渐变折射率、任意可变截面3D光波导制造技术——实现超短激光脉冲的芯片级模式操控

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/28439.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！

渐变折射率、任意可变截面3D光波导制造技术——实现超短激光脉冲的芯片级模式操控。 导读

飞秒激光直写技术是一种同时具备三维（3D）加工能力和纳米精度的快速制造技术，被广泛应用于前沿科学研究和各种增材、等材和减材精密工业制造。其中，飞秒激光直写光波导因其3D几何结构、宽透明窗口和低耦合色散等特性，成为构建复合集成3D光子芯片的最具前景的光波导平台。然而，从根本上，无论是基于传统的平面光刻技术还是当前的飞秒激光直写技术，对波导折射率分布的精细控制仍然遥不可及，其主要原因是缺乏一种有效的技术手段可以空间选择性地改变基底材料的折射率。

近日，针对这一长期存在的光学工程难题，浙江大学邱建荣教授团队在飞秒激光制造渐变折射率和任意可变截面的3D光子光路上取得重要进展：研究团队通过开发一种精细的飞秒激光直写方法，即重叠控制的多次扫描（OCMS）技术，通过准确地控制激光辐照区域内的热积累效应和激光扫描轨迹间的重叠度来定制3D波导的折射率分布和截面形状。并且令人惊讶的是，研究团队实验证实该技术适用于多种组分玻璃，甚至是单晶晶体（Adv. Mater. (2024) 2404493）。利用OCMS技术，研究团队开发了复杂折射率分布3D光子器件的制造工艺，该工艺可实现10-5量级的折射率修饰精度，同时折射率修饰单元的最小宽度可以控制到50 纳米，比之前报道的结果（>0.4微米）低近一个数量级。基于这一技术进步，我们演示了 (1)
高加工鲁棒性和超低耦合损耗的单模波导，(2) 高纯度高阶模式转换的宽带耦合，以及 (3) 超短激光脉冲的芯片级模式操控。特别地，我们实现了超连续激光脉冲的低色散、高纯度模式（LP21）转换，其耦合比在210 nm（931-1141 nm）宽带上的最大偏差小于0.1dB，模式提取因子大于20dB。总体而言，该技术提供了一种在3D集成光子光路中实现超宽带、低色散耦合的有效途径，与传统的平面光波导器件相比，在片上传输和操纵强非线性激光脉冲方面展现出压倒性的优势，使其成为构建下一代复合集成3D光子光路的有力工具。

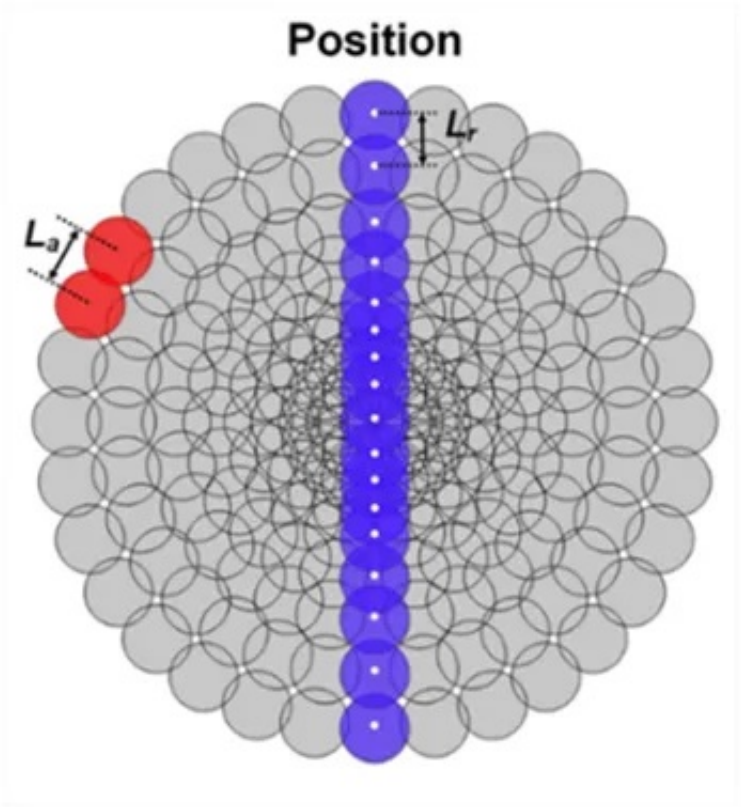
该研究成果以Precise mode control of laser-written waveguides for broadband, low-dispersion 3D integrated optics为题，于2024年6月4日在线发表在光学领域顶尖期刊《Light: Science Applications》上。

