

破解光的拓扑密码：对称驱动的光子微结构光学奇点统一理论

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40190.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！

破解光的拓扑密码：对称驱动的光子微结构光学奇点统一理论。空军工程大学陕西省人工结构功能材料与器件重点实验室王甲富教授、杨杰教授团队、南京航空航天大学微波光子技术国家重点实验室郑学智教授团队联合苏州研究院、西安交通大学、北京师范大学物理系先进量子研究中心、东南大学毫米波国家重点实验室等研究人员在中国工程院院刊Engineering发表题为Optical Singularities in Photonic Microstructures with Rosette Symmetries: A Unified Theoretical Scheme（具有玫瑰花结对称性的光子微结构中的光学奇点：统一理论框架）的研究性文章。这项研究通过系统地分析微结构对称性与其多维光学奇点之间的内在联系，构建了一个统一的理论框架。

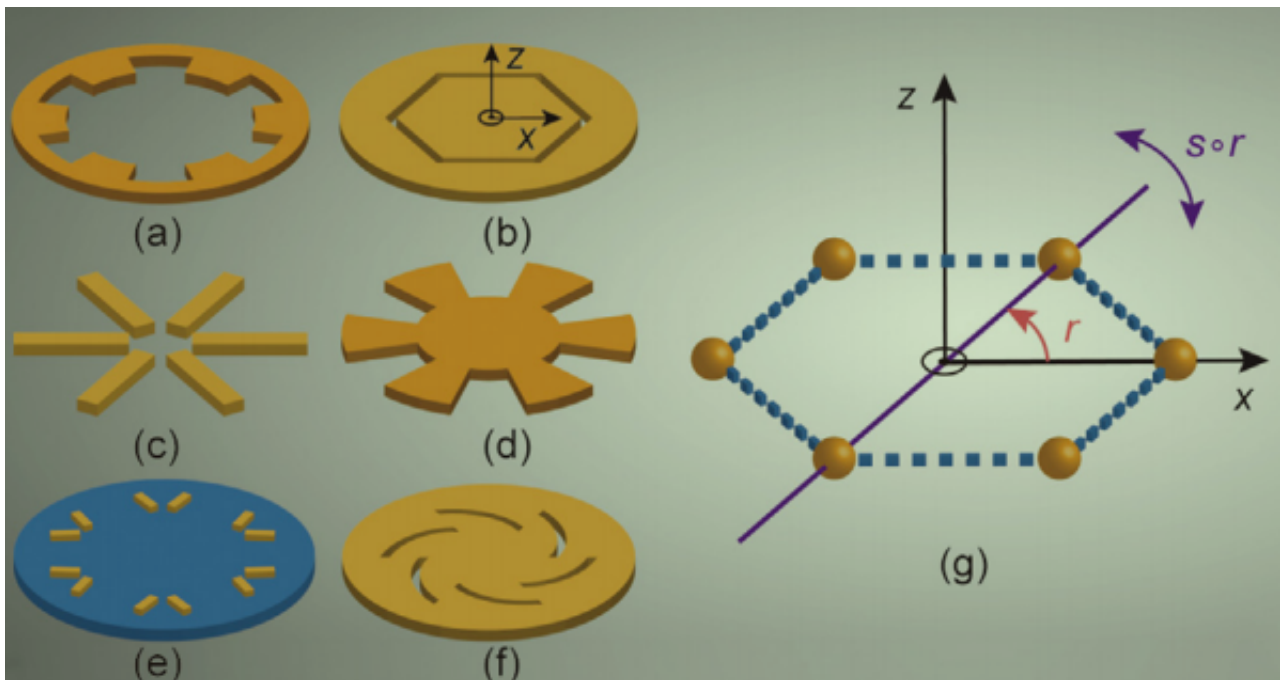


图1. 具有旋转对称性和可能反射对称性的代表性微观结构

光子微结构里藏着什么秘密？对称性竟能精准操控光学奇点！

在奇妙的光子世界里，光学奇点一直是科学家们探索的宝藏。过去，研究者们为了追寻它，只能在不同的光子微结构中单打独斗：研究环形谐振器，就靠耳语廊模式解读偏振奇点；分析等离

