
光学弗洛凯 – 布洛赫振荡

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/28373.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！

光学弗洛凯 – 布洛赫振荡。 导读

近日，华中科技大学的舒学文教授团队与香港中文大学的孙贤开教授团队合作，研究了弗洛凯（Floquet）调制下的光学布洛赫振荡现象，称之为光学弗洛凯 – 布洛赫振荡，并在飞秒激光直写波导阵列中首次可视化观测了该现象。研究团队进一步揭示了光学弗洛凯 – 布洛赫振荡的奇异特性，包括分形谱（fractal spectrum）和分数弗洛凯隧穿（fractional Floquet tunneling）。该研究为操控波的传输演化提供了新的思路和方法，在光学、凝聚态物理、量子物理等领域有潜在的应用前景。

研究背景

布洛赫振荡是一种典型的相干量子输运现象，表现为周期势场中的量子粒子在外加恒定力作用下的周期振荡。然而，关于布洛赫振荡现象的研究主要集中在静态系统中，周期驱动量子系统（等同于弗洛凯系统）中的布洛赫振荡现象仍然难以捉摸。近年来，研究人员报道了两种弗洛凯调制下的类布洛赫振荡现象，分别被称为准布洛赫振荡现象（quasi-Bloch oscillations）和超布洛赫振荡现象（super-Bloch oscillations）。因为有着相似的机制，这两种现象似乎密切相关，然而这两种现象之间是否有潜在的联系尚不清晰，因此需要研究弗洛凯调制下的布洛赫振荡现象的通用理论。

实验上，对上述两种类布洛赫振荡现象的观测迄今仅仅是在一个振荡周期内对几个时间点取样进行记录，间接推导出系统内部的振荡，但中间过程是否出现其它的现象难以判断，并无法精确测量其振荡周期和幅度，因此亟需观测弗洛凯调制下的布洛赫振荡现象的时间连续演化来揭示其输运机制。然而，量子力学系统中波函数随时间的快速演化使得难以直接观测到相应的连续演化结果。

研究创新

在本研究中，研究团队利用飞秒激光直写技术，在熔融石英玻璃中加工了如图1a所示的一维弯曲波导阵列。阵列中波导的弯曲轨迹为圆弧弯曲叠加周期弯曲（图中所示为余弦弯曲）组成的复合轨迹。在傍轴近似下，描述光在该波导阵列中空间演化的经典波动方程在形式上等价于描述周期势场中的电子在外加电场作用下随时间演化的薛定谔方程，阵列的传播方向类比于薛定谔方程的时间项，波导轨迹的曲率被看作是作用在光波上的等效电场力。由此看来，阵列中波导的圆弧弯曲轨迹产生导致布洛赫振荡的等效恒定电场力，而周期弯曲轨迹产生充当弗洛凯调制的等效周期电场力。因此，该波导阵列可以实现弗洛凯调制下的光学布洛赫振荡现象的观测。