本工作的完成单位为浙江大学光电学院、宁波大学信息学院Light+X交叉科学与技术研究院、俄罗斯科学院Dianov光纤中心、之江实验室和香港城市大学电机系。浙江大学光电学院博士研究生王宇莹和宁波大学信息学院钟理京助理研究员为论文第一作者，通讯作者为宁波大学钟理京助理研究员，之江实验室陈智副研究员、马志军研究员、谭德志研究员和浙江大学邱建荣教授。苏州

大学光电学院LAU Kuen Yao（刘坤耀）副教授，浙江大学光电学院博士研究生韩旭虎、杨弈、胡嘉澄，俄罗斯科学院Sergei
Firstov研究员为本工作的实验数据收集做出了重要贡献。香港城市大学CHIANG Kin Seng（鄭建成）教授和浙江大学童利民教授审阅了初稿并对工作进行了指导。这项研究得到了国家重点研发计划、国家自然科学基金、浙江省尖兵领雁研发攻关计划、浙江省自然科学基金的资助。

技术窍门：如何实现重叠控制多次扫描（OCMS）方案？

OCMS方法的要点控制相邻激光扫描路径的重叠度。重叠度（OR）由单条扫描线直径（D=800 nm）与相邻扫描线间距（L）之比定义：OR = D/L。OR在角向相等，在径向变化，每两个相继的扫描线关于中心位置对称。对于阶跃式波导，相邻轨道的重叠在波导横截面上是相同的（即OR =
1.0），从而可以形成阶跃型折射率分布。对于GRIN型波导，OR在中心为4.0，在边界处减小到1.0。对于特殊的W形和U形波导，OR最大值位于最外层，不同之处在于W型波导中心与外环具有相等的OR，而U型波导中心的OR为1.0。在设计波导截面时，通过精心排布扫描线，使不同位置的OR值从1.0连续变化到16.0，步长为0.1，相应的折射率修改单元的宽度控制在50至800 nm之间。附图1所示为重叠率的定义和OCMS方法举例。



附图1：GRIN波导的多扫描方案，La和Lr分别表示方位角和径向相邻扫描线之间的距离。

1.定制波导折射率分布的OCMS方案

在飞秒激光直写波导中，限制激光修改区域形状和折射率分布控制精度的核心因素是高重复率飞秒激光辐照下复杂的热积累和扩散以及自聚焦效应。在本文中，我们探索了一个以前未开发的加工窗口，其脉冲能量是光学击穿阈值的1.0-1.5倍，但远低于自聚焦阈值，其中修改区域的形状和

大小由目标的焦点体积决定。换句话说，它没有热扩散和成丝效应，因此激光诱导的修改局限于焦点区域内，这对于精细制造波导耦合结构以实现高耦合比至关重要。使用OCMS方法构建波导时的空间分辨率由单个扫描线的大小决定。亚衍射极限尺寸的扫描线在控制横截面形状和空间定位方面具有更高的分辨率。以直径为800 nm的单条扫描线作为构成波导横截面的基本结构单元，在高精度运动控制的帮助下，相邻扫描线中心之间的间距低至50
nm，这意味着折射率修改单元的最小宽度可以控制到50nm，比之前（>0.4 μm）降低了近一个数量级。此外，通过精细工程热累积效应实现精确折射率控制的建议机制可推广到各种透明材料，包括透明玻璃、晶体及聚合物材料。

