

光束整形新方法：下一代硅芯片垂直互连技术

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/29116.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！

光束整形新方法：下一代硅芯片垂直互连技术。随着半导体技术的不断发展，高性能电子和光电子器件的3D集成成为了一个关键挑战。硅通孔(TSV)作为实现这一目标的重要元素，其制造技术备受关注。近年来，利用激光在晶体硅等窄带隙半导体内部进行三维写入的技术展现出巨大潜力，有望用于制造超高密度半导体器件和高长宽比的TSV结构。

然而，由于非线性效应和等离子体效应的影响，在半导体材料内部产生永久性修改面临着巨大挑战。虽然贝塞尔光束在介电材料中被成功用于制造高长宽比TSV，但这种方法在半导体中却不适用。为解决这一问题，研究人员提出了多种方案，如采用多角度分量实验配置、浸入式聚焦和短脉冲聚焦技术等，成功实现了波导写入、隐形切割和激光辅助蚀刻等技术突破。

最近，法国国家科学研究中心(CNRS)和艾克斯-马赛大学联合实验室LP3的David Grojo教授团队在Light: Advanced Manufacturing上发表了题为Ultra-high-aspect-ratio structures through silicon using infrared laser pulses focused with axicon-lens doublets的研究论文，在开发半导体技术方面取得了关键性突破。他们提出了一种基于轴棱锥（又称轴锥镜）和显微物镜简单组合的新概念，开发出了基于轴棱锥和双透镜聚焦的激光直写技术。

这种创新方法为激光材料加工提供了简单高效的光束整形解决方案，能够产生标准方法无法实现的高角度红外伪贝塞尔微光束。通过使用适当的超短脉冲，研究团队发现了一种冲击式（percussion）写入方式，成功在晶体硅中创建了纵横比超过700的结构，远超过之前的技术水平。

这一突破性进展不仅为制造复杂三维结构提供了新的可能性，更重要的是，在芯片内部创建的细长微等离子体和随后的材料改性特性，为硅芯片中的超快速垂直通信通道（包括光学和电气）提供了一系列新的解决方案。这项技术有望在发展光子学和微电子技术中的垂直互连方面发挥重要作用，为下一代高性能、高集成度的硅芯片制造铺平道路。

