
科学家发现光子准晶结构中的光局域

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/25625.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！

科学家发现光子准晶结构中的光局域。北京时间2024年1月4日，Nature Photonics在线发表了上海交通大学叶芳伟课题组的最新研究成果。

该研究利用光学诱导的办法，刻写出了光学准晶结构。通过将一束信号光引入到准晶结构中，发现在准晶结构的折射率调制超过一定程度时，信号光可以在纯粹的准晶中发生局域，局域发生时的阈值随着准晶对称性的升高而降低。

波，包括光波、水波、声波，物质波等，在某个系统中的局域、传输和演化行为，强烈依赖于系统本身的对称性。在周期结构中，波包总会散开；在一维或二维随机结构中，波包总会局域，而在三维随机结构中，只有当本征态的能量低于某个特定能量 E_c 时，波才会局域，而高于 E_c 的本征态都是散开的。迄今为止，人们对周期系统和随机系统的研究十分系统和深入，前者以光子晶体为代表，后者则以安德森局域和安德森相变为代表。

然而，在周期结构和随机结构之间，还存在一类特殊的重要结构，即准晶结构。准晶具有独特的结构对称性：相比于周期结构只能具有二重、三重、四重和六重旋转对称性，二维准晶具有除此之外的任何重数的旋转对称性，例如五重、七重、八重或者更高重数（图1）。那么，不禁要问，波在准晶结构中如何演化？会否像周期系统一样，总是会散开？或着，像随机系统一样，波总是会发生局域化？

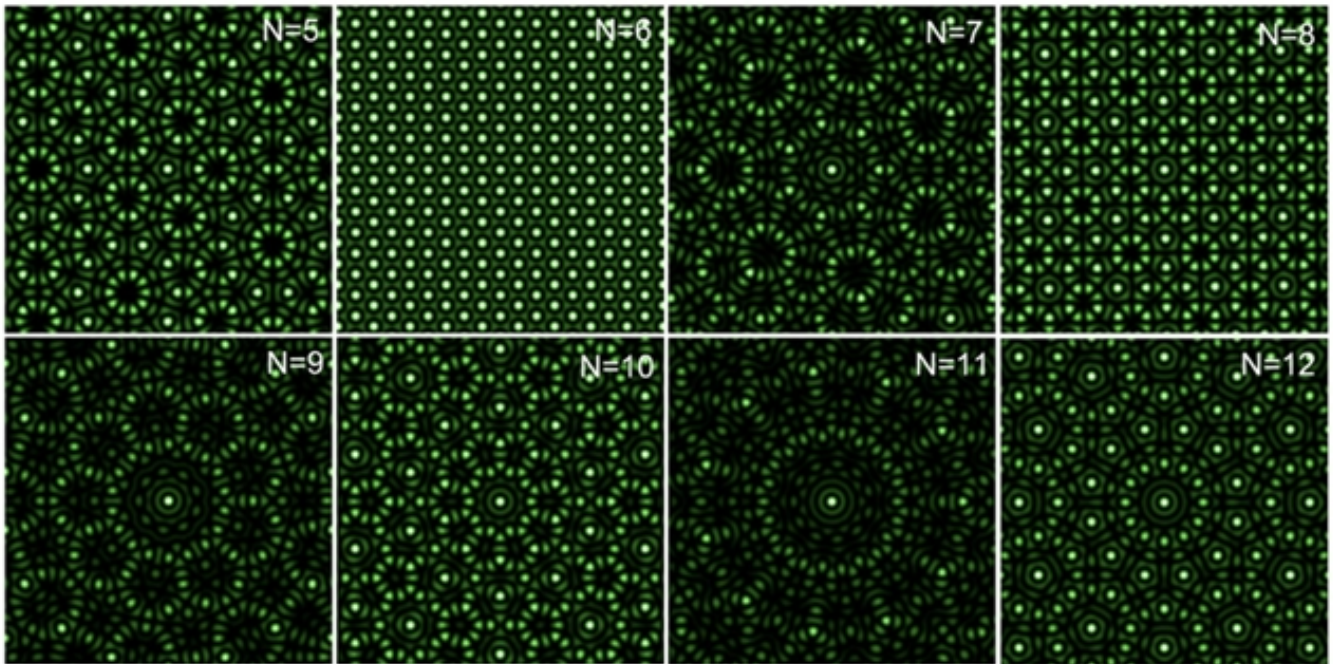


图1. 二维光子准晶图。这里给出了旋转对称重数 $N=5, 7-12$ 的准晶结构图。注意， $N=6$ 的结构为周期结构（即不是准晶）。

在之前的报道中，该重要的科学问题已经有所涉及，人们确实在准晶系统中观察到了光波的局域化现象[Nature 440, 1166(2006)和Science 332, 1541(2011)]，但在这些工作中所研究的准晶结构并非纯粹的准晶，而是叠加有非线性光学响应或者随机效应。因此，纯粹的光学准晶结构是否支持光的局域化仍然是未解之谜。

