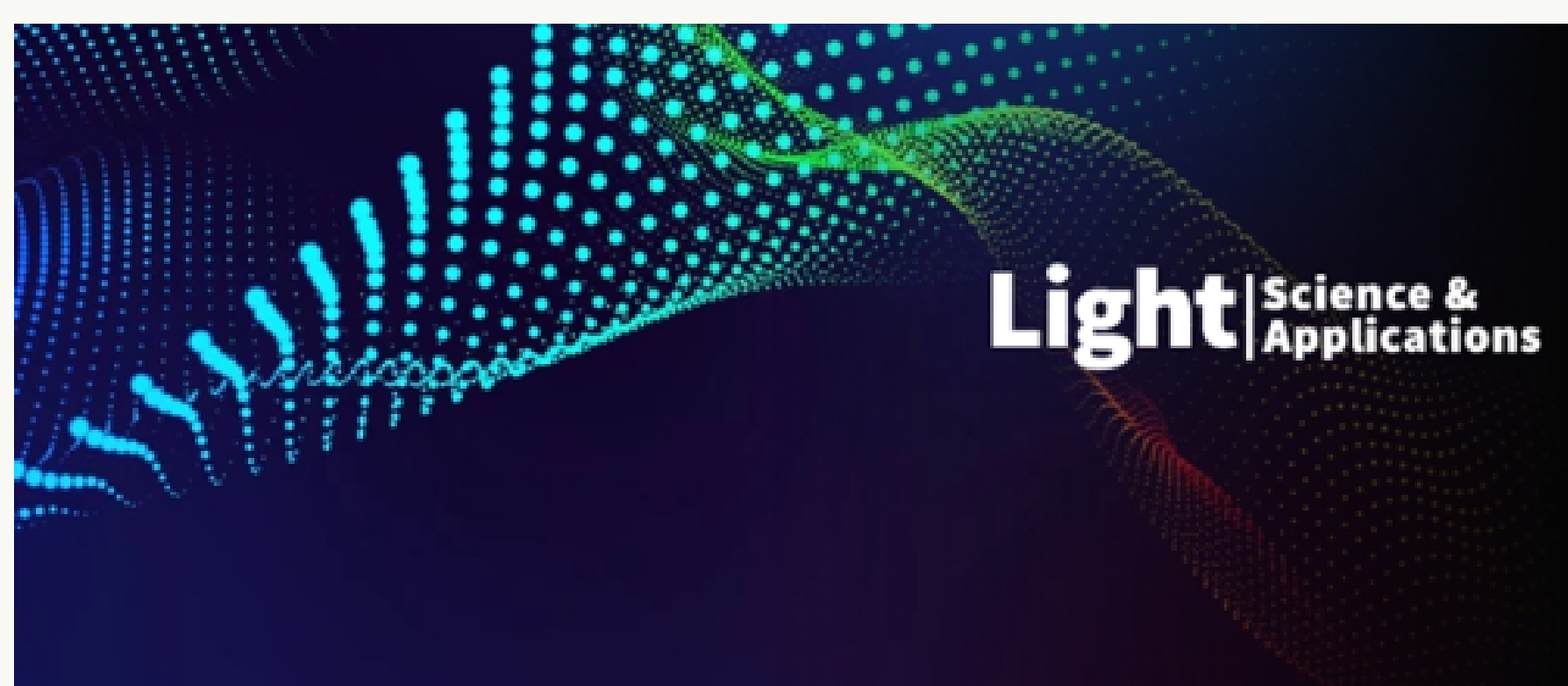


在合成频率维度中实现拓扑相位提取



过去十几年, 拓扑物相的研究从凝聚态物理拓展至诸多不同的物理分支领域, 包括人工物理系统, 激发了在各领域中对拓扑相的广泛研究。人工合成维度的研究是通过耦合系统内禀的自由度, 模拟粒子在晶格中的运动, 构建一个人工合成的晶格。光子体系中可以利用的自由度十分丰富, 例如光子的频率、轨道角动量、空间模式、脉冲时序等。合成维度使研究者可以在相对简单的低维光学空间中研究高维的物理问题, 极大简化器件的结构设计, 也可以提供更为精密多样的操控光场的手段等。

