
深紫外-可见-中远红外全谱段白光强激光创制

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40979.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！

深紫外-可见-中远红外全谱段白光强激光创制。 导读

光是电磁波，是信息的载体；光是粒子，是能量的载体；光还是电磁相互作用的信使，是人类心灵沟通微观世界的使者。从原子内电子跃迁到原子间分子振动的不同微观过程，横跨从深紫外到远红外的不同特征波段。为了能够看清楚这些微观过程，科学界长期追寻这样一束能够覆盖全光谱的万能激光光源。然而，自激光诞生60余年来，这一愿望始终未能实现——传统激光光源要么光谱窄、要么能量低、要么平坦度差，无法同时满足宽光谱、强脉冲、高平坦度的苛刻要求。近日，华南理工大学李志远教授团队与中国科学院上海光机所李儒新院士团队联手打破这一僵局，创造性地提出基于中红外强激光泵浦的非线性频率上下转换协同新策略，成功研制出覆盖200-25000 nm（七个倍频程）、脉冲能量达1 mJ、光谱平坦度达17 dB的超平坦全谱段白光强激光。该激光光源有望为同步观测各种物理、化学和生物过程中的微观动态提供前所未有的能力，开启全光谱探测新纪元。相关研究成果以mJ-level 7-octave ultraflat white laser encompassing 200-25000 nm为题发表于Light: Science Applications。中国科学院上海光机所和华南理工大学联合培养博士后洪丽红为本文的第一作者，华南理工大学李志远教授、中国科学院上海光机所李儒新院士为本文的共同通讯作者。

研究背景

光谱学是探究微观世界的重要工具。从19世纪末太阳氢吸收光谱的观测开启量子物理学大门，到20世纪80年代飞秒激光泵浦-探测技术揭示化学键断裂过程，再到90年代阿秒脉冲激光实现电子运动探测，每一次突破都源于光源和光谱技术的进步。然而，电子跃迁、分子振动、声子、等离子体激发等微观过程的特征能量横跨从深紫外（DUV）到远红外（FIR）的极宽光谱范围，这对光源的频谱覆盖能力提出了严峻挑战。

传统非相干热光源虽能提供宽光谱覆盖，但缺乏相干性和高光谱亮度；现有超连续谱激光器仅能实现部分波段覆盖，即使综合各种超连续谱激光器也无法做到全谱段覆盖，而且脉冲能量低、光谱平坦度差，难以满足同时探测不同能量尺度微观过程的需求。如何开发出同时具备极宽光谱覆盖、高脉冲能量、高光谱平坦度、超快脉冲持续时间和良好相干性的全谱段激光光源，成为激光技术领域亟待突破的一个重大科学问题。

研究亮点

李志远/李儒新合作团队突破了传统超宽带激光单向拓展的固有模式，提出了中红外桥接、上下转换协同的双向光谱拓展原创性策略。这一策略如同搭建一座光学桥梁，以3.9

μm 中红外激光为桥接光源，通过上转换过程将短波边界推进至200 nm深紫外区域，通过下转换过程将长波边界延伸至25 μm 远红外波段，最终实现横跨七个倍频程的全光谱覆盖（图1）。