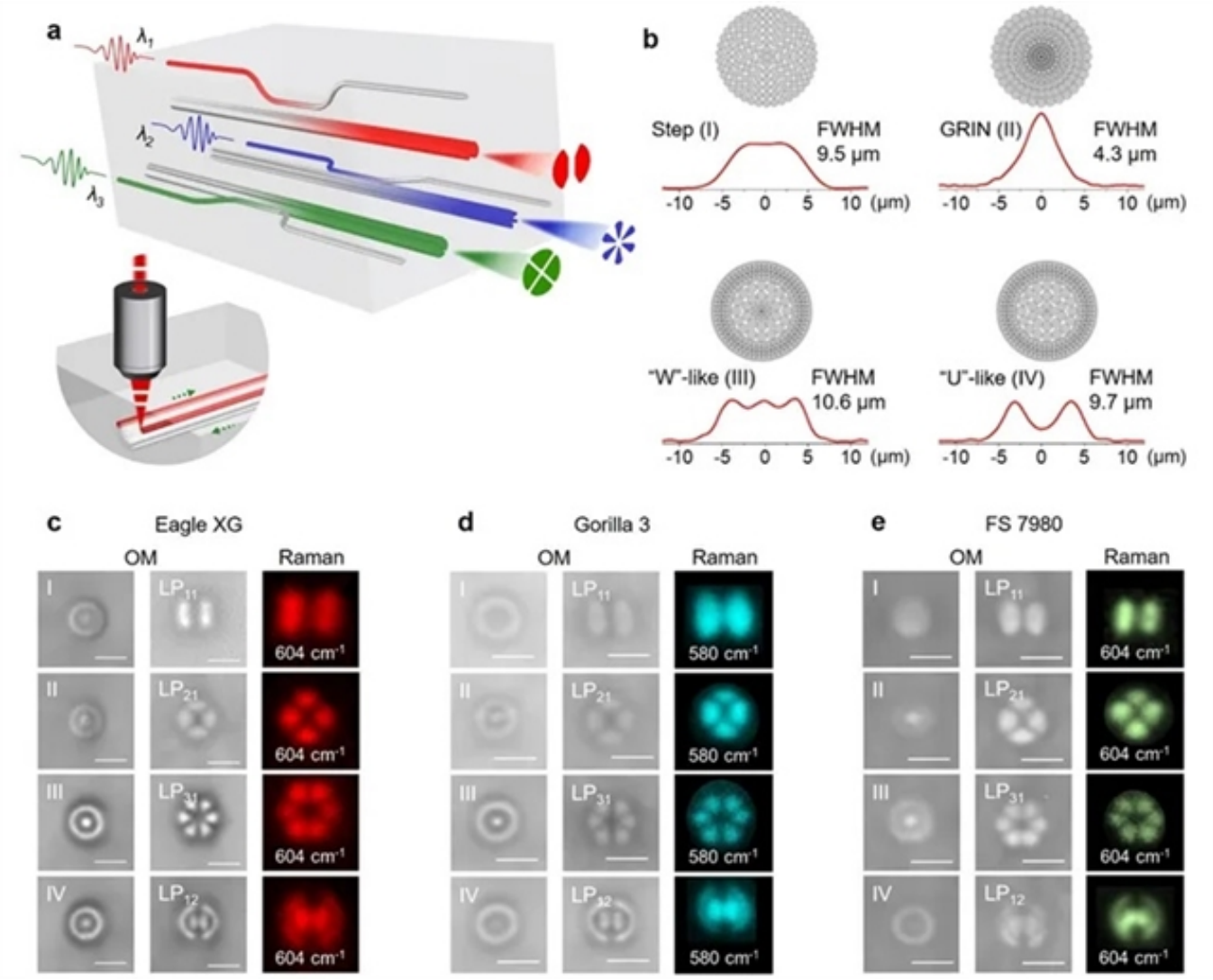


图1：基于可变截面和折射率分布的OCMS波导的构造方法。

2.单模OCMS波导

通常，FLDW 技术中的多扫描方案对外部干扰具有很强的加工稳定性，可以抵消激光功率波动和环境振动对波导均匀性的影响，从而减少散射中心的产生。在此，除了这种能力之外，开发的 OCMS 技术还可以通过在折射率分布和横截面形状的定制中提供极大的灵活性和稳定性，实现对模场分布和模式圆度的精确控制，从而实现出色的光纤波导互连，低耦合损耗接近理论极限。这些波导的 GRIN 分布使其与商用 GRIN 光纤高度兼容，可在 1550 nm 处为 10 mm

长的波导提供创纪录的 0.29 dB 的插入损耗，在不同深度处的损耗变化小于 0.2 dB。此外，我们说明这些波导横截面的高度圆对称性导致极高的模式圆度，大于 97.0% 甚至高达 99.5%（图 2c），模式直径也从 8 μm 到 18 μm变化。

