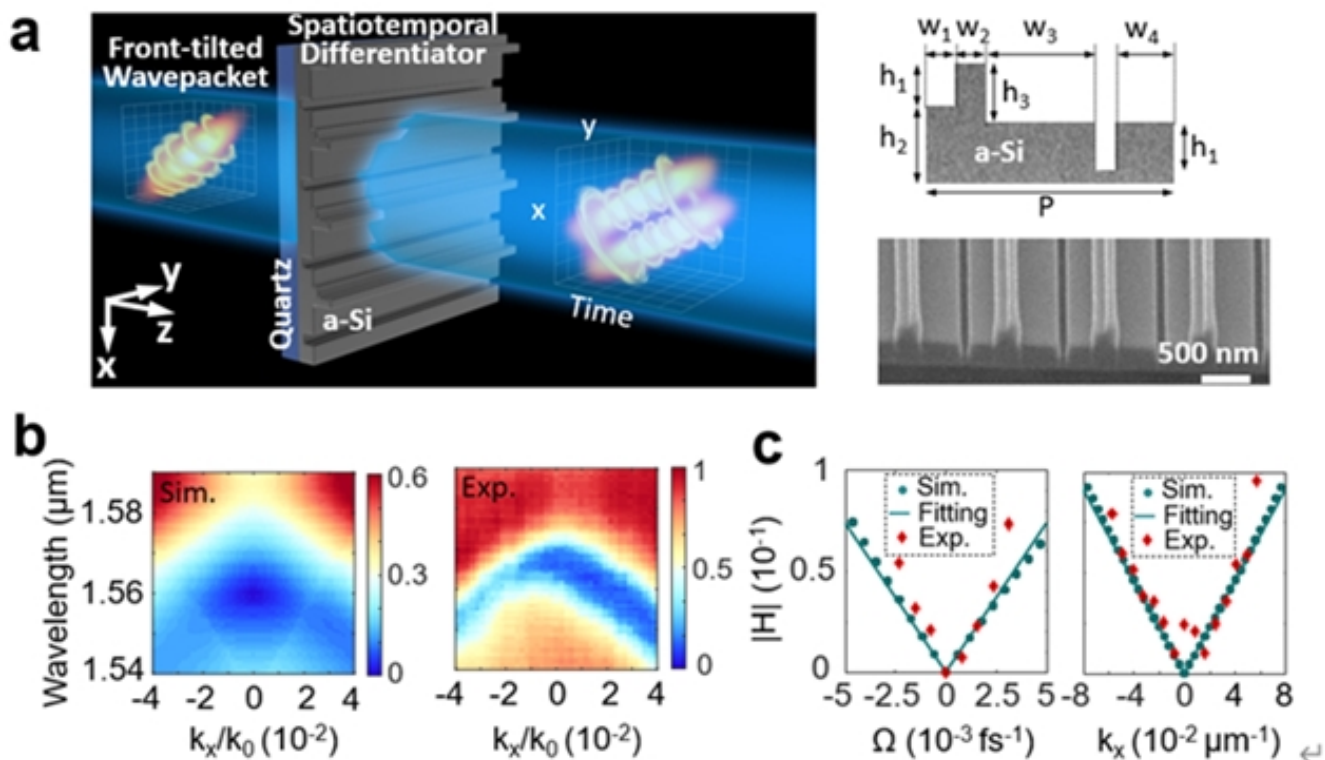


图1.光学时空微分器：基于镜面对称破缺的超构光栅，对于任意时空分布的飞秒超快光脉冲，进行时间-空间的模拟微分运算

实时捕捉前倾光波的时空动态

为了验证这一时空微分器的性能，团队首先需要创造出一种时空特性足够复杂且可控的超快光脉冲作为考题。他们利用超构透镜，成功制备出一种被称为前倾光波包的特殊脉冲——这种脉冲在向前传播的同时，其光斑中心会高速横向移动。实验中，当这些具有不同横向速度的前倾光波包通过时空微分器后，出射的光脉冲均呈现出标志性的双瓣状强度分布，这正是微分运算成功的有力证据。整个计算过程在光脉冲穿过器件的瞬间完成，速度远超任何电子处理设备。