近年来, 基于谐振环构建的人工合成频率维度吸引了研究者的广泛关注。通过施加电光相位调制动态调控谐振环的介电常数, 可以将不同频率的谐振模式耦合起来。灵活的外加调制可以提供特异的连接方式来构建丰富多样的晶格模型, 从而在实空间中难以实现的物理现象, 并具有实验的可重构性。

人工合成维度提供了一个强大的拓扑光子学研究平台, 如何表征、实现、和探测拓扑物相仍是其中的核心问题。系统不同的拓扑相可以用拓扑不变量来表征和分类。

一维系统中, Su-Schrieffer-Heeger (SSH) 模型可以用Zak相位作为拓扑不变量来进行表征。研究者提出并实现了几种测量Zak相位的拓扑光子学实验方案, 包括布洛赫振荡结合拉姆齐干涉仪、光子态量子行走的平均位移、漏模光子晶格、原子气的吸收谱等。

然而, 在现有的光子学或凝聚态物理平台中, 从通常的一维SSH模型的能带测量中无法直接获取能带的拓扑信息。拓扑平庸和拓扑非平庸两种物相具有相同的能带结构, 需要通过额外的实验手段测量Zak相位或边界效应进行辨别。在基于谐振环的人工合成频率维度中构建SSH晶格, 能够带来更为丰富的物理现象, 为拓扑相的分辨提供新的途径。

近日, 上海交通大学物理与天文学院陈险峰课题组、袁琦琦课题组及合作者在合成频率维度取得新进展, 利用双频调制在两个耦合谐振环的频率维度上构建了人工合成SSH模型, 首次在实验上验证了能带结构测量中对Zak相位的直接提取。这一研究成果结合了拓扑光子学研究和合成频率维度的能带分析, 提出了利用时间分辨能带测量直接提取拓扑不变量的新方法。

相关成果以“Direct Extraction of Topological Zak Phase with the Synthetic Dimension”为题发表在Light: Science & Applications。

上海交通大学助理研究员李广珍、王琦瑜为本论文共同第一作者, 袁琦琦特别研究员、陈险峰教授为共同通讯作者, 合作者包括上海交通大学研究生叶睿、郑远林教授、浙江大学王大伟教授、北京大学刘雄军教授、马里兰大学Avik Dutta教授。该研究工作得到了国家自然科学基金、国家重点研发计划项目、上海市自然科学基金等项目支持。

研究团队利用两个谐振环耦合产生反对称和对称模式, 谐振频率为 $\omega_0 \pm \Omega \pm K$ (ω_0 和 Ω 是A环或B环谐振模式的中心频率和自由光谱范围, K 是两个环之间的耦合强度), 构成合成频率维度上间距不等的格点。对A环施加双频的电光调制, 调制频率为 $2K$ 和 $\Omega - 2K$, 可以产生SSH模型格点之间交替排列的耦合系数 g_1 和 g_2 。

由此在合成频率维度上构建人工合成SSH模型, 如图1(a)所示。不同拓扑相下, SSH模型具有相同的能带结构, 而Zak相位不同。本征态在动量空间绝热演化时获得的相位如图1(b)所示, 根据定义Zak相位为该值的 $1/2$ 。