子体透镜，必须借助自旋-轨道耦合理论；探索纳米天线阵列，又要依托天线辐射原理。

这些方法就像一把把专属钥匙，只能打开单一结构的大门，却摸不透不同结构背后藏着的共同规律。更让人困惑的是，六重旋转对称的多边形光栅、多重反射对称的超表面……

绝大多数光子微结构都带着玫瑰花结对称的

基因，可学界始终没能理清，对称性和光学奇点之间，到底有着怎样千丝万缕的联系。

如何打破单一理论的局限，把零散的微结构设计装进统一的对称理论框架？又该如何借助对称性，实现光学奇点的按需定制？这道难题，一直卡在奇异光学走向实用化的关键路口。

破解光学奇点密码！一套理论为何能通吃所有对称微结构？

如果说过去我们是盲人摸象，那这项研究终于拿出了一张完整的世界地图。

面对五花八门的结构模型，科学家们不再头疼于逐个建模，而是祭出了一套降维打击的终极逻辑——群论+电磁散射的跨界融合。

它的核心思路：不看长相，只看基因。

第一步：给电流做对称身份证不管是光栅还是超表面，只要有对称性，研究团队就用群论投影算子，把内部的感应电流自动分类。同一类电流，天生就带着一模一样的拓扑胎记，完全不受尺寸、形状、孔径大小的影响。

第二步：拆解成最小积木把复杂的电流场，极简成一个个本征偶极子。这就是解析光学奇点的最小单元，让复杂计算瞬间变简单。

第三步：让奇点听指挥理论严格证明：只要对称性定了，奇点的位置、类型、数量就被死死锁住了。相位奇点可以多路复用，C点、V点、斯格明子……各种复杂奇点都能被精准合成、严格保护。