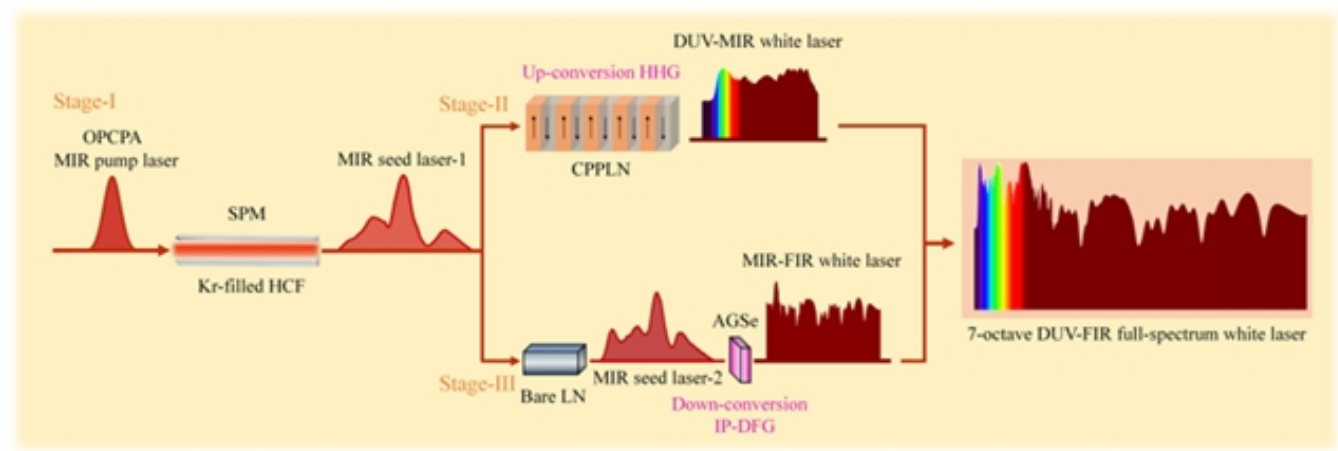


图1：双向光谱拓展策略示意图。以3.9 μm 中红外激光为桥接光源，上转换模块产生深紫外-中红外波段，下转换模块产生中红外-远红外波段，实现七个倍频程全光谱覆盖。

创新点一：打造高能量、超宽带中红外种子源

为了给这座桥梁提供充足的能量支撑，合作团队首先搭建了升级版光学参量啁啾脉冲放大（OPCPA）系统，产生能量7.12 mJ、脉宽120 fs、波长3.9 μm 的中红外强激光。该激光随后泵浦3米长充氦气空心光纤（HCF）后，通过自相位调制效应实现显著光谱展宽。当氦气压力精确控制至2.2 bar，成功获得了覆盖2000-6000 nm的超宽带中红外超连续谱，脉冲能量3.62 mJ，压缩后脉宽仅23 fs，总转换效率达51%（图2a，d）。这一高能量、超宽带的中红外种子激光为后续上下转换协同的双向拓展（图2b，c）提供了充沛的能量储备和宽阔的光谱基础。