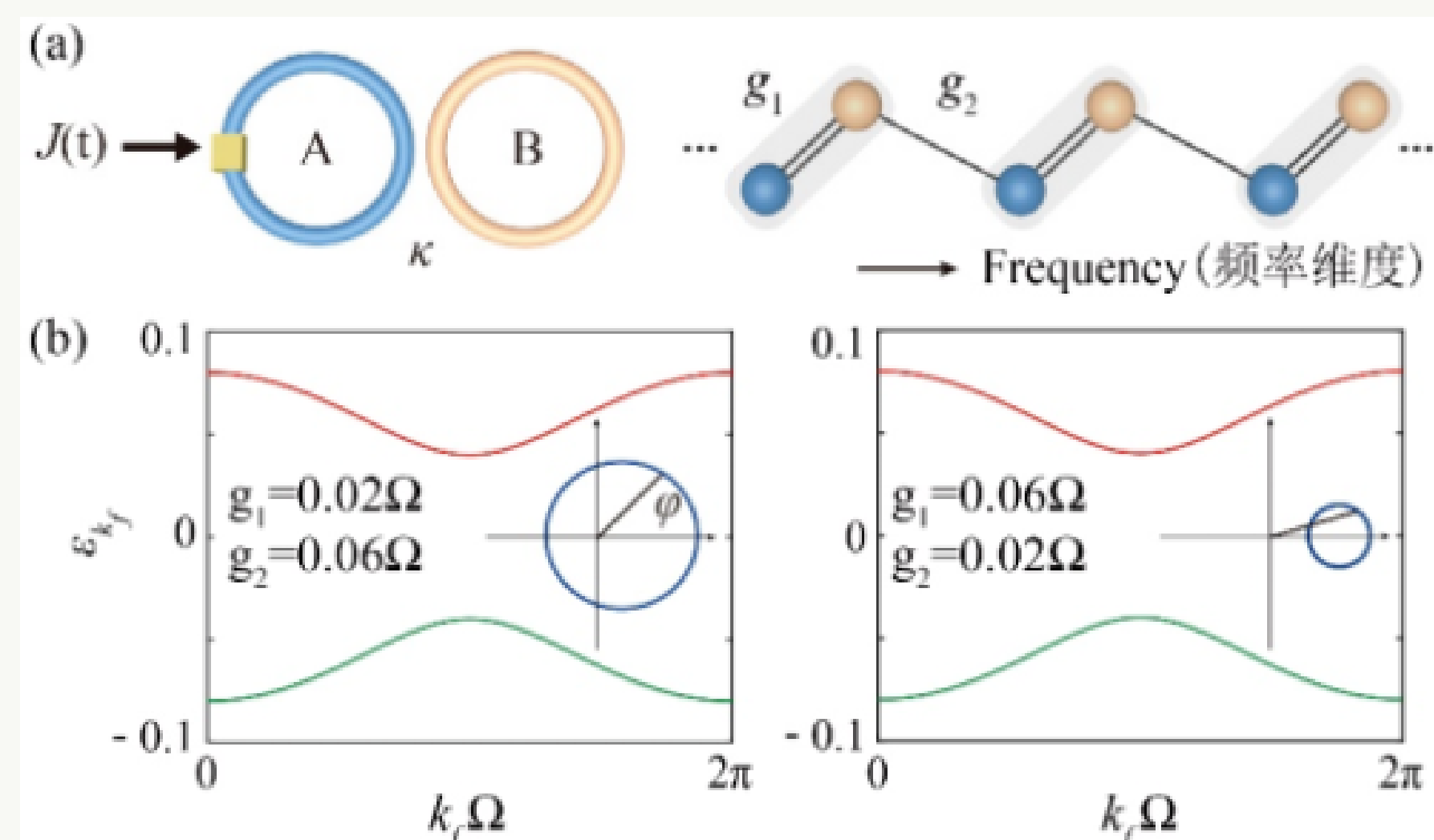


图1 (a)电光调制下两个耦合谐振环在合成频率维度上构造的SSH模型; (b)拓扑非平庸(左)和拓扑平庸(右)相能带结构及动量空间中计算Zak相位的绝热相位演化。

实验上, 研究团队使用两个长度为10.2米的光纤环来构建谐振环系统, 如图2所示。无调制时, 两环耦合产生的模式分裂的频率间距约为 $2K = \Omega/3 = 2\pi \cdot 6.67$ MHz。双频调制信号的强度和相位可以灵活控制。从A环输入并输出光信号。在谐振环的谐振频率附近非线性调制入射光的频率。按照 $2\pi/2K$ 的时间窗口对输出端的透射率信号进行切分, 拆分后的每一小段透射率的范围内近似认为对应一个输入频率失谐 $\Delta\omega$ 。

