



光学微腔中的耗散孤子

杨震宁¹, 张靖^{2,3*}

1. 清华大学自动化系, 北京 100084;

2. 西安交通大学电子与信息学部自动化科学与工程学院, 西安 710049;

3. 西安交通大学, 智能网络与网络安全教育部重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: zhangjing.1997@tsinghua.org.cn

2022-04-30 收稿, 2022-08-18 修回, 2022-08-20 接受, 2022-08-24 网络版发表

清华大学-佛山先进制造研究院专项经费(20182000306)、辽宁省科技厅联合开放基金机器人学国家重点实验室开放基金(2021-KF-22-01)、清华国强研究院基金(20212000704)、国防基础科学研究计划(JCKY2019407C002)和青岛海洋科学与技术试点国家实验室“问海计划”(2021WHZZB2500, 2021WHZZB2501)资助

摘要 耗散孤子是一种通过耗散增益能量平衡、非线性与波传播的色散平衡形成的能量局域化结构, 由于其形状、速度和强度在传播过程中表现出较强的稳定特性, 常被应用于通讯、谱分析等相关应用. 近年来, 研究发现, 光学微腔可以稳定且高效地产生耗散孤子, 这种能够在片上集成装置产生的耗散孤子在通讯、双光梳光谱技术、频域校准和分析, 以及远距离探测等方面都有着极大的应用优势. 本综述从光学微腔中耗散孤子的耗散增益能量平衡以及非线性和波的色散平衡角度, 分别对光学微腔中的耗散光孤子和光力微腔中耗散孤子的形成、发展和应用进行阐述, 并对耗散孤子的进一步发展和应用进行展望.

关键词 耗散结构, 耗散克尔孤子, 光力耗散孤子, 双光梳光谱技术

1834年, 罗素在爱丁堡连门运河中发现一种奇怪的水波, 这种水波能够一直保持它原本的样子在水面沿着一个固定的方向匀速传播, 他将这一神奇的现象命名为“孤立波”. 1965年, Zabusky和Kruskal^[1]在针对Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou问题的研究中, 提出“孤子”这个概念. 孤子是非线性系统中的一种能量局域解, 它能够在传播和碰撞过程中保持自己的形状、强度、传播方向和传播速度不变. 这种稳定的传播特性和碰撞不变性, 吸引人们对孤子这一非线性现象进行更进一步地研究.

研究者最先在保守系统中发现孤子现象, 但随着研究的进一步深入, 人们发现, 保守系统并不是孤子形成的必要条件. 在很多具有耗散和增益的开放系统中都存在着孤子这一现象^[2,3]. 与保守系统中的孤子不同,

开放系统中孤子的形成一般需要系统存在两种平衡, 如图1(a)所示: 一种是系统内增益和耗散的平衡, 这种平衡能够保持耗散孤子在传播过程中的强度不变; 另一种是孤子在介质中传播时色散与非线性的平衡, 这种平衡能够维持耗散孤子的展宽不变, 即这两种平衡能够使孤子在传播过程中的能量保持稳定同时波包形状维持不变. 21世纪以来, 微纳尺度上的光学微腔由于具有较好的能量局域能力和易集成特性, 受到越来越多研究者的关注, 也成为耗散孤子的新载体. 光学微腔中的孤子研究主要集中在光学微腔中的耗散光孤子和光力微腔中的耗散孤子上. 光学微腔中的耗散光孤子相关研究主要围绕由光学微腔内克尔非线性效应所导致的耗散克尔孤子^[4-6]进行. 研究者通过对其产生机理、稳定方式和产生效率进行分析与改进, 最终形成

引用格式: 杨震宁, 张靖. 光学微腔中的耗散孤子. 科学通报, 2022, 67: 3954–3963

Yang Z N, Zhang J. Dissipative solitons in optical microresonators (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 3954–3963, doi: [10.1360/TB-2022-0504](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0504)