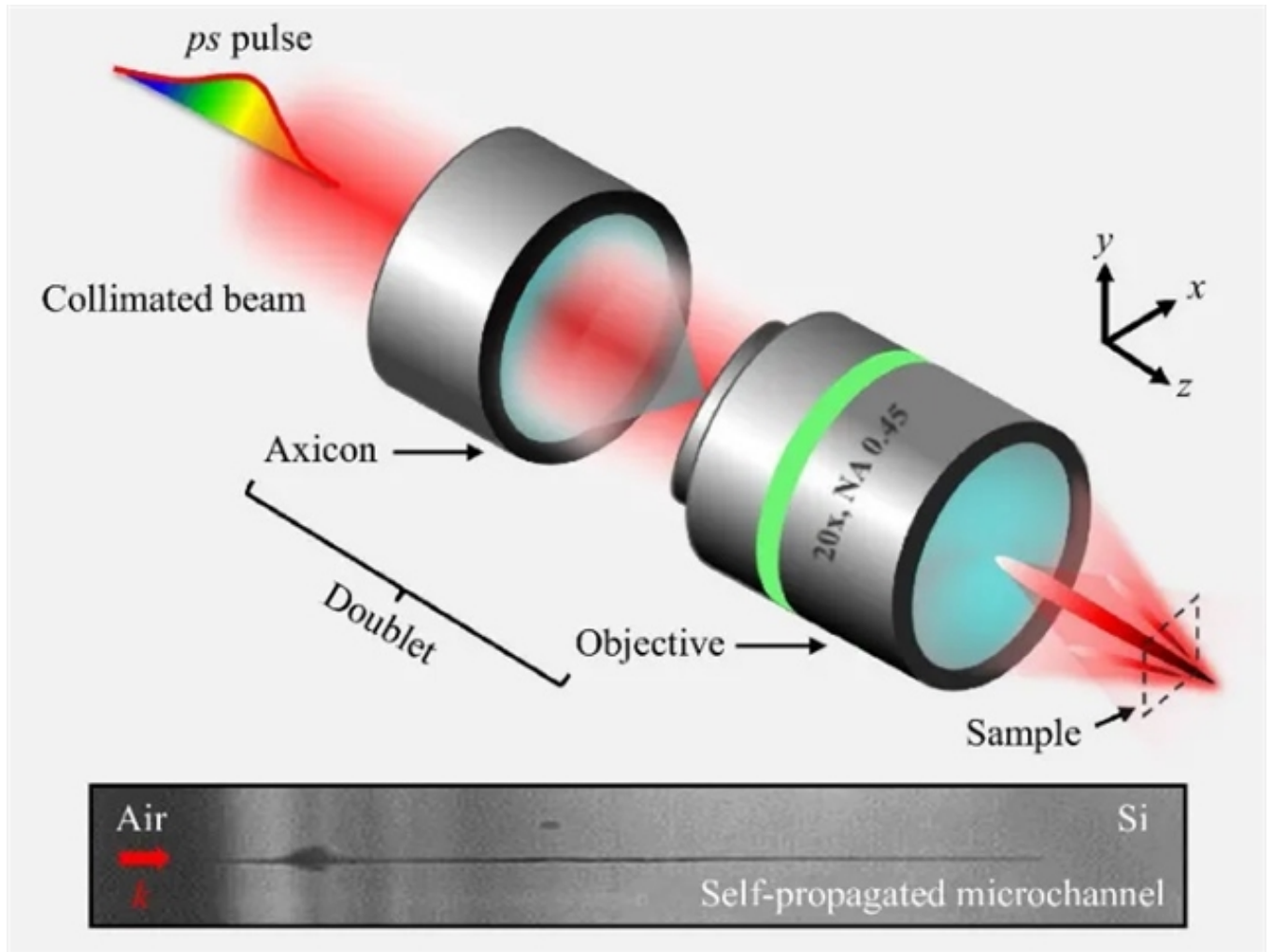


图1：使用轴棱锥和透镜的双透镜聚焦产生高角度伪贝塞尔光束的方案示意图及加工结果

小百科1：什么是窄带隙半导体？

窄带隙半导体（Narrow Bandgap Semiconductor）是一类具有较小能带宽度的半导体材料，通常其带隙能量低于1 eV。这类材料因其对长波长（如红外光）的高响应性而在红外探测器、太阳能电池和热电材料等领域具有重要应用。窄带隙半导体的带隙小，使得电子在热激发或光照下更容易跃迁到导带，从而产生电导或光电效应。

基于轴棱锥和透镜双透镜聚焦

在材料加工中，通过生成高角度的锥形贝塞尔光束可以显著优化加工效果。传统方法通常依赖望远镜系统进行缩小的图像传输，但这种方法不仅占用空间大，且对准要求高，同时还受限于光学元件的入口孔径和损坏阈值。在本文中，研究人员提出了一种简单且高效的替代方案，即将透镜与一个角度适中的轴锥镜组合，形成双透镜系统。这种配置能够生成高质量的伪贝塞尔光束，并具有延长的焦深。在该光学系统中，光束的角度由透镜的聚焦能力决定，从而在光轴上形成延展的焦点区域。如图2所示，该图展示了高斯光束通过轴锥镜-透镜双透镜系统聚焦后生成伪贝塞尔光束的示意图。