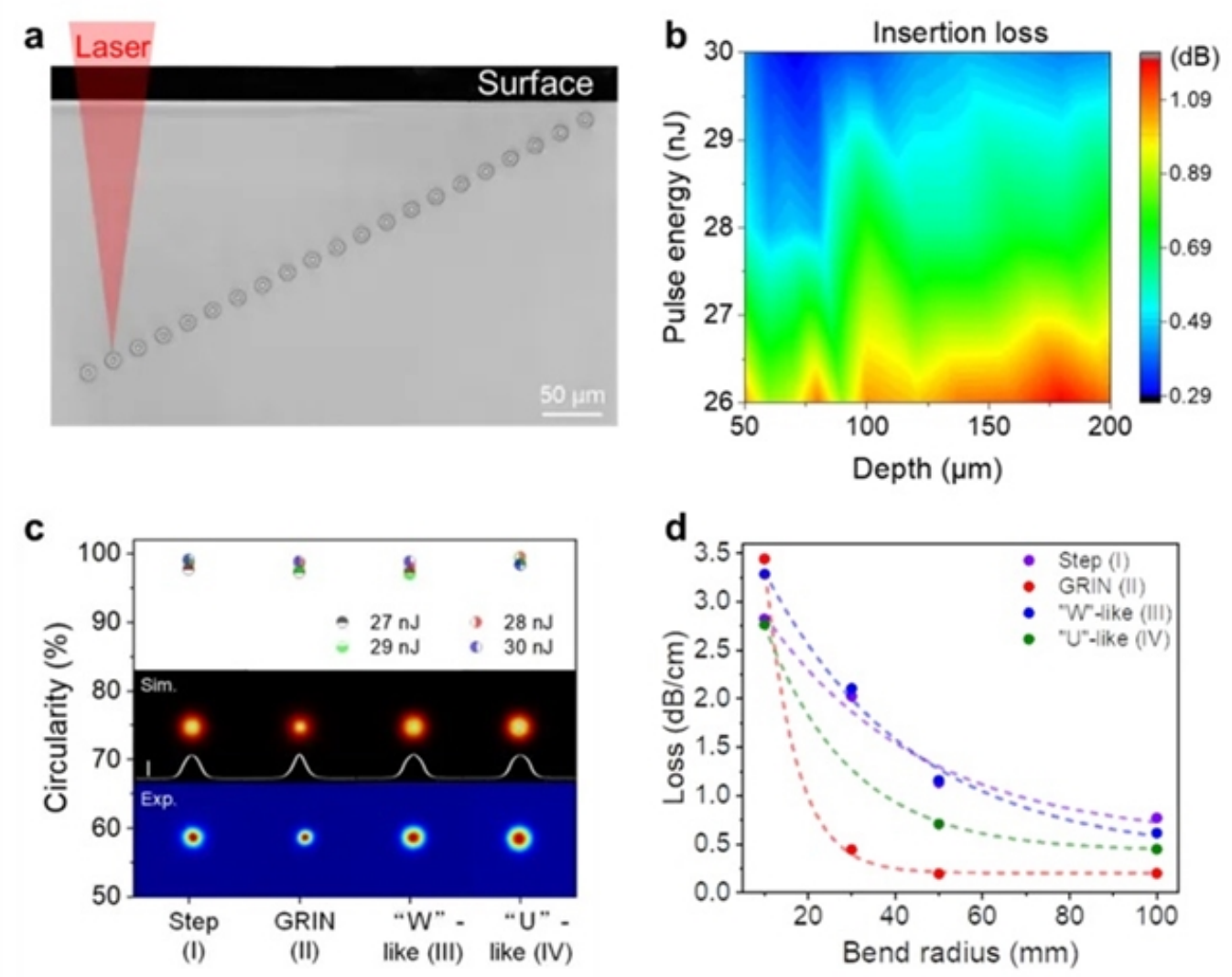


图2：单模OCMS波导特性

3.宽带、高阶模式3D定向耦合器

3D波导可以通过提供控制光耦合的新自由度来克服这一限制，包括定制的横截面形状、可控的折射率对比度以及 3D
空间几何排列，从而降低设备复杂性并提高紧凑性。在本文中，我们展示了 OCMS
方法对模式耦合的精确控制。首先，OCMS
波导的高模式圆度意味着光耦合应该是空间各向同性的，并且由此产生的模式耦合设备在 3D
空间中的行为也应是均匀的。为了说明空间各向同性的耦合，用于旋转非对称 LP模式转换的 3D
波导耦合器由方向耦合器 (DC) 结构组成。在1500-1610
nm宽带上表现出96.9-99.9%、99.2-99.8%和90.8-99.1%的高模式耦合率，模式消光比 (MER)大于 25 dB。因此，基于OCMS波导的DC在以1550 nm为中心的110
nm宽带上性能均匀，耦合比最大偏差<0.1 dB。基于 OCMS

的模式耦合器的工作模式和波长可以轻松扩展到高阶 LP21 模式和近红外波段。LP21 模式的有效折射率在覆盖 980、1030 和 1160 nm 的宽带上的匹配，耦合效率为 93.0-95.0%，MER > 24 dB。值得注意的是，OCMS方法并不能增加上述三维波导器件的工作带宽，而是源于两个因素：(1)玻璃材料在近红外波段的低色散；(2)三维波导以弱耦合方式工作，耦合长度为毫米级。