上海交通大学叶芳伟课题组等人对该重要的科学问题作出了明确的回答。他们通过光学诱导的办法，在一种名叫铌酸锶钽的光敏材料中，刻写出了具有各种旋转对称重数（用数字 N 来标记）的光学准晶结构：从5重对称准晶开始，一直到12重（图1）。接着，他们将一束信号光引入到准晶结构中，观察其在准晶结构中的传输演化，发现信号光确实可以在纯粹的准晶结构中发生局域，但这种局域只有在准晶结构的折射率调制（实验中通过控制材料的外加偏压 E 控制）超过一定程度时才会出现，即：随着外加偏压 E 慢慢增加从而材料中的光学准晶结构的调制深度也发生相应的增加，当 E 超过某个临界的ELDT时，探测光会经历从散开到局域的相变！有趣的是，对于不同旋转对称重数 N 的光学准晶，探测光在里面发生散开到局域相变的临界电压ELDT不同。比如，图2给出了光在5重和8重准晶中传输演化的对比：在外加偏压达到 $E=400$ V/mm时，5重准晶中的探测光已经经历了相变进入了局域相，8重准晶中的探测光还处于非局域状态，即5重准晶相比于8重准晶更容易局域光束。图2还给出了探测光在准晶不同位置处激发下的演化结果，发现不同激发条件下的光束在准晶中具有相同的相变点ELDT，证明了非局域-局域相变是准晶结构的内在属性，和探测光的激发位置无关。

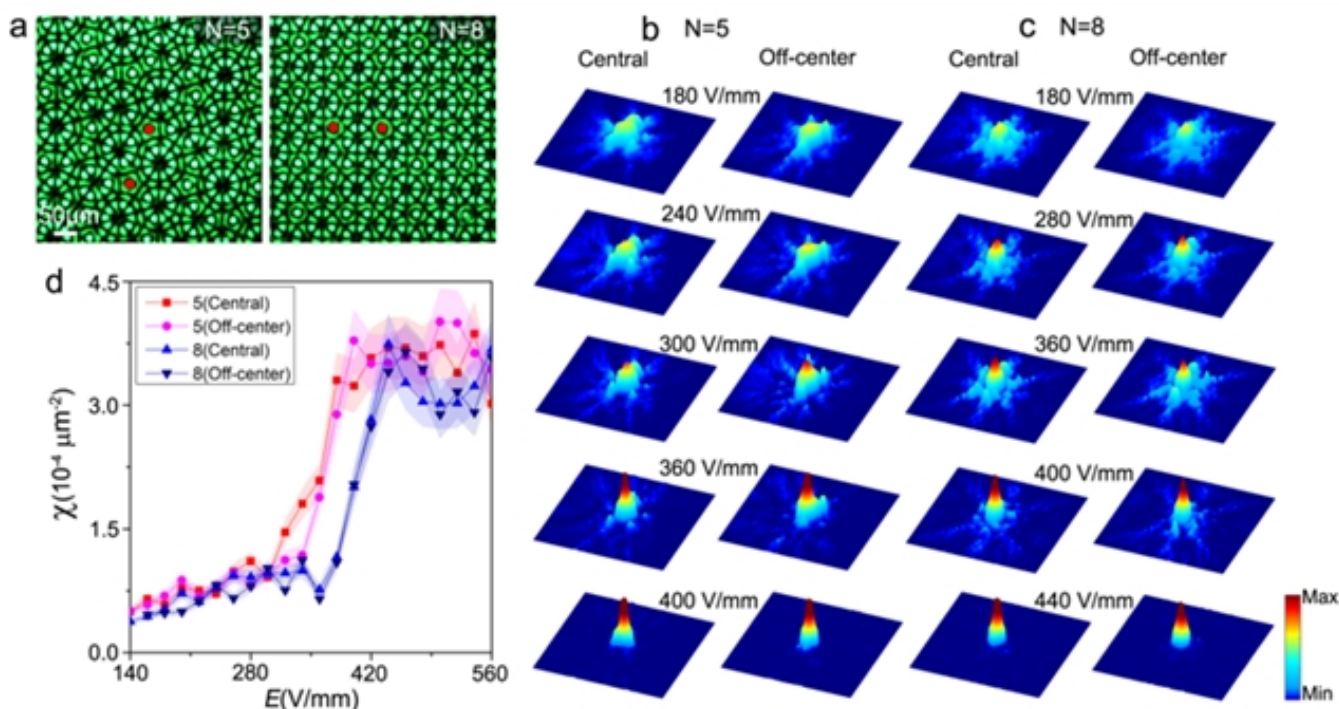


图2. 探测光入射至N=5重和8重的准晶前表面（其入射位置由图a的红色圆点标记），在准晶体里传输2cm之后，光在晶体后表面的出射光斑图（b, c）。可以看到，随着外加偏压的不断升高，输出光斑从一开始的散开状态，经历了相变，转变成了局域状态。比较N=5和8重准晶的相变点（d），可以看到5重比8重先发生局域。