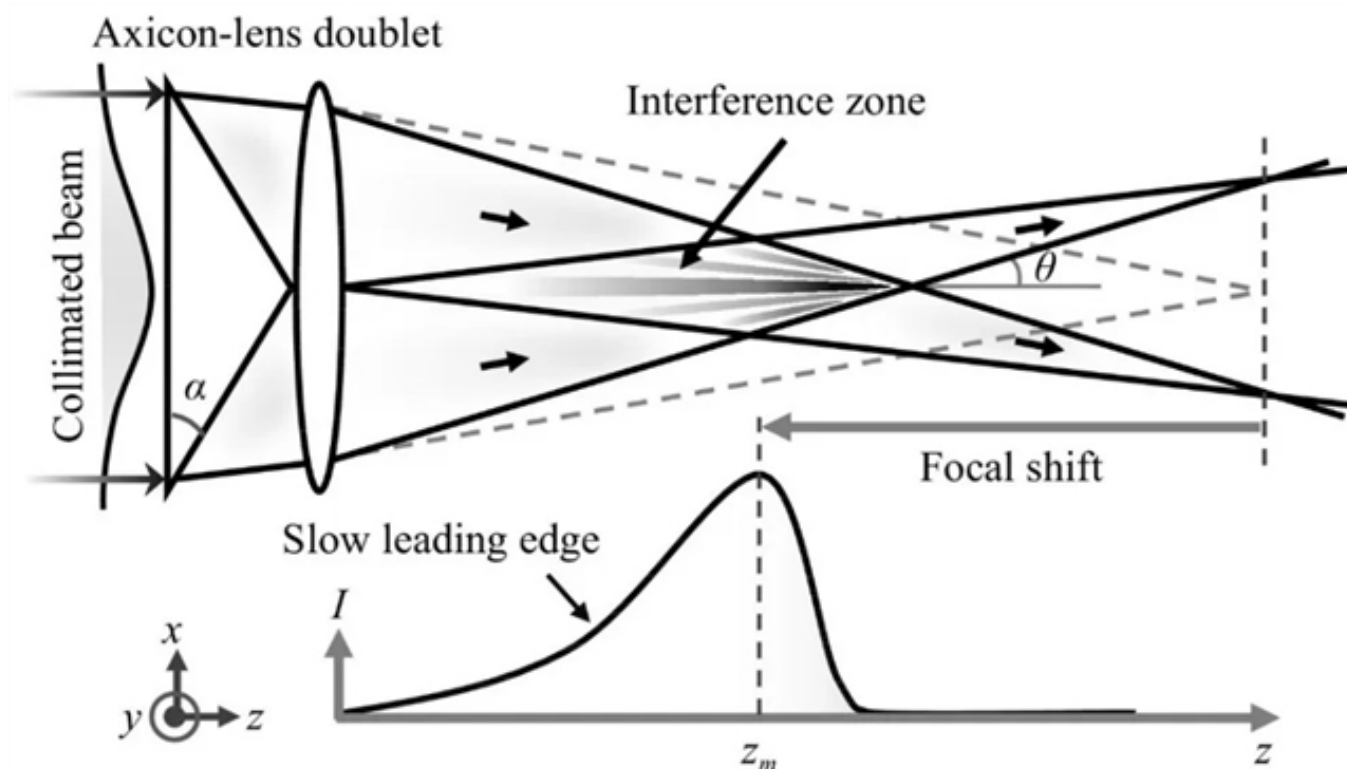


图2：高斯光束被轴棱锥和透镜双透镜聚焦产生伪贝塞尔光束的示意图

小百科2：什么是贝塞尔光束？

贝塞尔光束（Bessel Beam）是一种特殊的光束，其横截面上的光强分布呈现出典型的环状结构，中心区域为一亮斑，周围则是同心环。与普通的高斯光束不同，贝塞尔光束具有非衍射性（Non-diffracting），即在传播过程中，光束的形状和尺寸不会发生显著变化。这种特性使得贝塞尔光束在光学陷阱、显微成像和激光加工等领域得到了广泛应用。

实验装置和加工效果

基于上述方案，研究人员设计了一套用于在晶体硅内部进行激光直写的实验装置。如图3所示为光路示意图。该装置使用掺镱激光器产生持续时间小于200飞秒的超短脉冲激光。通过光参量放大器，将激光波长从1030纳米转换为1550纳米，以适应硅材料的透光窗口。实验中，光束被分为两路，其中一路的飞秒脉冲经过拉伸，形成持续时间约50皮秒的长脉冲；另一条路径中的飞秒脉冲则用于泵浦光和探测光的成像实验。研究人员将这些激光束聚焦到厚度约1毫米的晶体硅样品内部，通过精确控制光路和样品位置，实现三维定位和多次重复照射。此外，装置还配备了红外显微系统，实时观察非线性电离在硅内部形成的微等离子体。通过调整探测光的延迟时间，该系统能够捕捉不同时间点的快照，帮助研究人员深入了解在不同激光照射条件下的离子化动态行为。