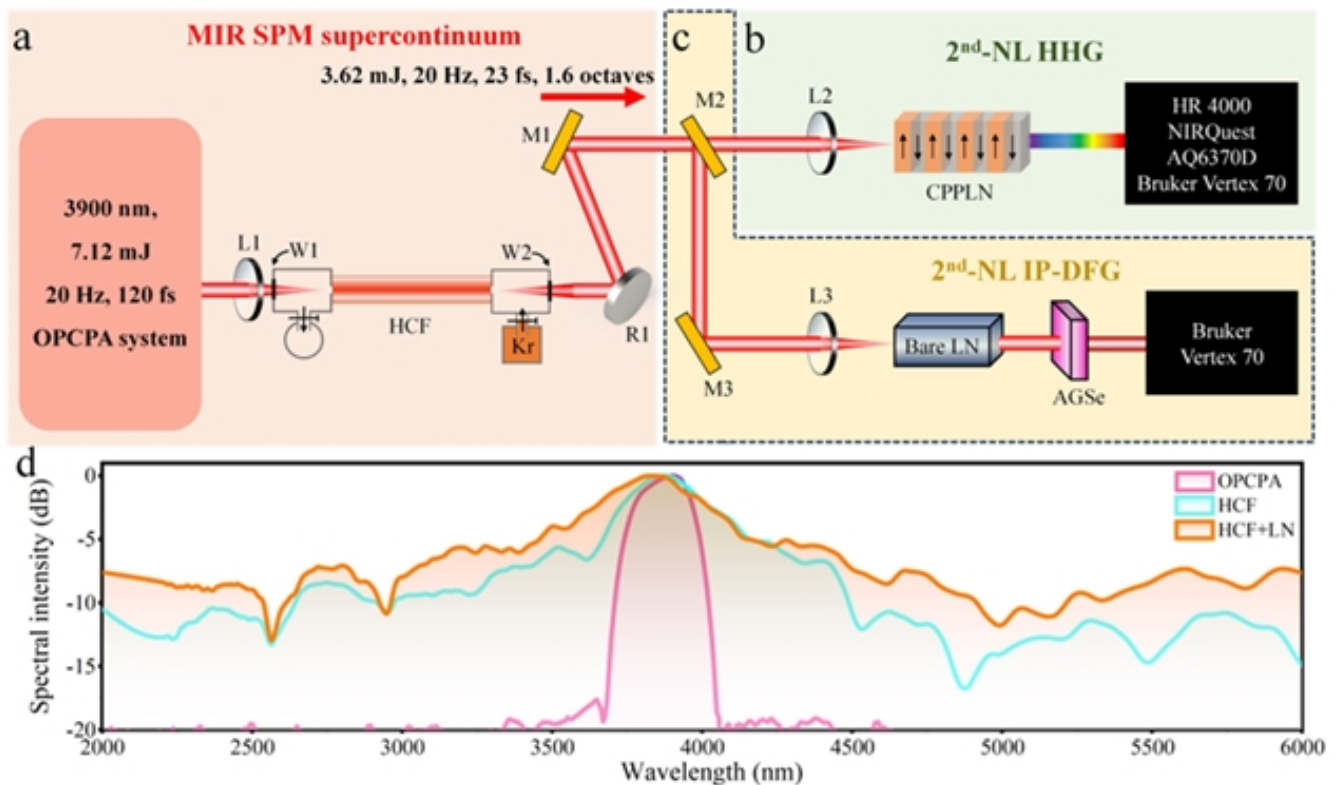


图2：超宽带中红外种子激光的产生和非线性频率上、下转换模块。

创新点二：上转换突破——12次谐波征服深紫外极限

在短波拓展方向，合作团队创新设计的啁啾周期极化铌酸锂（CPPLN）晶体成为关键的非线性魔法武器。该晶体携带6个极宽带倒格矢带，能够同时支持2-12次高次谐波产生，将团队前期10次谐波技术 [Light 12, 199 (2023)]

进一步拓展至新高度。利用这一非线性光学器件，团队将短波边界从350 nm推进至200 nm，首次进入深紫外波段，触及电子跃迁、分子解离等基本量子过程的探测窗口。合作团队通过理论模拟进一步揭示了晶体内部级联高次谐波的演变机制，为这一深紫外突破提供了坚实的理论支撑。

上转换模块实现了高达40%的转换效率，输出脉冲能量达到1.45 mJ，输出光谱从深紫外200 nm连续覆盖至中红外6000 nm，横跨五个倍频程。这一突破为同时探测深紫外电子跃迁、可见光电子激发、近红外及中红外分子振动等多尺度物理和化学过程提供了强大工具。

创新点三：下转换突破——级联架构拓展远红外边界

在长波拓展方向，合作团队精巧设计了LN晶体+AGSe晶体级联架构。该方案充分发挥了两种晶体的互补特性：LN晶体通过三阶非线性效应进一步拓宽中红外种子激光的光谱带宽，为后续非线性频率下转换过程创造更宽的频谱基础；AGSe晶体则利用高效脉冲内自差频（IP-DFG）过程，将长波边界一举推进至25 μm 远红外波段，实现了从2 μm 到25 μm 的超连续光谱覆盖。

下转换模块实现了18%的能量转换效率和0.75 mJ的脉冲能量输出。输出光谱2-25 μm 的长波覆盖意味着系统能够深入探测分子指纹区和晶格振动等低能物理和化学过程，为化学化工、材料科学