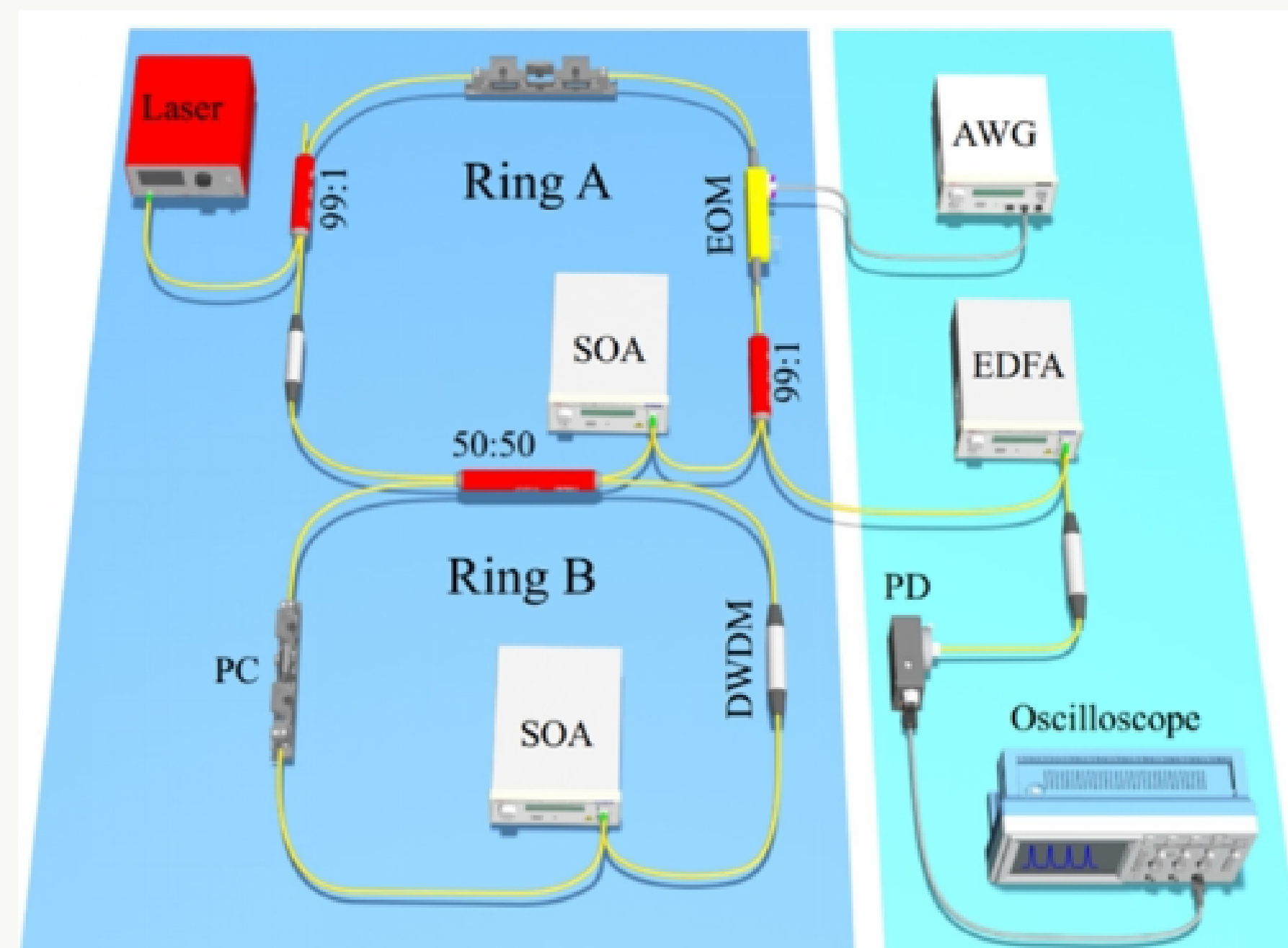


图2 实验装置图。

将拆分后的每一小段透射率进行堆叠, 即可得到系统的时间分辨的投影能带图。如图3所示, 在频率间隔 $2K$ 的位置, 各有两条不对称的能带。每一组的两条能带对应于SSH模型的两条能带, 拓扑相的转变由调制强度决定。