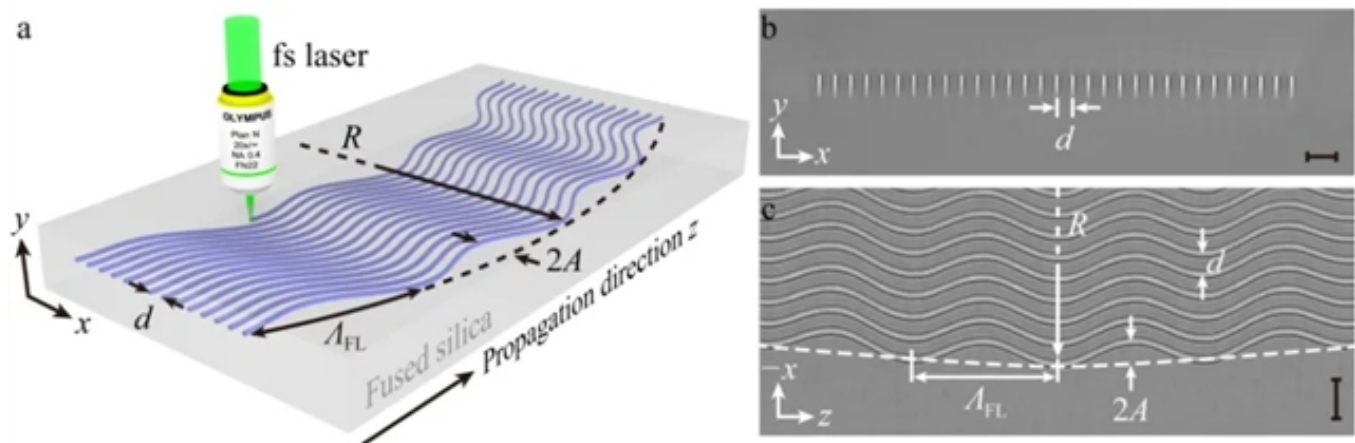


图1 a：飞秒激光直写波导阵列示意图。 b：实验制备样品的截面照片。 c：实验制备样品的俯视照片。

在理论方面，本研究通过求解紧束缚近似下的耦合模方程，发现当弗洛凯调制周期 FL 与任意整数倍的布洛赫振荡周期 BO 都不相等时，弗洛凯色散恒等于0，此时会出现类布洛赫振荡现象，振荡周期 FBO 为弗洛凯调制周期和布洛赫振荡周期的最小公倍数，该振荡现象被称为光学弗洛凯-布洛赫振荡。之前报道的准布洛赫振荡和超布洛赫振荡可以被视为弗洛凯-布洛赫振荡的两种特殊情况。而当弗洛凯调制周期 FL 等于某个整数倍的布洛赫振荡周期 BO 时，弗洛凯色散不再恒等于0，此时传输光会发生扩散衍射。

在实验方面，本研究利用波导荧光显微技术直接观测到了光波在波导阵列中的空间连续演化，并在单波导入射（图2）和宽光束入射（图3）的条件下分别观测到了光学弗洛凯-布洛赫振荡（ $BO/FL=3$ 以及 $BO/FL=4/3$ ）的呼吸模式和振荡模式。实验观测结果与仿真结果符合得很好，完美验证了理论分析得到的结论。