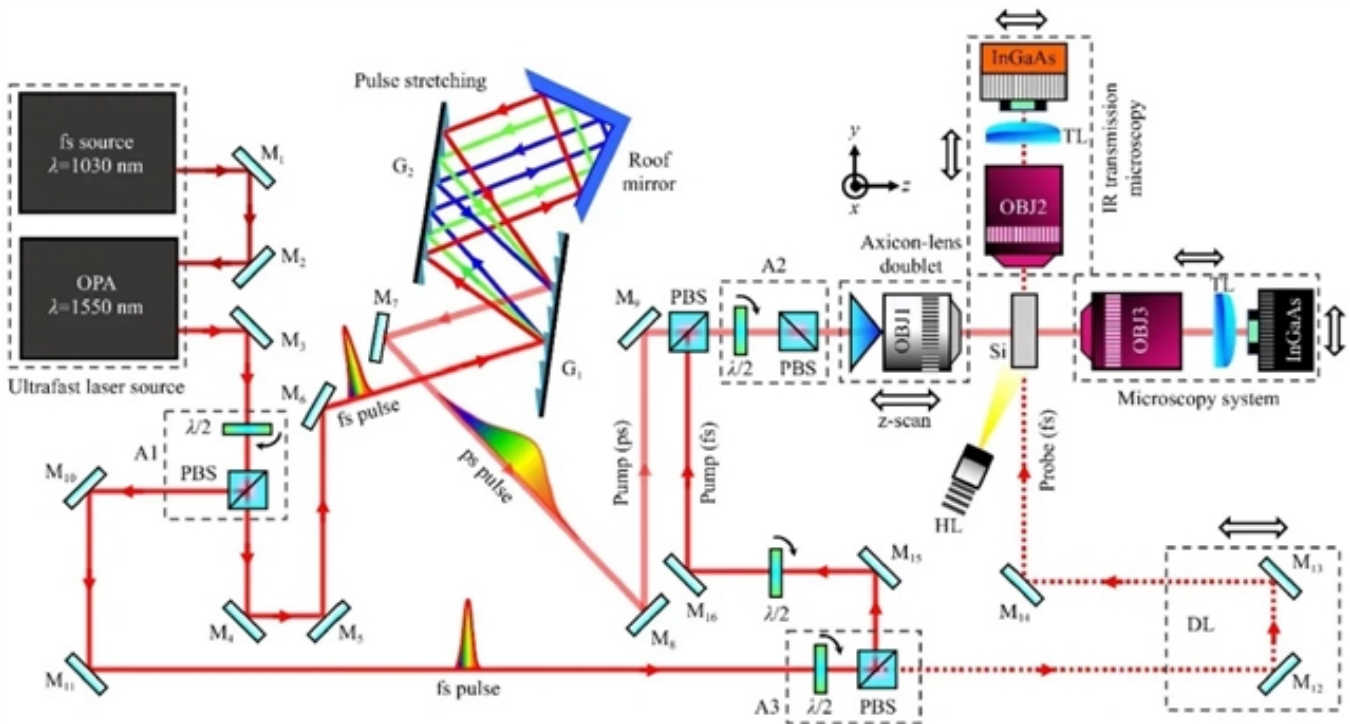


图3：使用高角度伪贝塞尔光束在晶体硅内部形成高纵横比结构的装置示意图

随后，研究人员成功利用上述装置在晶体硅内部形成了高纵横比的微结构。研究表明，这些结构的形成依赖于精确调控的激光照射条件，特别是在时间域内的控制。较长的脉冲持续时间有助于降低激光峰值功率，从而减少非线性效应和等离子体效应的不利影响，实现更高的能量集中度。为确定最佳脉冲持续时间，研究人员测试了200飞秒、50皮秒和5纳秒的脉冲，最终发现，只有皮秒和纳秒脉冲才能在晶体硅内部产生显著的结构变化。

