

腔内复杂几何模结构光场的直接产生与调控

近年来,具有特定空间强度分布与复杂相位信息的结构光场,由于其更多维的自由度及新奇的物理特性而受到广泛关注。对于具有纵横频率简并特性的谐振腔,离轴泵浦可以选择性激发具有“波迹二象性”的SU(2)几何模结构光场。这类结构光场具有相干波包与几何射线轨迹相互耦合的特点,“迹”本身也使得这类具有经典纠缠特性的光场具有更多空间自由度。近年来,学者们利用几何模结构光场的多自由度特性,实现了高维量子纠缠态与大容量自由空间光通信。这种可以直接从谐振腔得到的高维结构光场在量子通信、大容量光通信等领域中具有很高的应用价值。

为了进一步拓展几何模光场的结构类型、产生具有更高维的结构光,河北工业大学先进激光技术研究中心利用点缺陷法进行损耗控制,实现了具有更复杂射线轨迹结构的几何模结构光场。本课题组将厄米-高斯(HG)、拉盖尔-高斯(LG)等高阶模式光场自由耦合至射线轨迹,通过将几何模式耦合至每一条射线轨迹,得到了多轴多射线几何光束,为结构光束向更高维度的拓展提供了可能。

实验中采用 808 nm 的激光二极管(LD)端面泵浦凹-平结构的 Nd:YAG 谐振腔,如图 1 所示,其中 M_1 为对 1064 nm 高反的输入镜, M_2 为输出耦合镜(1064 nm 光束的透过率为 5%), f_1 和 f_2 分别为焦距为 150 mm

和 250 mm 的透镜。泵浦光束可以在 x 方向上移动,并在一定离轴偏移下选择性激发几何模场,透过率为 5% 的输出镜被安放在一个可沿 z 方向移动的平台(精度为 0.01 mm)上,用以精确调控腔长、达到特定的频率简并态。在尺寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 、掺杂物原子数分数为 0.6% 的 Nd:YAG 晶体的后端面引入一个点缺陷,并将其安放在可二维移动的平台以上以精确控制损耗。如图 2 所示,其中 z_R 为瑞利长度。对于射线轨迹的结构调控,当所耦合的特定激光模式的增益高于损耗时,该特定激光模式可以被激发,因此通过调控点缺陷的位置可以赋予光束不同的结构。同时,利用高阶模式的相干叠加可以产生更复杂的结构光场。调控点缺陷的位置,使其与特定射线的光轴中心在 x 方向和 y 方向上有一定偏移,则射线轨迹可由最初的高斯分布逐渐演化为高阶横模及复杂的几何模式光场。特别地,在几何模场射线轨迹的层析结果中,子射线轨迹与主射线轨迹都表现出空间扭曲特性,说明子射线轨迹同样为三维分布的非平面几何模式。

本工作实验证明了几何模式的光场结构与空间自由度的可拓展性,展现了高维结构光的巨大应用潜力。下一步工作是产生与调控具有更复杂结构的几何模光场,设计高纯度的高维结构光产生方案,并应用于大容量光通信、量子纠缠等前沿领域。