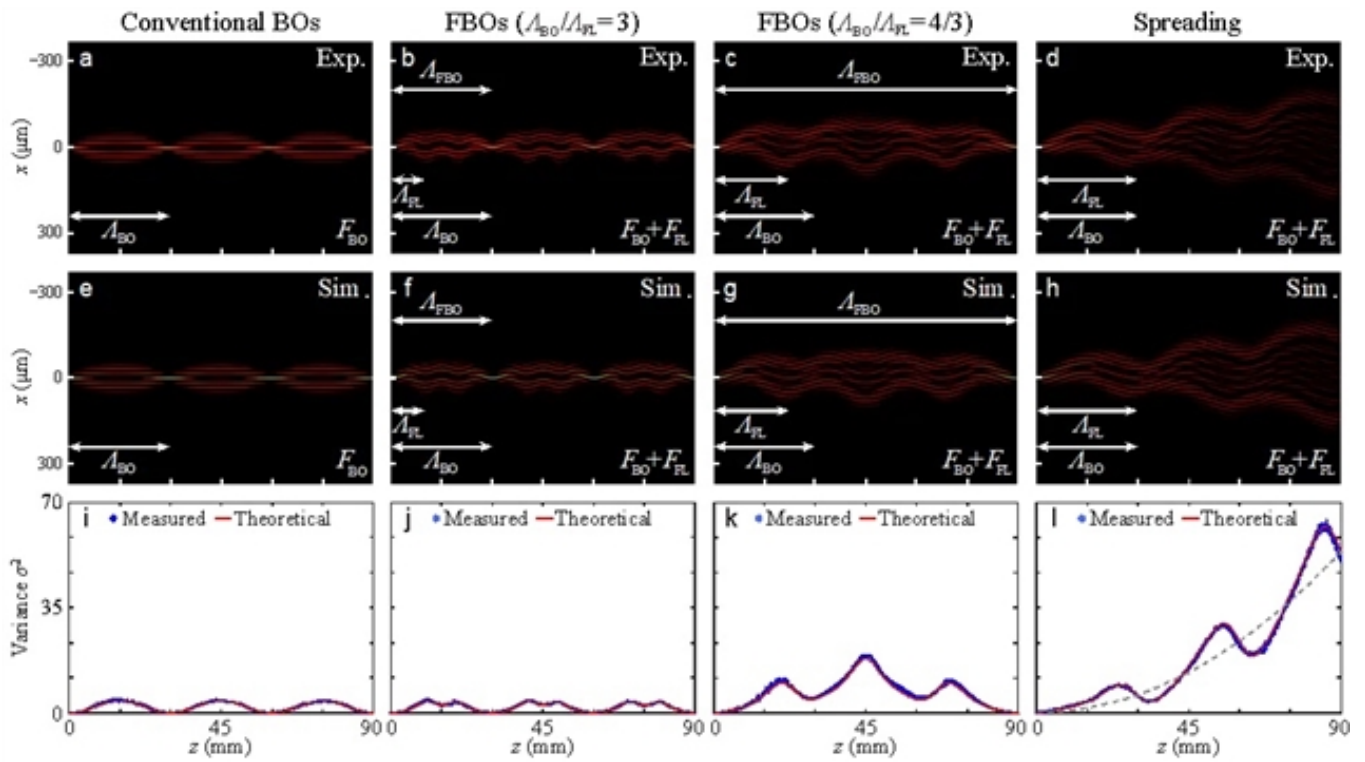


图2 单波导激发时光在该波导阵列中传输的实验观测结果 (a-d) , 仿真结果 (e-h) 以及量化结果 (i-l) 。

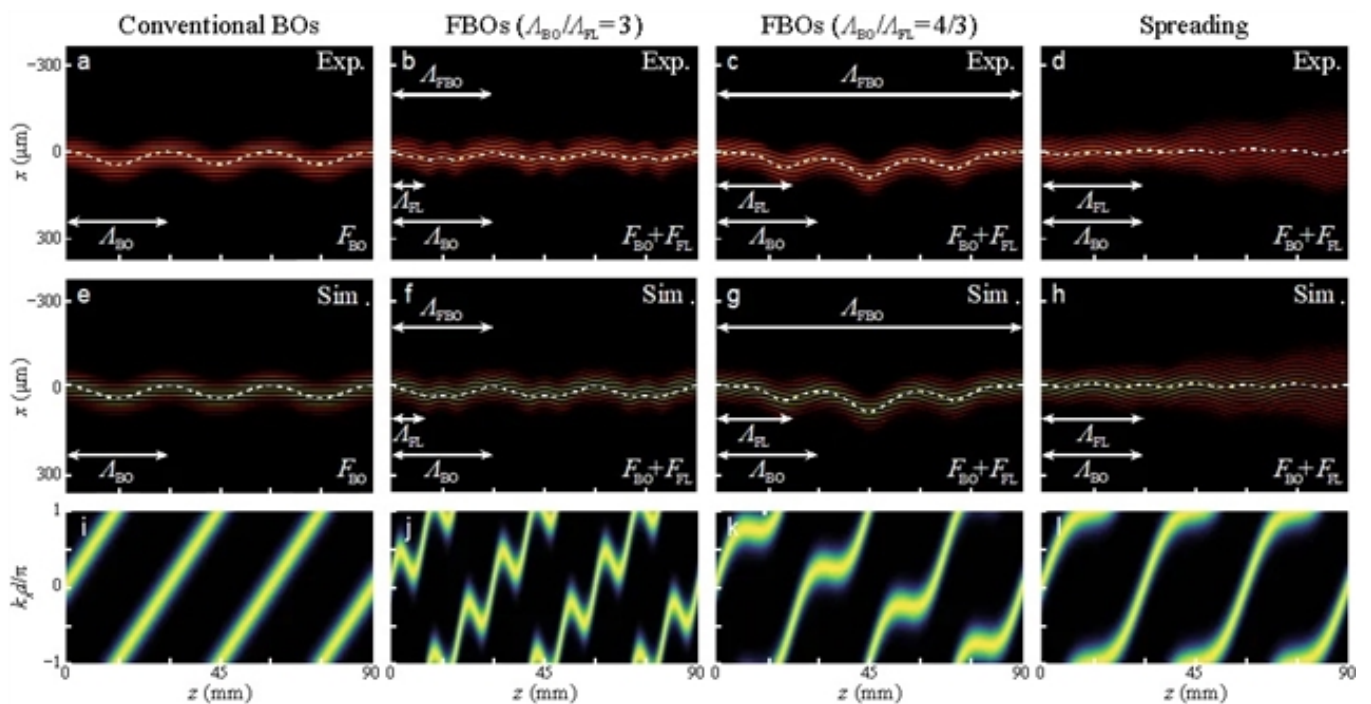


图3 宽光束激发时光在该波导阵列中传输的实验观测结果 (a-d) , 仿真结果 (e-h) 以及布洛赫动量演化图 (i-l) 。

通过量化分析光波在波导阵列中的连续演化结果，可以精准确定光学弗洛凯-布洛赫振荡的周期和振幅。研究人员系统研究并实验验证了光学弗洛凯-布洛赫振荡的周期相关特性和振幅相关特