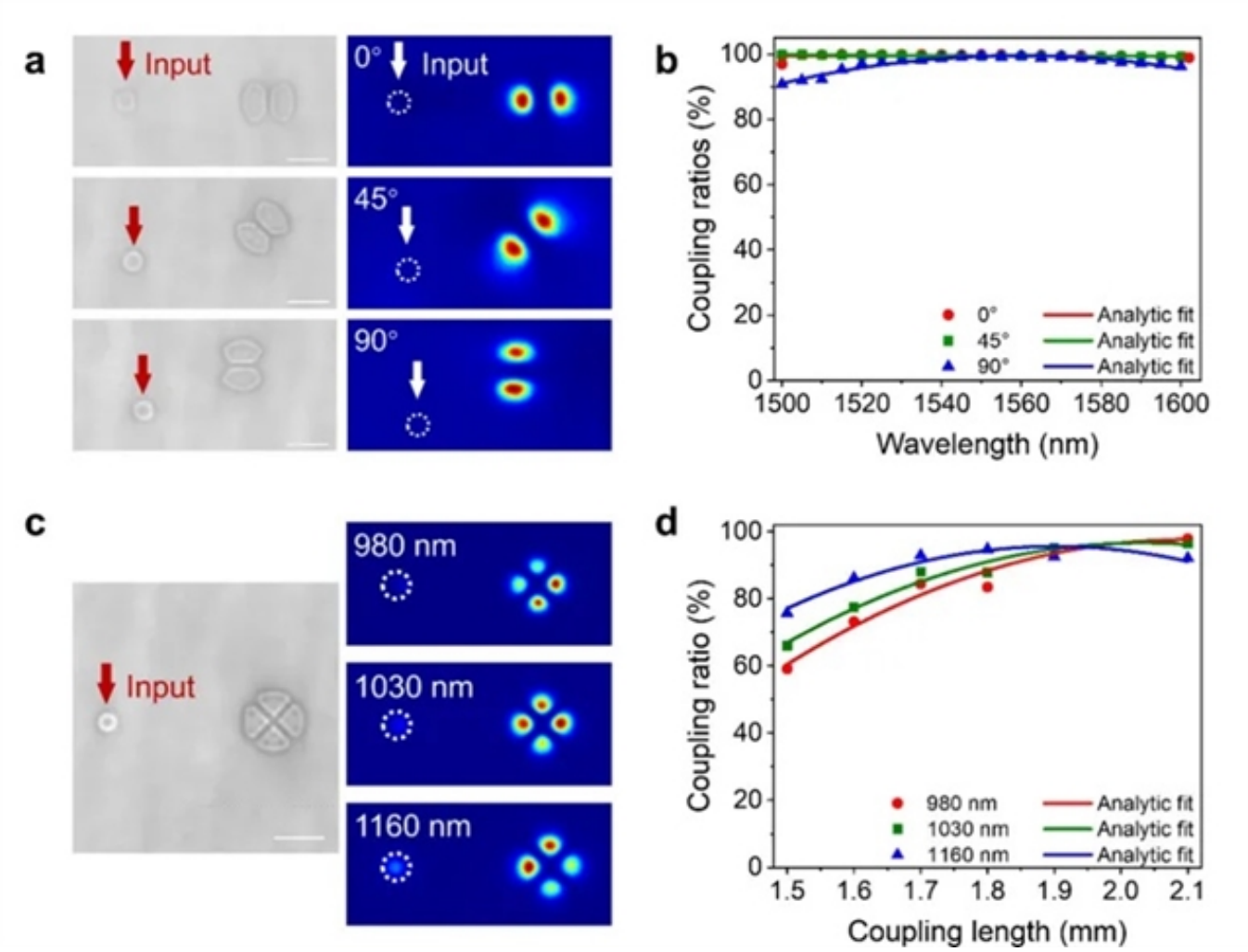


图3：3D波导定向耦合器。

4.超连续谱脉冲的时域保形传输和空间模式变换

进一步，超短激光脉冲耦合到 OCMS 波导中，展示了其在传输和操纵非线性激光方面的应用前景。随着脉冲能量增加 (1 – 70 nJ)，脉冲光谱急剧展宽到> 550 nm。耦合进Core-1 的超连续谱光在 210 nm (931-1141 nm) 宽带上耦合到 Core-2，耦合比的偏差很小（<0.1 dB）。该器件性能甚至优于基于硅、氮化硅和铌酸锂的最先进的 2D 平面波导耦合器件。OCMS 方法提供了一种基于3D玻璃波导实现超宽带和低色散耦合的途径，与传统的平面波导光学平台相比，它在传输和操控线性、非线性激光方面具有压倒性的优势。