此外，研究人员发现，这种激光加工过程的关键在于，首先需要足够的能量在材料内部形成初始缺陷，随后通过伪贝塞尔光束引发的表面损伤，促使深层结构自我推进。研究表明，微通道的长度随激光脉冲次数的增加呈现非线性增长，如图4所示。在加工过程中，微结构的横向尺寸保持相对稳定，随着每次脉冲后的自我推进，逐步深入材料内部，最终形成高纵横比的垂直微结构。在此过程中，硅的晶体结构发生了变化，但未形成空隙。

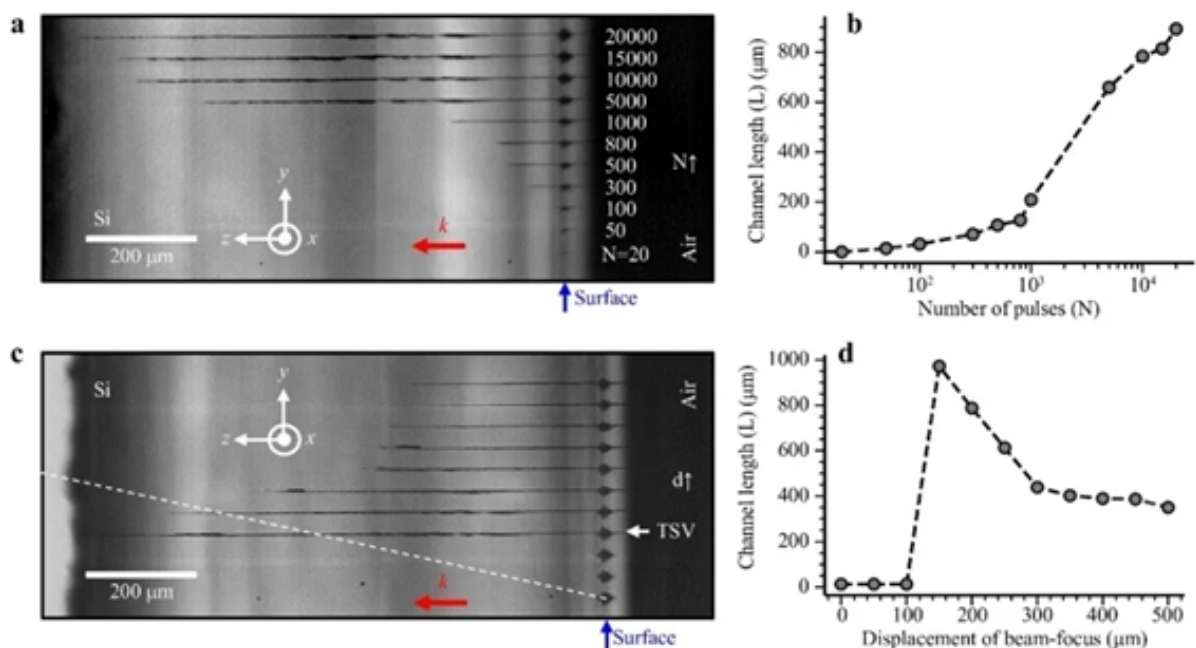


图4：使用轴棱锥和透镜的双透镜聚焦在晶体硅中制造高纵横比结构

总结与展望

综上所述，研究人员首次在激光材料加工中应用了轴锥镜与透镜的双透镜聚焦系统，开发出一种能够产生高角度伪贝塞尔光束的有效光束整形方法。该光束特性非常适用于半导体加工。研究表明，这种光束能够通过标准硅晶片传递热等离子体，并制造出高密度、超高纵横比的永久性结构。此方案可直接用于制造高分辨率垂直光波导，为硅芯片中的超快垂直通信通道提供了新的解决方案，并在快速发展的硅光子学领域展现出广阔的应用前景。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2024.022>

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：David Grojo 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](https://www.iikx.com)转发