性。图4a展示了 BO/ FBO与 BO/ FL的关系遵循Thomae函数，揭示了光学弗洛凯 – 布洛赫振荡的周期相关的分形谱特性。图4b展示了光学弗洛凯 – 布洛赫振荡的振幅与弗洛凯调制幅度A的函数关系满足分数阶安格尔（Anger）函数和韦伯（Weber）函数的线性叠加，其阶数与 BO/ FL相关，说明了该现象的分数弗洛凯隧穿特性。

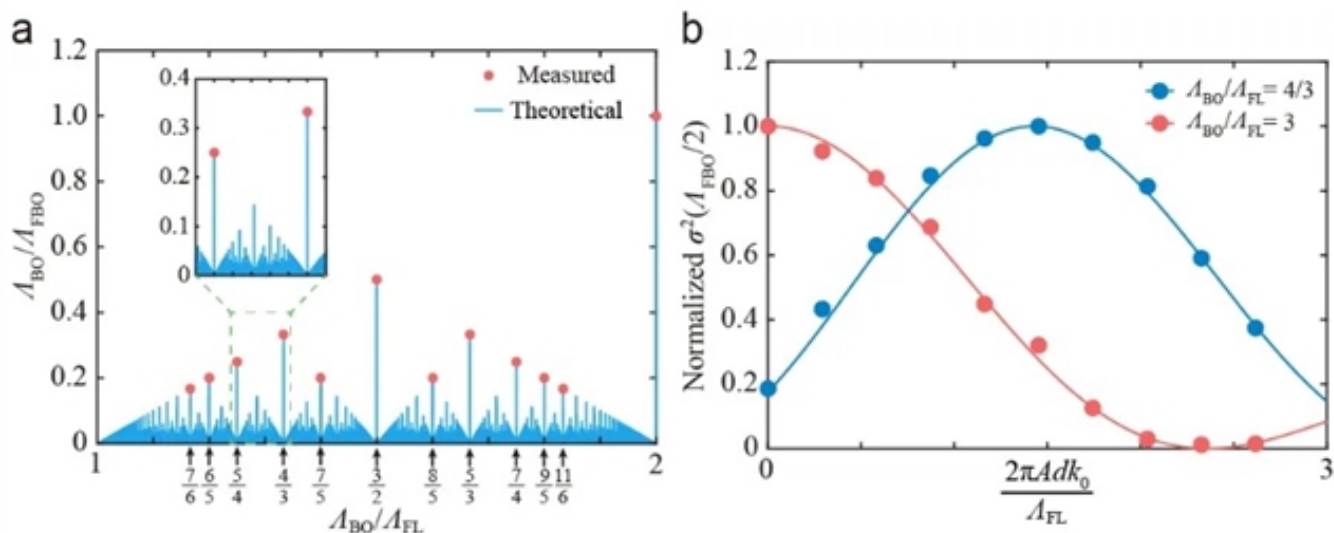


图4 光学弗洛凯 – 布洛赫振荡的分形谱特性 (a) 和分数阶弗洛凯隧穿特性 (b)。

前景展望

光学弗洛凯 – 布洛赫振荡的可视化观测直观地表征了光波的空间连续演化，是理解其运输机制的关键，在基础研究和实际应用方面都有着重要意义。在基础研究方面，该理论模型和实验平台支持进一步探索弗洛凯 – 布洛赫振荡与二元晶格、非厄米晶格、光学非线性等设计和调控相结合产生的新奇现象；在实际应用方面，光学弗洛凯 – 布洛赫振荡本质上是一种相干传输现象，因此可以推广到合成频域晶格、冷原子、时空晶体和量子行走等多个研究平台中，有望用于实现频率转换、精密测量以及波传输操控。

该文章在线发表在国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》上，题目为 Visual observation of photonic Floquet – Bloch oscillations，博士生张真和李缘为本文的共同第一作者，孙贤开教授和舒学文教授为本文的共同通讯作者。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01419-z>

作者：孙贤开等 来源：《光：科学与应用》

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://iikx.com)转发