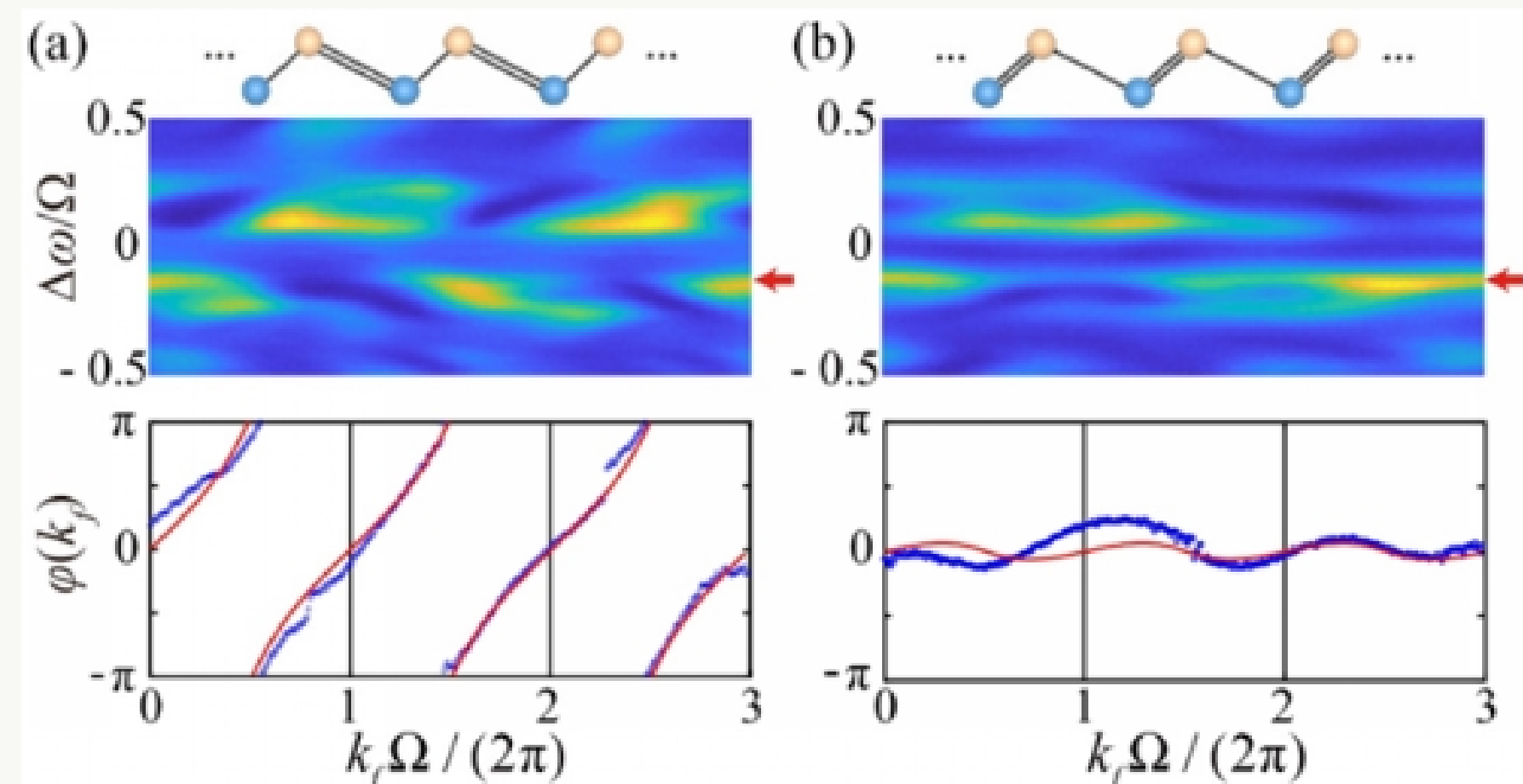


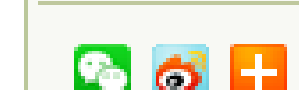
图3: 实验测量的能带结构和Zak相位提取得到的相位 ϕ 在动量空间的演化; (a)拓扑非平庸相 $g_1 < g_2$; (b)拓扑平庸相 $g_1 > g_2$ 。

理论计算表明能带上透射率信号强度的变化来源于能带结构在对称和反对称布洛赫模式的叠加态上的投影。由于透射率信号要求对称和反对称模式的叠加, SSH模型布洛赫哈密顿量本征态的相位 ϕ 被编码进了能带结构。此相位在动量空间的演化用来计算Zak相位, 如图1(b)所示。因此从时间分辨的能带信号的强弱分布可以反推相位 ϕ , 从而直接提取SSH模型的Zak相位。图3所示测量的能带结构对应不同的拓扑相。对箭头所示的能带采取Zak相位提取法, 得到的相位 ϕ 的演化与理论结果相符, 可以用来分辨系统的拓扑相。如图3(a)所示, 当调制强度 $g_1 < g_2$ 时, 相位 ϕ 经历了从0到 2π 的演化, 计算Zak相位为 π 。如图3(b)所示, 当调制强度 $g_1 > g_2$ 时, 相位 ϕ 的演化没有绕过原点, 计算Zak相位为0。