这一次，我们终于跳出了具体结构的束缚，揭开了所有光学奇点诞生的底层逻辑！

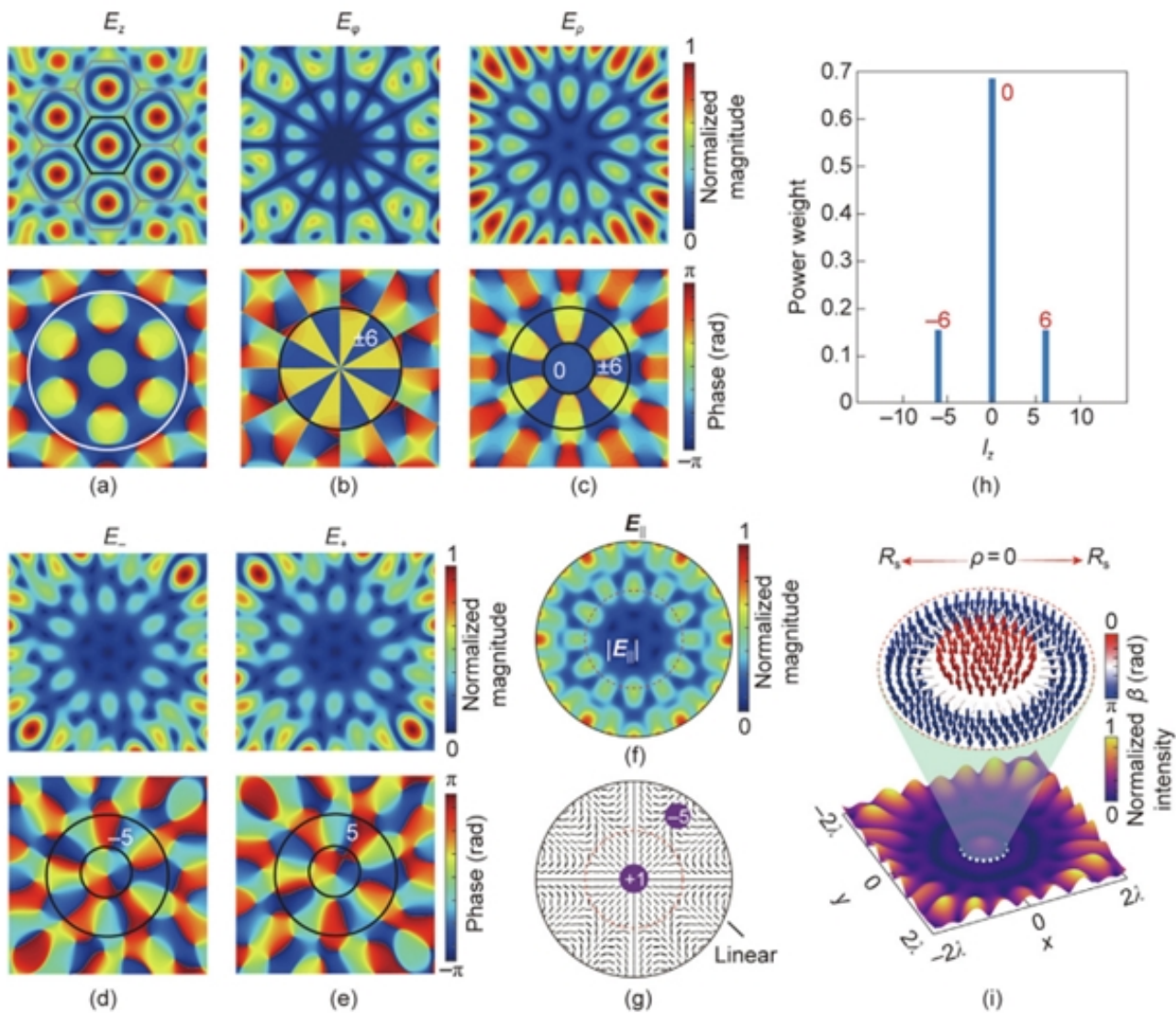


图2. 多路复用光学奇点示意图

光学奇点有哪些独特性质？这套理论让它的规律清晰可见

掌握了统一的理论之后，光学奇点的一系列重要特征，得以被系统地揭示出来。这些性质稳定、规律明确，让光学奇点的行为变得可以描述、可以预测。

1. 同一结构可同时支持多种奇点

在具有对称性的光子微结构中，不同场分量可以各自承载相位奇点。比如在六重对称结构中，面外分量可以支持 ± 6 阶标量涡旋，圆偏振分量可以支持 ± 5 阶奇点。这些不同阶次的奇点可以共存，并进一步组合成拓扑电荷可调的偏振奇点，实现多路复用。

2. 结构尺寸可以精确调控奇点形态

通过改变微结构的径向尺寸，能够连续、可控地改变奇点的类型：在亚波长尺度下，可以形成低阶奈尔型斯格明子；尺寸增大后，会出现高阶复用奇点，以及气泡型斯格明子、光学畴壁；在更

大尺度下，还能形成规则的六边形光学晶格。整个过程稳定、可重复，实现了对奇点演化的精准控制。

3. 奇数重对称结构支持分数阶偏振奇点

研究还发现，在五重对称等奇数重对称结构中，可以支持分数阶偏振奇点，例如 $1/2$ 阶。这一结果由理论给出预测，并通过数值模拟得到验证，与以往大量单一结构的实验结果一致，进一步体现了这套统一理论的可靠性和普适性。

掌握对称密码，光学奇点如何真正走向应用？

这项研究不仅搭建了完整的分析体系，还给出了光学奇点 按需激发的明确依据——对称匹配条件。简单来说，只要入射场与目标对称模式相匹配，对应的光学奇点就能被稳定、选择性地激发出来。这一清晰的设计准则，可以直接应用到多个重要方向：

在片上集成光子器件中，通过匹配入射光模式与微结构对称性，能够定向产生具有特定拓扑电荷的等离子体涡旋源，为片上光场调控提供可靠方案；在光通信领域，借助对称调控实现的多路复用奇点，可以有效拓展轨道角动量复用维度，为提升通信容量提供新的可行路径；在量子系统中，这一理论框架也可进一步延伸，通过哈密顿量与对称群的对应关系，帮助分析和预测量子奇点的辐射行为，为量子态调控提供理论支撑。

目前，基于该理论设计的等离子体多边形微结构，已通过全波仿真实现了等离子体涡旋与拓扑准粒子的可控生成，为后续实验研究提供了清晰、可行的技术路线。

以对称性为线索，打开研究视角

这项研究针对具有玫瑰花结对称性的光子微结构，提出了一套系统研究多维光学奇点的统一方案，阐明了光与微结构相互作用中对称性的关键作用，并依据对称特征对结构进行了系统分类。

未来，这一理论有望成为光学拓扑研究的基础工具，既可以为探索光学结、链环等新型光学奇点提供思路，也能够与光子晶体缺陷、自旋-轨道耦合等方向结合，持续支撑超分辨成像、量子调控、智能光子器件等领域的稳步发展。

这项工作以对称性为核心，将以往分散的光学奇点研究整合到统一的理论框架之下，清晰揭示了多维、复用光学奇点的对称起源。正如群论为凝聚态物理中拓扑相研究提供了重要支撑，这一统一理论也为奇异光学搭建了系统性的对称研究思路。今后，研究者不必再为每一种结构单独建立专属理论，只需通过调控微结构的对称群与维度参数，就可以系统实现光学奇点的按需设计与调控。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809924006374>

作者：王甲富等 来源：《工程》

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](http://www.iikx.com)转发