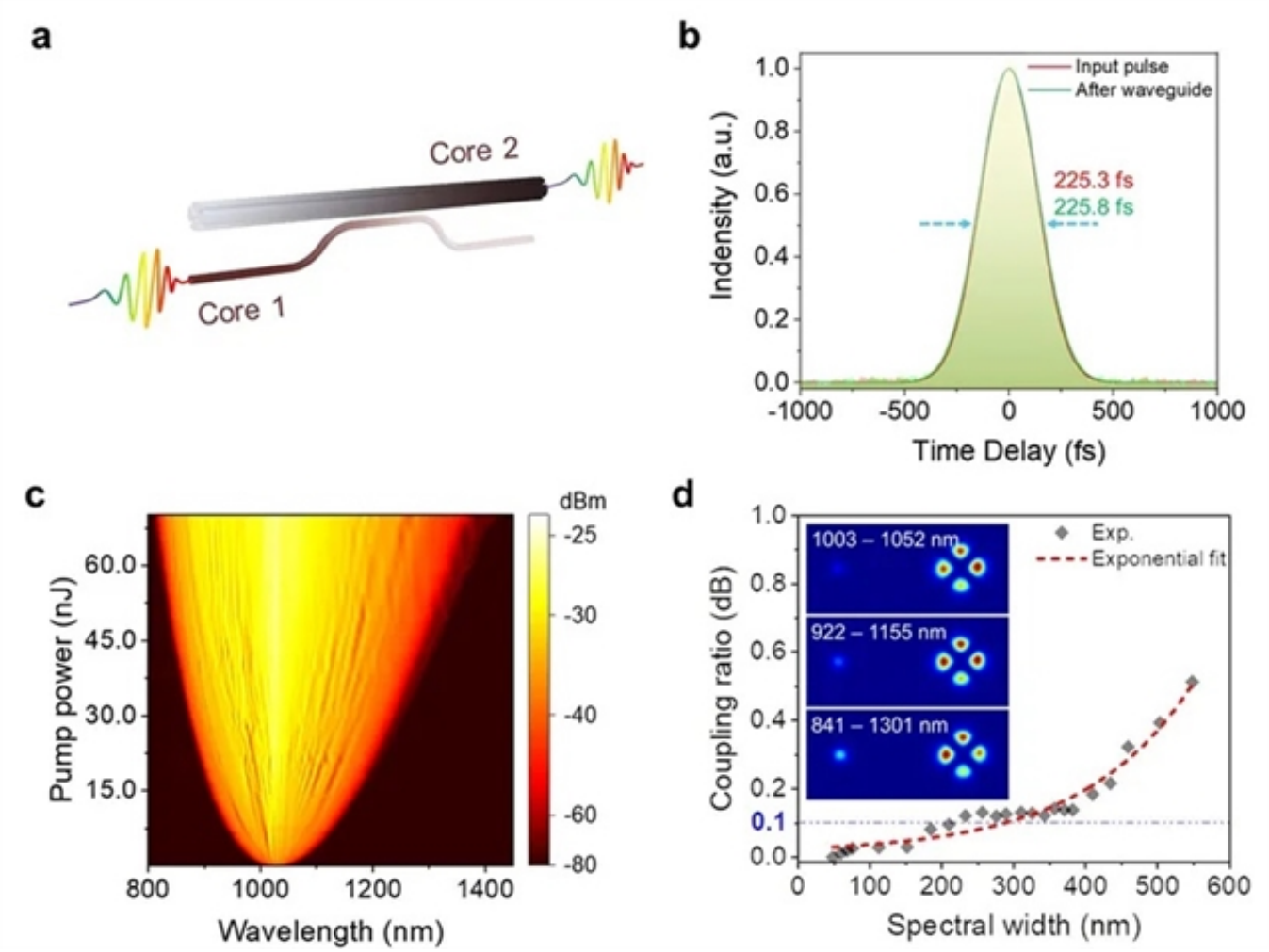


图4：超短激光脉冲的空间模式转换。

作者信息



邱建荣，浙江大学光电学院教授，信息学部副主任。研究方向为激光与物质相互作用以及光功能材料与器件，在Science、Nature Photonics、Nature Commun.、Light Sci. Appl.、Phys. Rev. Lett.、Advanced Materials、J. Am. Chem. Soc.、Nano Lett.、Angew. Chem. Int. Ed.和ACS Nano等期刊发表论文500余篇，论文SCI被引超过37500次。曾获德国Abbe基金Otto-Schott研究奖，美国陶瓷学会Morey奖。1项成果入选中国科学十大进展，6项成果入选中国光学十大进展。入选美国光学学会和美国光学学会Fellow，世界陶瓷科学院院士。



钟理京，光学工程博士，宁波大学助理研究员，硕士毕业于华中科技大学，博士毕业于俄罗斯国家研究型信息技术、机械与光学大学（ITMO大学）。研究兴趣为激光光学、超快激光微纳制造。围绕飞秒激光直写波导的研究，以第一作者或通讯作者在Light: Science Applications，Advanced Materials，Laser Photonics Reviews，Nanophotonics和Optics letter等英文学术期刊发表论文11篇，俄语期刊Физика и химия стекла发表论

文1篇，相关研究成果在ITMO大学官方网站报道；在第12届全国光子学学术会议、CIOP2023、第五届超快激光精密加工技术及应用研讨会、ICG2023作邀请报告。