该工作是首次基于谐振环的合成频率空间中实验测量拓扑可分辨的SSH能带结构, 并直接从信号透射谱中实现了Zak相位的提取。在合成频率维度中, 这种提取拓扑不变量的方法具有普适性, 为研究拓扑物相提供了简单可行并具有重构性的实验途径。实验上实现合成晶格间交替的耦合强度为将来利用合成频率维度构造更为复杂的晶格打下坚实的基础。同时调制谐振环系统灵活转换拓扑相的能力在光学非互易性及光通信方面具有潜在的应用。(来源: LightScienceApplications微信公众号)

相关论文信息: <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01126-1>

特别声明: 本文转载仅仅是出于传播信息的需要, 并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性; 如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用, 须保留本网站注明的“来源”, 并自负版权等法律责任; 作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜, 请与我们接洽。

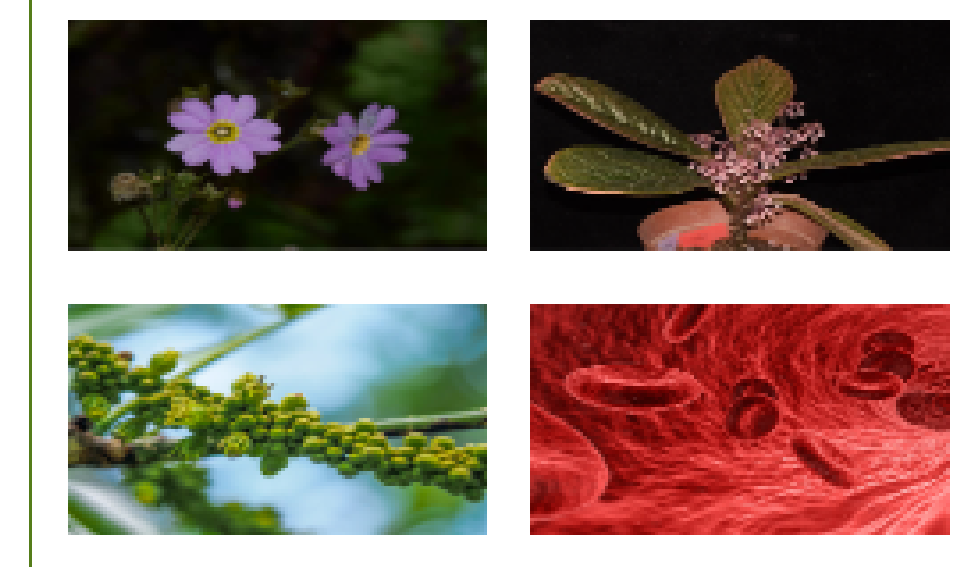


打印 发E-mail给:

相关新闻

- 1 微波和光学光子首次实现纠缠
- 2 单元素二维拓扑绝缘体锗烯面世
- 3 国际无人机应用及防控大会举行
- 4 突破衍射极限, 还看“近场光学”!
- 5 光学超材料的本领不只有隐身
- 6 重磅! “2022中国光学十大进展”发布
- 7 “光频完美异常反射器”入选光学十大进展
- 8 光纤量子密钥分发新纪录等入选中国光学十大进展

图片新闻



一周新闻排行

- 1 两所公安院校更名亮相, 均为副属
- 2 学院官方通报: 一女学生高空自主坠亡
- 3 海南省海洋立体观测与信息重点实验室揭牌成立
- 4 基金委发布一项重大研究计划项目指南
- 5 杨振宇: 真性情名誉主席, 与西湘大学再相逢
- 6 解密写论文4大难题! 《科学》获7位学者支招
- 7 自然科学基金委医学领域一项项目评审组名单公布
- 8 宅、头发少、生活单调? 这群理论物理博士不一样
- 9 牛顿、爱因斯坦如何导演了精密制造这出大戏
- 10 2023年中国科学院院士增选工作启动

编辑部推荐博文

- 科学网4月十佳博文榜单公布!
- 论文发表全流程 根据学术期刊排名挑选适合的期刊
- 如何用ChatGPT一句话生成Web应用?
- C929宽体客机商业运营有望在2030年前后达成
- XML文章集锦 | 仿生材料及其应用研究(一)
- 当代相变的知识遇上会思考的机器