

光的边界华尔兹: 非线性与非厄米的对舞

程亚

华东师范大学物理与电子科学学院, 上海 200241

E-mail: ya.cheng@siom.ac.cn

Light's boundary Waltz: the duet of nonlinearity and non-Hermiticity

Ya Cheng

School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China

E-mail: ya.cheng@siom.ac.cn

doi: [10.1360/CSB-2025-5342](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5342)

在量子力学中, 厄米型哈密顿量刻画了封闭量子系统的动力学演化。然而, 实际量子系统往往无法避免与外部环境之间的相互耦合, 这使得人们需要引入非厄米型哈密顿量来研究系统的性质和动力学过程, 也使得非厄米量子理论成为物理学中不可或缺的一部分。近年, 自David Thouless、Duncan Haldane和Michael Kosterlitz因拓扑理论获得诺贝尔物理学奖以来, 非厄米拓扑学掀起了新一轮研究热潮^[1], 其中最为引人注目的便是非厄米趋肤效应(non-Hermitian skin effect)的发现^[2,3]。该效应指的是具有非互易跃迁格点模型中体态波函数局域在边界的现象, 它的出现破坏了厄米系统中传统的体边对应关系, 推动研究人员建立了一套新理论来刻画系统的非厄米拓扑特征, 进而大大拓宽了人们对拓扑物理的认识。除了理论价值, 非厄米趋肤效应还在能量收集^[4]和高灵敏度传感^[5]等领域有着重要应用价值。尽管目前已取得大量研究进展, 但是对非厄米趋肤效应的研究仍处于早期阶段, 还有较多方面亟需探索, 如目前的研究主要集中于线性领域, 非线性非厄米趋肤效应还有待深入探讨。

光学系统具有易于搭建、易于观测和应用范围广阔等特点, 已经成为了研究线性非厄米趋肤效应的重要实验平台。2020年, 薛鹏教授等人在实空间搭建了非厄米离散量子行走光学实验装置, 成功观测了线性非厄米趋肤效应, 并验证了修正后的体边对应关系和拓扑相变条件^[6]。2024年, 南京大学李涛教授等人在硅基片上平台制备了有限根周期调制的光波导阵列, 成功观测了弗洛凯非厄米趋肤效应及其拓扑相变^[7]。然而, 这些系统依然较为复杂, 且系统的格点数和演化距离均比较有限。为突破以上限制, 研究人员提出将物理系

统由传统的空间维度拓展到合成维度^[8], 如频率^[9]、时间^[10]和角动量^[11]等。合成维度的实际空间结构以及实验操作更为简单, 为非厄米趋肤效应的观测提供了极大的便利。同样是在2020年, 德国罗斯托克大学Alexander Szameit教授等人利用相互连结的双光纤环路构造了一维时域光子晶格, 借助双环路中的脉冲序列演化模拟了传统空间晶格中的光束离散衍射。通过在两环路中分别引入增益和损耗, 他们在对应的合成晶格中实现了非互易耦合, 进而成功观测了线性非厄米趋肤效应, 并提出将该拓扑效应应用于光能量收集, 即“拓扑光漏斗”^[4]。与线性情形类似, 光学系统也有可能为非线性非厄米趋肤效应的观测提供便利可行的实验平台。然而, 传统光学非线性效应的激发往往需要极高的功率阈值, 且传统光学介质的非线性系数一般难以改变, 这些特征大大阻碍了人们对非线性非厄米趋肤效应的实验探索, 也大大限制了非线性光学器件的发展。

为了实验实现非线性非厄米趋肤效应, 华中科技大学王兵教授、陆培祥教授及其合作者同样采用基于双光纤环路的非厄米时域光子晶格, 并通过在环路中嵌入光电前馈链路, 等效实现了克尔型光学非线性^[12]。利用以上装置, 他们成功实现了非厄米趋肤效应与克尔非线性自局域之间的相互作用, 并观测了不同相互作用方式所引起的局域在不同位置的趋肤孤子。最后, 借助这些趋肤孤子, 他们设计了一个输出端口由非线性强度灵活调控的光路由器。

如图1(a)所示, 时域光子晶格的实际空间结构是两个长度略有差异且相互耦合的光纤环路, 其中, 长、短环路的时间延迟分别为 $T+\Delta T$ 和 $T-\Delta T$ 。若将单个光脉冲入射到双环

引用格式: 程亚. 光的边界华尔兹: 非线性与非厄米的对舞. 科学通报, 2025, 70: 5401–5403

Cheng Y. Light's boundary Waltz: the duet of nonlinearity and non-Hermiticity (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 5401–5403, doi: [10.1360/CSB-2025-5342](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5342)