王宇莹，浙江大学光电学院，博士研究生。硕士毕业于俄罗斯国家研究型信息技术、机械与光学大学（ITMO大学），研究方向为超快激光微纳制造，以一作或共一在Light: Science Applications，Laser Photonics Reviews，Optics Express和Advanced Photonics Research期刊发表SCI论文4篇。

展望

在光学研究领域，科学家越来越关注将台式非线性光学系统缩小到单片芯片，以便在微纳米尺度上传输和操纵超短激光脉冲。然而，尽管多年来发现了大量新的奇异二维非线性材料和结构，但人们仍然依赖于少数成熟的平面波导光学平台，这些平台通常基于半导体和晶体材料（包括硅、氮化硅、铌酸锂）、金属等离子体结构以及有机聚合物。从材料角度来看，所有这些平台都存在带隙窄、光色散大、透明窗口有限的问题，使得它们无法在没有显著的时域和频域失真的情况下传输和操纵超短激光脉冲。相比之下，玻璃波导（如光纤）被视为一种宽容平台，可以通过结构设计有效地增强或抑制光传播路径上的非线性光学效应。本研究展示了3D玻璃芯片在传输和操纵超宽带线性和非线性激光方面的独特优势，并代表了台式光学系统小型化为芯片级器件的重大进步。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-024-01473-7

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：邱建荣等 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转发