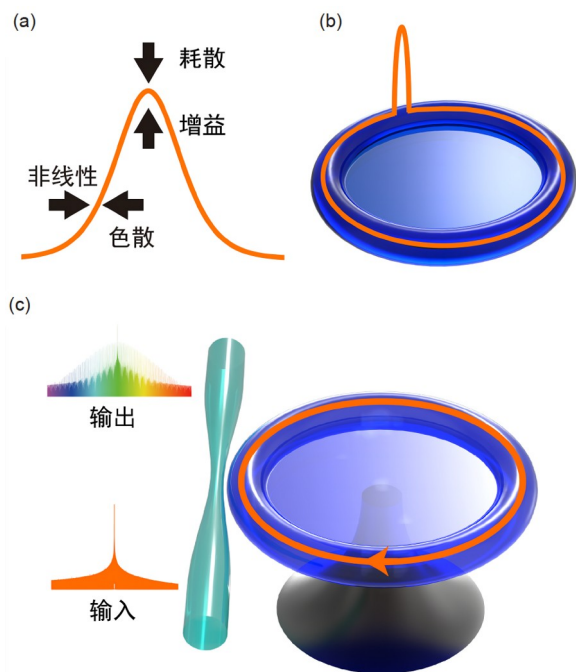


图1 (网络版彩色)耗散克尔孤子的形成示意图^[5]. (a) 耗散克尔孤子形成中的增益与耗散平衡和非线性与色散平衡. (b) 耗散克尔孤子在光学微腔内的传播示意图. (c) 耗散克尔孤子在微腔内的生成示意图, 输入的连续激光经过光学微腔后会变为一个宽频信号

Figure 1 (Color online) The schematic diagram of the formation of dissipative Kerr solitons^[5]. (a) The gain-loss balance and dispersion-nonlinearity balance during the formation of dissipative Kerr solitons. (b) The diagram of dissipative Kerr solitons spreading in microresonators. (c) The formation diagram of dissipative Kerr solitons in microresonators. The input continuous wave transforms to a broadband signal by an optical microresonator

高效且稳定的片上孤子光源, 并应用到距离测量^[7]、系外行星探测^[8]等领域. 此外, 耗散光孤子的两个平衡还可以通过电光非线性^[9]和电驱动^[10]的方式来实现. 近年来, 光力耗散孤子^[11]的发现使光力微腔内的耗散孤子成为新的关注点, 由于其能够产生千赫兹级的细密梳齿, 在精确声学频率测量中有着较大的应用前景. 本文主要介绍了近年来在光学微腔中耗散孤子领域开展的一些工作, 并探讨光学微腔中耗散光孤子和光力微腔中耗散孤子这两类耗散孤子的成因、改进及应用, 最后对光学微腔中耗散孤子的未来发展及应用进行思考 and 讨论.

1 光学微腔中的耗散光孤子

光学微腔具有尺寸小、能量集中及易于集成的特点, 且能够产生包括耗散光孤子在内的多种非线性现象, 因而受到研究者的青睐^[3,6,12-14]. 与其他耗散系统中

的孤子相同, 非线性光腔中的耗散光孤子也需要达到耗散与增益的能量平衡以及非线性与波传播的色散平衡. 根据这两个平衡的形成条件, 光学微腔内的耗散光孤子可以分为由克尔非线性导致的耗散克尔孤子和其他非线性等机制产生的孤子. 本文主要从耗散克尔孤子的相关研究出发, 介绍了耗散克尔孤子的产生机理以及对其稳定性和产生效率改进的相关工作, 并简要综述耗散克尔孤子和其他耗散光孤子的应用.

1.1 光学微腔中的耗散克尔孤子

光学微腔中的耗散克尔孤子是一种能够在光学微腔中稳定传播的光学孤子, 它在光学微腔中的存在方式如图1(b)所示. 2007年, Del'Haye等人^[15]在实验上利用60 mW的单模泵浦激光激发一个直径为75 μm 的光学微型环芯腔, 生成了一个频率梳齿间距约为7 nm、展宽范围达到500 nm的光频梳, 如图1(c)所示. 该工作为光学微腔中的孤子出现提供了一种实验方案. 2010年, Leo等人^[4]在二氧化硅光纤腔中实现了时域上的耗散光孤子. 他们在实验中利用一个波长为1535 nm的脉冲激光器以及一个波长为1551 nm的连续激光器共同产生4 ps宽的光孤子. 波长为1535 nm的脉冲激光器会产生20 W的激光脉冲, 这种强脉冲激光会对连续激光进行交叉相位调制, 从而使连续激光产生光孤子. 这种光孤子在形成过程中, 连续激光器的能量补充与光纤腔的能量耗散相平衡, 而脉冲激光对连续激光的非线性调制与光信号在光纤腔中的传播色散相平衡, 最终形成耗散光孤子这一稳定的耗散结构.