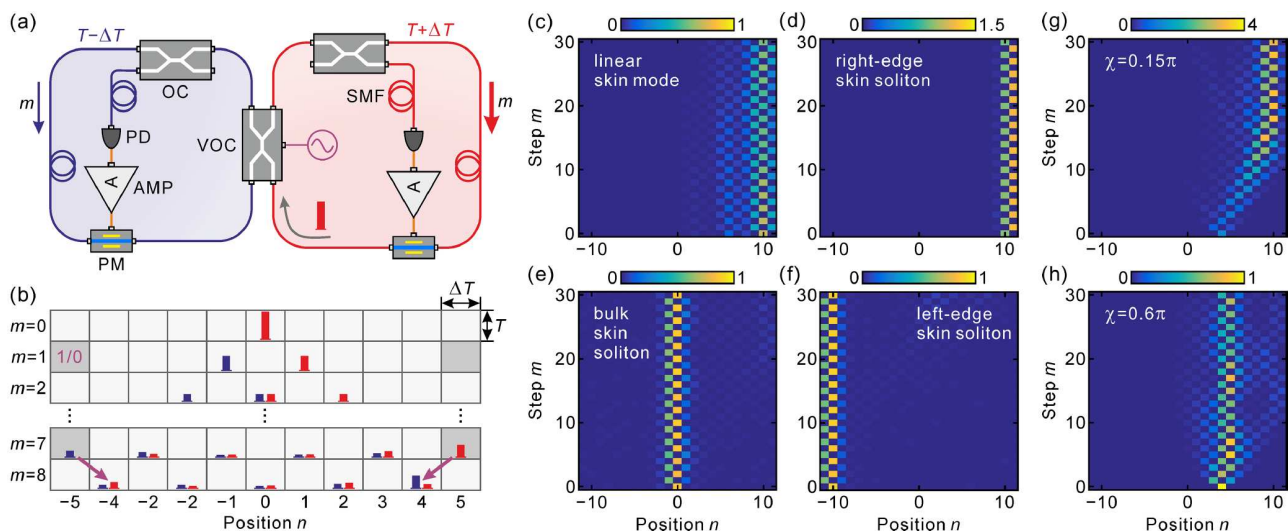


图 1 (网络版彩色)时域光子前馈晶格中的非线性趋肤孤子和可调光路由^[12]. (a) 嵌入光电前馈链路的双光纤环路构造原理示意图. VOC、OC、SMF、PD、AMP和PM分别表示可调光耦合器、光耦合器、单模光纤、光电二极管、电放大和相位调制器. (b) 时域光子晶格构造原理示意图. (c~f) 线性趋肤模式、右边界趋肤孤子、体趋肤孤子和左边界趋肤孤子强度演化实验结果图. (g, h) 在右侧边界和初始位置附近的光路由强度演化实验结果图

Figure 1 (Color online) Nonlinear skin solitons and tunable light routing in temporal photonic feedforward lattices^[12]. (a) Schematic of two coupled fiber loops incorporated with opto-electronic feedforward. VOC, OC, SMF, PD, AMP, and PM represent the variable optical coupler, optical coupler, single-mode fiber, photodiode, amplifier, and phase modulator, respectively. (b) Construction principle of the temporal photonic lattice. (c~f) Measured intensity evolutions of linear skin mode, right-edge skin soliton, bulk skin soliton, and left-edge skin soliton. (g, h) Measured intensity evolutions of light routing around right boundary and initial position

路, 光脉冲在经过中心耦合器后会一分为二, 并分别进入两环路. 相较于两环路平均时延 T , 长环路中的光脉冲在循环一圈后相对地被延迟 ΔT , 而短环路中的光脉冲相对地被提前 ΔT , 此时, 两个脉冲得以在时间域分开. 随着不断循环转圈, 初始光脉冲将逐渐延展成为分布在长、短环路中的两个长脉冲序列. 如图1(b)所示, 若将脉冲随圈数的演化映射到合成时域空间, 可以得到一个离散的晶格结构. 其中, 晶格的演化维度为循环圈数 m , 对光脉冲的时间延迟 t 按 $(t - mT)/\Delta T$ 的方式进行编码可以得到晶格横向维度 n . 除此以外, 两环路中均嵌入了光电前馈链路. 该链路将一小部分光信号耦合出环路, 并用光电二极管和电放将光信号转化为具有一定强度的电信号. 将该电信号通过相位调制器施加到原有光信号上以后, 原有光信号会获得一个与它自身强度包络呈线性关系的相位调制. 由此, 团队便模拟了传统的克尔非线性效应. 相较于真实克尔非线性, 该方案仅需低至毫瓦量级的光功率, 而且非线性系数 χ 可通过改变器件损耗和增益来灵活调节. 而后, 团队借助长环路中的增益和短环路中的损耗在晶格中引入了非对称耦合(在此设置下, 往右的耦合强于往左的耦合); 通过在奇数步将特定格点的耦合分光比设为1/0, 构造了实现非厄米趋肤效应所需的开放边界条件^[12].