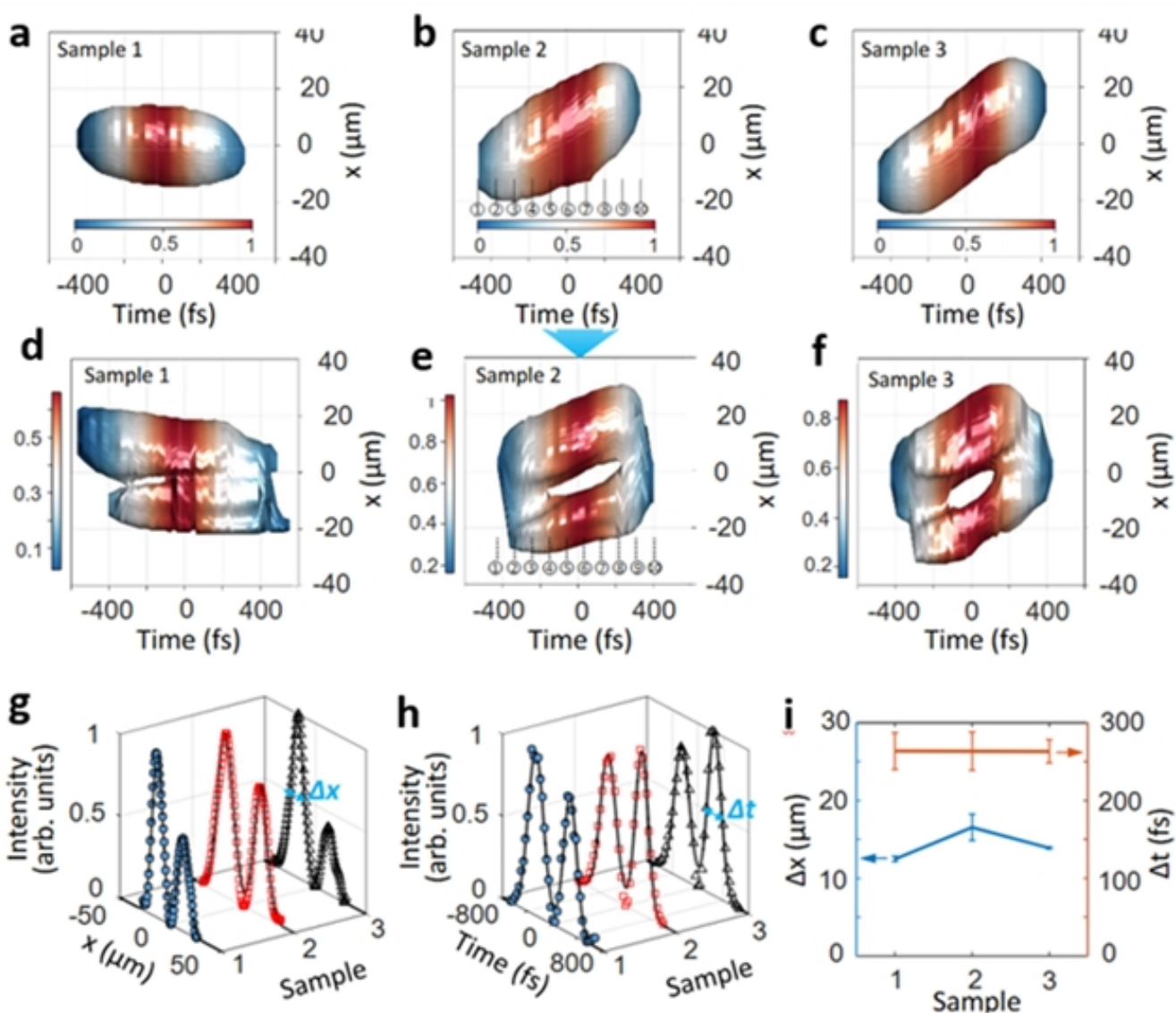


图2. 实验验证光学时空微分器：（a-b）入射具有不同横向速度的前倾光波包；（d-e）经过光学时空微分器后，分别测量透射波包的时间-空间分布，验证了其对应于的模拟微分运算结果；（g-i）时空微分运算后的光学波包在空间和时间上的分辨率分别约为14微米和260飞秒

强度直读速度，简化超快运动测量

更进一步，该研究揭示了一个更为深刻的物理规律。团队发现，经过时空微分后，出射光脉冲的中心光强与入射前倾光波包的横向速度之间存在着一种简洁而优美的抛物线关系。这一发现意义重大，它意味着我们不再需要复杂的设备去追踪光斑的完整时空轨迹来测量其速度，而只需在特定时刻测量出射光的强度，就能直接反演出入射光脉冲的横向速度。这种化繁为简的测量方法，为探测接近光速的横向运动提供了一种全新的、极简的解决方案。

总结与展望

这项研究成果首次在实验上实现了对超快光脉冲的时空模拟计算，为光学信息处理开辟了一个全新方向。这种时空微分器如同为超快光学配备了基本的计算模块，未来有望应用于光通信系统的

信号前处理、超快激光加工的脉冲整形、以及高分辨率显微成像中的边缘检测等领域。随着技术的不断成熟，基于时空光场调控的、超越传统电子计算瓶颈的超快光计算将在高速信息处理、人工智能和基础物理研究等领域发挥重要作用。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02109-0>

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：阮智超等 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