、环境监测和生物医学成像等应用提供了重要工具。

创新点四：系统集成——七个倍频程超平坦全谱段白光强激光

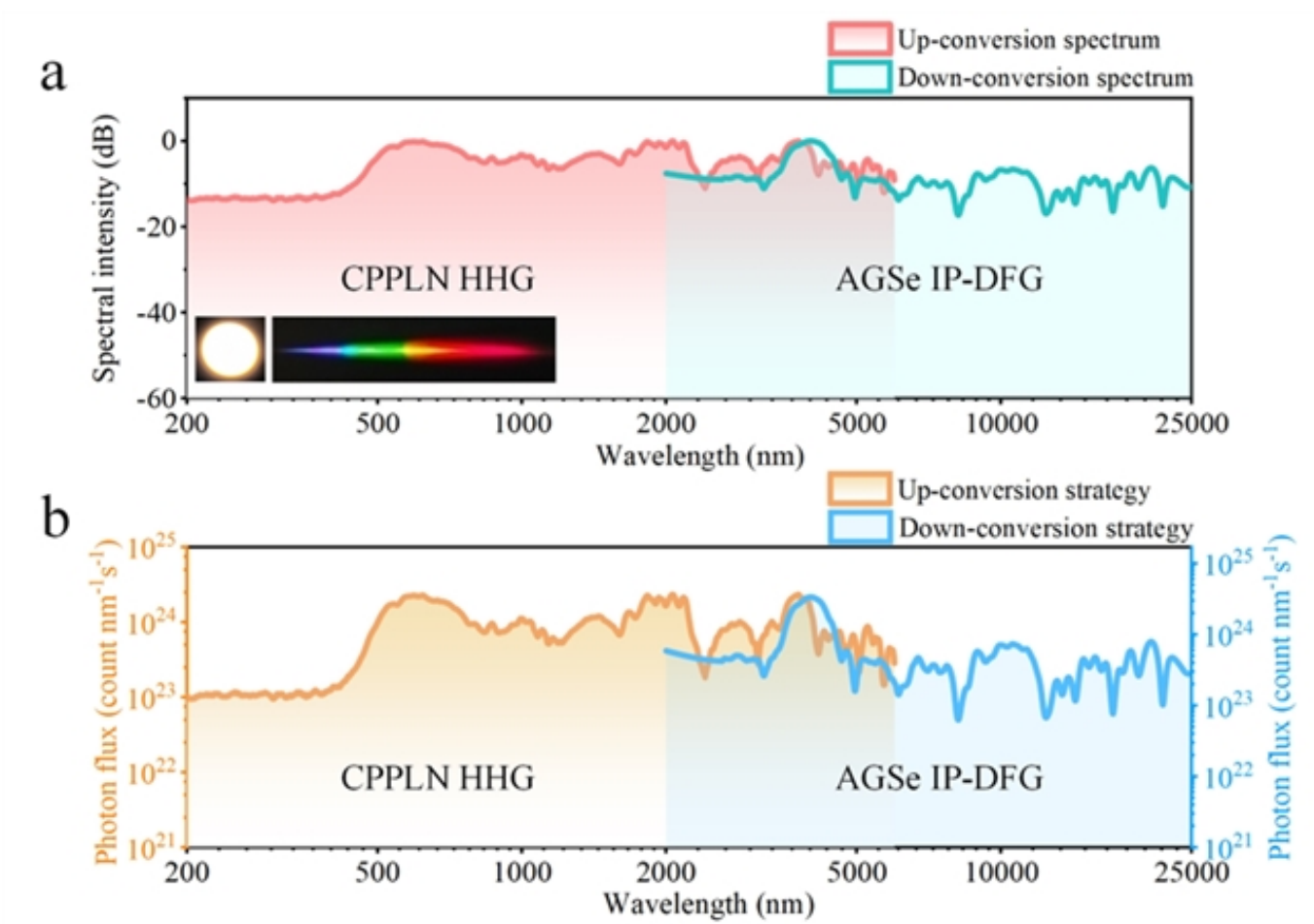


图3：非线性频率上、下转换协同实现高性能深紫外-远红外全谱段白光强激光。

通过上、下转换模块的协同优化，合作团队构建了完整的短波-长波双向拓展体系，最终实现了一套性能指标全面领先世界水平的超宽带白光激光系统。该系统具有五大突破性特征：光谱范围覆盖200-25000 nm，横跨从深紫外（DUV）到远红外（FIR）七个倍频程；脉冲能量达1 mJ；全谱段平坦度优于17 dB（图3a），实现从高能紫外到低能红外光子的高度均匀输出；脉冲宽度约1.8 ps；以及优异的光束相干性。整个系统的光子束流强度达到 10^{23} ~ 10^{24} count nm⁻¹s⁻¹（图3b），比同步辐射装置高出7-8个数量级。基于这些优势，该激光光源使得单束激光即可同时探测五个能量尺度的物理化学过程：深紫外电子跃迁、可见光电子激发、近红外分子振动吸收、中红外分子指纹振动以及远红外晶格振动——这些测量以往需要多台激光器或大型同步辐射装置才能分别完成。该系统为单脉冲全光谱快照技术开辟了道路，有望在高速摄谱学、量子态调控、超快动力学等前沿领域引发突破。

总结展望

本研究以中红外强激光为桥梁，通过创新性的非线性频率上下转换协同策略，成功突破了全谱段

激光在光谱覆盖范围、脉冲能量和光谱平坦度等方面的技术瓶颈，实现了覆盖深紫外至远红外七个倍频程的超平坦白光强激光输出。这一全光谱超快激光光源有望开创一种全新的激光光谱学研究范式——从多源拼接转向单源全谱，从分段测量转向同步快照，为物理学、化学、材料学、生物学等基础科学研究以及生物医学成像、环境监测、工业检测等应用领域开辟广阔前景。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02142-z>

作者：李志远等 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