在线性情形下, 系统所有本征态(即趋肤模式)均局域在

靠近晶格右边界的数个格点之中, 其典型的分布和演化如图1(c)所示. 当引入克尔非线性时, 非线性相位所构造的波导能够引起自局域效应^[13], 进而增强右边界附近的非厄米趋肤效应, 并形成局域性显著增强的右边界趋肤孤子(right-edge skin soliton), 其演化的实验结果如图1(d)所示. 若在晶格横向施加无序相位扰动, 右边界趋肤孤子相较于线性趋肤模式还表现出了显著增强的鲁棒性^[12]. 与右边界处的局域不同的是, 非厄米趋肤效应在晶格内部以及左边界表现为往右的单向传输^[14], 非线性自局域与之存在竞争关系. 而当非线性自局域足够强时, 能够完全抑制单向传输, 进而形成体趋肤孤子(bulk skin soliton)和左边界趋肤孤子(left-edge skin soliton), 如图1(e)和(f)所示. 由此可见, 利用克尔非线性引起的自局域既能显著增强也能完全抑制非厄米趋肤效应, 从而在不同格点形成稳定传输的趋肤孤子模式.

借助局域在不同位置的趋肤孤子, 他们设计了一个输出端口灵活可调的光路由器. 具体而言, 他们在晶格内部激发了一个低强度光脉冲, 通过改变非线性系数, 在不同格点形成了趋肤孤子, 从而实现了沿着该格点的光路由. 如图1(g)所示, 若非线性系数较小, 光信号首先往右进行持续增益的单向传输, 当到达右边界时, 由于其强度足以引起显著的非线性自局域, 光信号会沿着右边界稳定传输, 即沿着右边界的光路由. 如图1(h)所示, 若非线性系数较大, 光脉冲刚进入晶

格便被局域在初始位置附近, 从而形成在初始位置附近的光路由。当非线性系数介于二者之间, 通过改变非线性系数能够在初始位置和右侧边界之间灵活调整光路由的输出端口。

这一研究不仅将备受关注的非厄米趋肤效应拓展到了非线性领域, 同时也在光信号传输、路由和处理等方面有着重要的应用前景^[15]。

参考文献

- 1 Kawabata K, Shiozaki K, Ueda M, et al. Symmetry and topology in non-Hermitian physics. *Phys Rev X*, 2019, 9: 041015
- 2 Yao S, Wang Z. Edge states and topological invariants of non-Hermitian systems. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 086803
- 3 Yokomizo K, Murakami S. Non-Bloch band theory of non-Hermitian systems. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 066404
- 4 Weidemann S, Kremer M, Helbig T, et al. Topological funneling of light. *Science*, 2020, 368: 311–314
- 5 McDonald A, Clerk A A. Exponentially-enhanced quantum sensing with non-Hermitian lattice dynamics. *Nat Commun*, 2020, 11: 5382
- 6 Xiao L, Deng T, Wang K, et al. Non-Hermitian bulk–boundary correspondence in quantum dynamics. *Nat Phys*, 2020, 16: 761–766
- 7 Lin Z, Song W, Wang L W, et al. Observation of topological transition in Floquet non-Hermitian skin effects in silicon photonics. *Phys Rev Lett*, 2024, 133: 073803
- 8 Yuan L, Lin Q, Xiao M, et al. Synthetic dimension in photonics. *Optica*, 2018, 5: 1396–1405
- 9 Qin C, Zhou F, Peng Y, et al. Spectrum control through discrete frequency diffraction in the presence of photonic gauge potentials. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 133901
- 10 Regensburger A, Bersch C, Miri M A, et al. Parity–time synthetic photonic lattices. *Nature*, 2012, 488: 167–171
- 11 Luo X W, Zhou X, Xu J S, et al. Synthetic-lattice enabled all-optical devices based on orbital angular momentum of light. *Nat Commun*, 2017, 8: 16097
- 12 Wang S, Wang B, Liu C, et al. Nonlinear non-Hermitian skin effect and skin solitons in temporal photonic feedforward lattices. *Phys Rev Lett*, 2025, 134: 243805
- 13 Stegeman G I, Segev M. Optical spatial solitons and their interactions: universality and diversity. *Science*, 1999, 286: 1518–1523
- 14 Lin Q, Yi W, Xue P. Manipulating directional flow in a two-dimensional photonic quantum walk under a synthetic magnetic field. *Nat Commun*, 2023, 14: 6283
- 15 Yu D, Song W, Wang L, et al. Comprehensive review on developments of synthetic dimensions. *Photonics Insights*, 2025, 4: R06