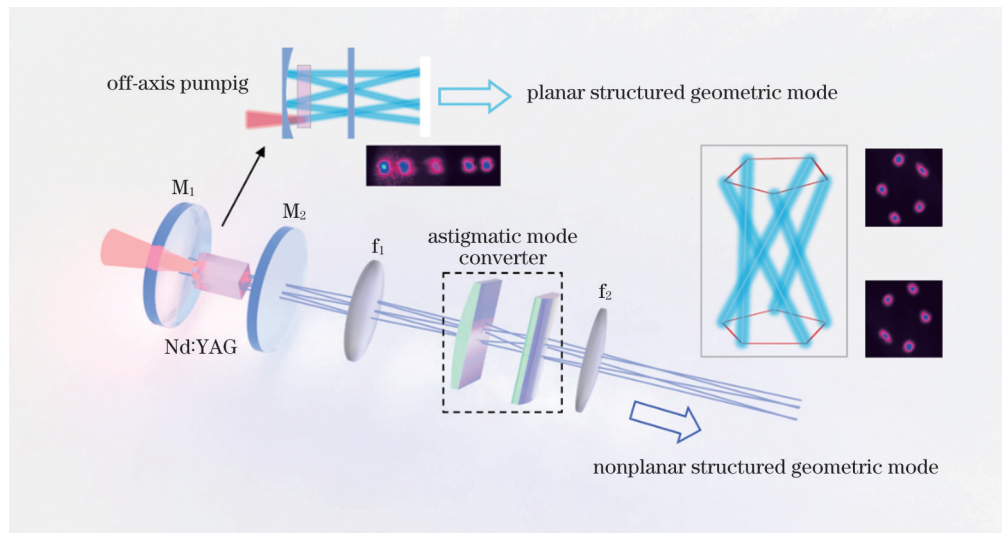


图 1 复杂几何模结构光场的产生装置示意图

Fig. 1 Schematic of setup for generating complex geometric mode structure light field

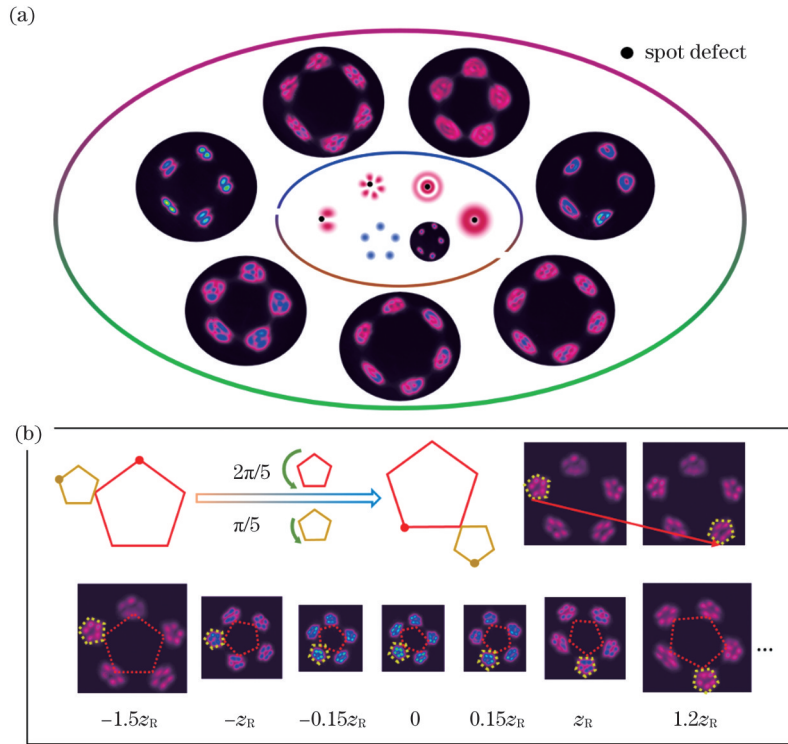


图 2 实验结果。(a)通过控制损耗产生耦合高阶模式的非平面几何模结构光;(b)具有空间扭曲特性的耦合子几何模式的多射线几何模式

Fig. 2 Experimental results. (a) Generation of non-planar geometric mode structure light coupled to high-order modes by loss control; (b) multi-ray geometric mode coupled to sub-geometric mode exhibiting spatial twisting properties

安嘉硕^{1,2}, 白振旭^{1,2*}, 朱智涵³, 王雨雷^{1,2}, 吕志伟^{1,2**}

¹河北工业大学先进激光技术研究中心, 天津 300401;

²河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401;

³哈尔滨理工大学大珩协同创新中心黑龙江省量子调控重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

通信作者: *zxbai@hebut.edu.cn; **zhiweilv@hebut.edu.cn

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2023-10-23; 录用日期: 2023-11-08; 网络首发日期: 2023-11-15