
可调谐结构光的钛宝石时刻：全空间频谱可调激光器问世

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41849.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！

可调谐结构光的钛宝石时刻：全空间频谱可调激光器问世。 导读

可调谐激光器是现代光学应用中的重要工具。过去人们熟悉的"可调谐"大多指频率可调，即改变激光的纵模（时-频域）。结构光研究的兴起提出了新的追问：能否让激光器的空间模式也具备同样的可访问性，使一台激光器能够覆盖由厄米-高斯（HG）、拉盖尔-高斯（LG）及其广义自旋相干态（HLG）构成的完整空间频谱？若能像调谐频率一样调谐激光的空间模式，将为光通信、光操控、超分辨成像、精密测量、量子信息以及光与物质相互作用研究，提供可靠的空间光谱平台技术。然而，现有结构光激光器通常只能产生某一类或有限范围的特定模式，实现对完整空间模式谱的高纯度、宽范围、可调谐输出，是该领域长期存在的核心挑战。

近期，天津大学精密仪器与光电子工程学院联合延边大学量子科学与技术研究院，携手河北工业大学、麦考瑞大学、千叶大学及墨西哥里昂光学研究所，开展多国跨校联合研究，相关成果以《Tunable structured laser over full spatial spectrum》为题发表于Light: Science Applications。该研究提出并实验实现了全空间谱可调结构光激光源，通过腔内泵浦增益几何调控与像散失谐的协同机制，成功实现了任意空间本征模式的高纯度选择性输出。这一突破为空间模式谱的高精度、按需动态调谐提供了具备商用落地潜力的原创性技术路径，被誉为可调谐结构光技术的"钛宝石时刻"。

一、难点：为什么空间调谐远比频率调谐困难？

对于结构光光源而言，难点不在于产生一两个高阶空间模式，而在于让激光器本身具备覆盖完整空间模式谱的能力。频率调谐面对的是一维连续变量，依靠泵浦增益几何与色散管理即可实现；而空间调谐面对的是二维离散模式空间（如HG模式的 m 、 n 指数），需要同时抑制来自各方向的竞争模式。

旁轴光学中的TEM模式本质上是二维谐振子态——在数学上与描述光子数表象中Fock态的二维拓展完全同构。因此，让激光器可调谐输出单一TEM模式，本质上就是如何在光学谐振腔中通过级联增益与损耗控制，直接构筑出特定二维Fock态的空间波函数——这一问题的物理层挑战比频率调谐复杂得多。

二、突破：引入像散失谐实现竞争模态阻塞

离轴泵浦调控为HG模式可调谐输出提供了一个最具工程落地潜力的方案：通过移动泵浦光相对于腔轴的位置，改变泵浦增益区与不同模式之间的空间交叠，从而对目标模式进行选择性地激发。然而，旋转对称的谐振腔会让所有方向的模式并存，一维与二维HG模式的增益高度重叠，导致二维模式被竞争压制无法输出，且一维模式的纯度急剧下降（实际输出为一维Ince椭圆态）。长期以来，业界缺乏可行的商业化解决方案。

为此，研究团队创造性地将实现“光子阻塞”的经典（失谐）机制引入腔内波函数调控——通过腔内旋转对称破缺引入像散增益失谐，成功“阻塞”了所有竞争模式的增益反馈，只允许目标坐标系中的HG模式保持自再现并获得稳定增益。在这一机制下，离轴泵浦负责“选择”，像散失谐负责“清场”，空间频谱的可调范围由此从一维HG序列扩展到二维完整HG空间。

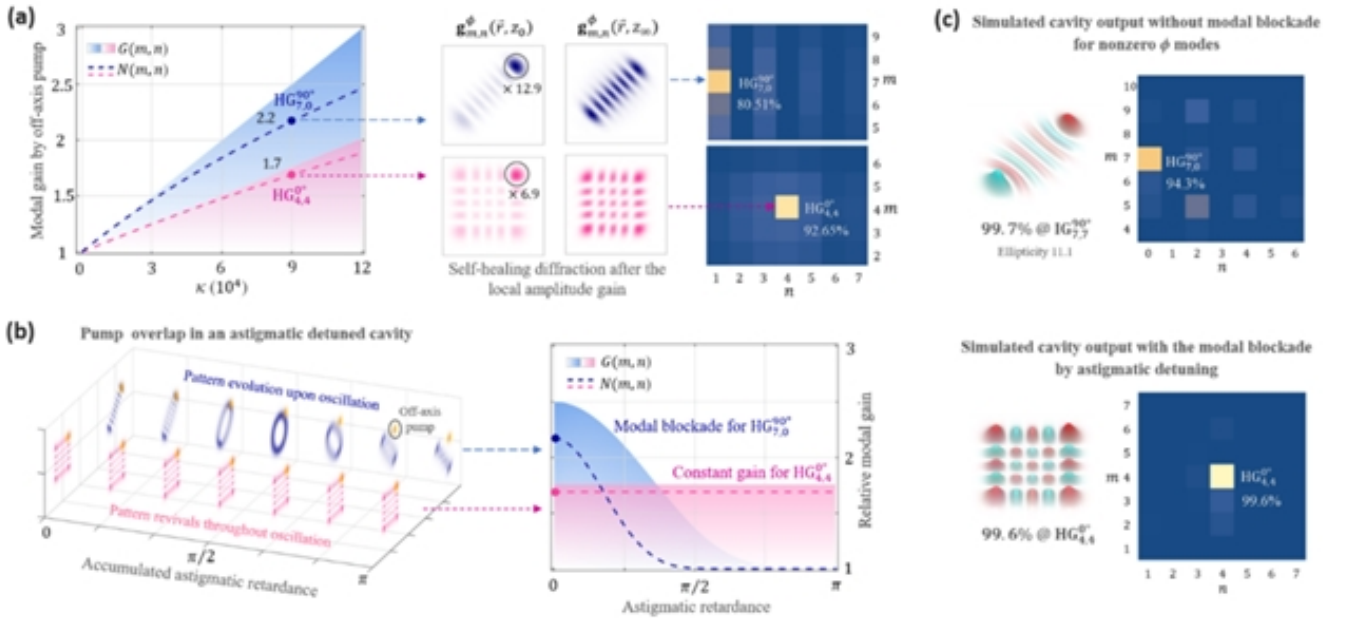


图1：（a）离轴泵浦选择增益HG模式原理；（b）像散失谐模式阻塞原理；（c）模式阻塞对系统输出空间波函数及密度矩阵影响

基于上述机制，研究团队巧妙利用V型折叠腔结构中凹面折叠镜固有的像散实现竞争模式阻塞，成功搭建了一台工作在1064 nm的全空间谱可调结构光激光器。实验中，通过独立控制泵浦在水平与垂直方向上的相对位移，即可解耦调谐输出HG模式的正交空间指数 m 和 n ，实现空间带宽内任意HG模式的无跳模输出。根据理论预测，在当前谐振腔设计方案下可支持超过40,000种HG模式；实验精确验证了这一预测，证明了腔内波函数构筑原理的正确性。受晶体孔径限制，泵浦中心在两个方向上的最大位移约为1.9 mm，对应超过14倍的基模腰斑半径。研究中观测到的最高模式阶次达到 $N=430$ （对应 $HG_{214,216}$ 模式）。在模式大范围调谐过程中，激光输出始终保持了极高的模式纯度和转换效率。所有输出HG模式均可利用腔外像散模式转换器无损（幺正）转换为LG模式，以及 $SU(2)$ 模态球上的任意自旋相干态（即广义HLG模式）。

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