图2的对比结果可能给您这样的印象：对称重数N越高的准晶结构越难局域光波，但这实际上是一个错觉。进一步的研究发现，相变点和晶体对称重数N的奇偶性相关，N=5, 7, 9, 11...构成一组准晶，其相变点随着N的升高依次降低，即7重准晶比5重准晶更容易局域光，9重准晶比7重准晶更容易局域光，以此类推。相对应地，N=8, 10, 12, 14...构成另外一组准晶，其相变点也是随着N值的升高不断降低[图3 (a, b)]。如果将奇偶两组准晶放在一起，且按照光局域在其中由难到易的程度排列，研究发现，正确的排列顺序是8, 5, 10, 12, 7, 9, 11....。让人惊奇的是，这个顺序刚好和准晶的空间非均匀度 f_N 对应[图3 (c)]。准晶的空间非均匀度 f_N 由准晶的折射率调制相对于某个参考点偏差的平均值给出： f_N 为0时表示结构在空间上是均匀的， f_N 越大则表示结构在空间分布上越不均匀。因此，图3 (c) 显示，越不均匀的准晶越容易局域光——一个非常符合直观的结果！

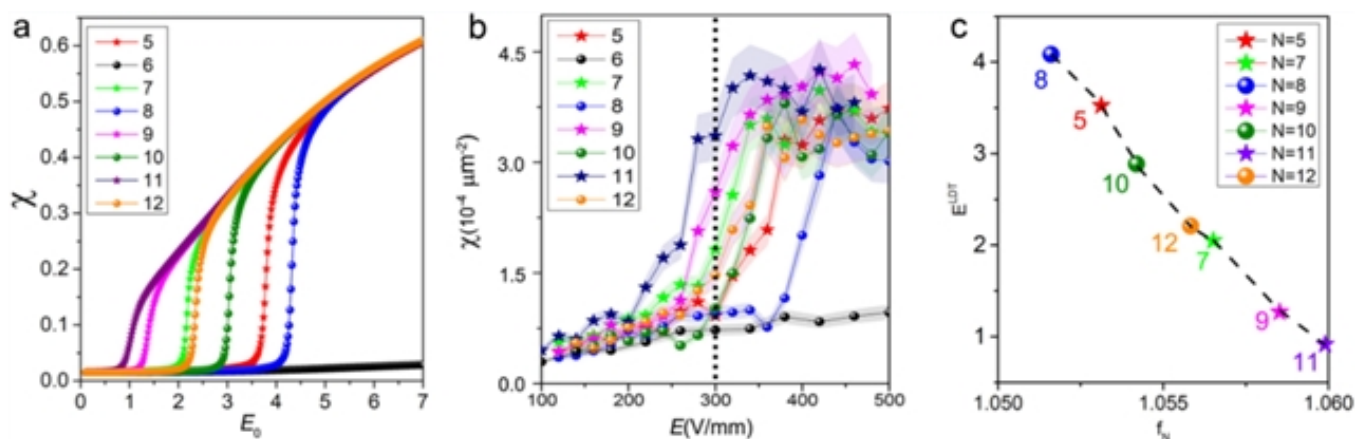


图3. 光束的形式因子 随着外加偏压的变化图 (a: 模拟结果图; b: 实验结果图)。形式因子反比于光束宽度, 因此, 形式因子从小变大表征了光束从非局域到局域的相变。(c) 各阶准晶的相变点和准晶的空间非均匀度 Δn 之间的关系。

综上, 本研究回答了光在一类重要光学结构即光子准晶结构中的局域化的问题, 首次发现了光在准晶结构中局域-非局域相变规律, 揭示了准晶中的波局域与准晶对称性之间的根本联系。研究成果为光的局域和调控提供了新的实现方式, 也为更一般的波, 如电磁波、声波、物质波等的局域和操控提供了启示。

上海交通大学叶芳伟课题组围绕光局域、光传输和光调控开展前沿基础研究, 致力于探索准周期、非周期光子晶格独特的光学性质以及所能提供的独特的光控手段。除此次在光子准晶结构上的科学发现外, 近年来在另外一类重要的准周期结构即光子莫尔晶格(静态、动态、线性、非线性)方向上也作出了一系列科学发现, 成果先后发表在Nature[42, 577(2020)]、Nature Photonics[14, 663(2020)]、Nature Communications 13, 6738(2022)以及Physical Review Letters[129, 183901(2022); 128, 154101(2022); 130, 083801(2023)]等学术期刊上。(来源: 科学网)

相关论文信息: <https://www.nature.com/articles/s41566-023-01350-6>

作者: 叶芳伟等 来源: 《自然—光子学》

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