2014年, Herr等人^[16]在更简单的系统中实现了耗散光孤子. 他们利用5 mW的单模泵浦在氟化镁光学微腔中产生重复频率35.2 GHz、宽度1.6 THz的时域耗散光孤子. 他们将泵浦激光与光学微腔的失谐调整在蓝失谐区(激光频率大于光学微腔本征频率), 并在蓝失谐区向红失谐区(激光频率小于光学微腔本征频率)扫频的过程中形成时域上的耗散光孤子. 2017年, Guo等人^[17]对前人的工作进行了改进, 在氮化硅及氟化镁微腔中成功实现了多孤子态到单孤子态的精准调控.

Herr等人^[16]与Guo等人^[17]生成的光孤子不需要额外的脉冲源为孤子形成提供非线性, 而是通过非线性克尔效应来平衡孤子在光学微腔内的传播色散, 同时, 孤子在光学微腔内的能量耗散会与参数激励振荡导致的增益相平衡. 通过这种过程形成的耗散孤子被称为耗散克尔孤子, 可以利用LLE(Lugiato-Lefever Equa-

tion)对耗散克尔孤子进行描述:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = i\frac{D_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial \phi^2} + ig|A|^2 A - \left(\frac{\kappa}{2} + i\Delta\right)A + \sqrt{\kappa_{\text{ex}}}A_{\text{in}}, \quad (1)$$

其中, A 与 A_{in} 分别表示光学微腔内部光场的复振幅与输入光场的复振幅, D_2 表示光场在光学微腔中传播时产生的二阶色散强度, ϕ 表示光学微腔的角度坐标, g 表示非线性耦合强度, κ 表示光学微腔的损耗, Δ 为光学微腔本征频率和泵浦频率的失谐, κ_{ex} 表示光学微腔的耦合强度. 等式右侧的前两项表示耗散克尔孤子形成过程中色散与克尔非线性的平衡, 后两项描述形成过程中耗散与增益的平衡.

在耗散克尔孤子的形成过程中, 由于热光效应造成的色散稳定速度较慢, 为保持克尔非线性和色散的持续平衡, 需要对克尔非线性项进行连续地高速调节. 根据LLE, 实现高速的非线性调节需要对泵浦场的功率或者频率进行快速控制, 该需求会使耗散克尔孤子变得难以稳定, 材料调整技术^[18,19]、功率调制技术^[20~23]和辅助光技术^[24,25]的提出有利于该问题的解决.

2017年, Li等人^[18]提出一种通过改变氮化硅色散强度来增强耗散克尔孤子稳定性的方案, 希望利用这种方式降低耗散克尔孤子的稳定难度. 随后又出现利用辅助光技术提高克尔孤子稳定性的实验. 辅助光技术是利用辅助激光激发高频腔膜, 从而使光学微腔在泵浦光扫频时维持热稳定状态的技术. 这种技术能够有效降低色散的不稳定性, 使耗散克尔孤子系统中的色散与非线性的平衡在更长时间尺度上也能维持稳定的状态. 辅助光技术的实现原理如图2(a)所示. Zhang等人^[24]借助一束波长为1.3 μm 的辅助光, 在 t_0 时刻, 激发

光学微腔的一个高频的光学模式(图2(b)虚线). 在 t_1 时刻, 增强辅助光功率, 使该光学模式的本征频率降低. 然后, 将1.5 μm 的泵浦光加入到光学微腔系统中, 并调整泵浦光频率到这个光学微腔的另一个光学模式处(图2(b)实线). 在 t_2 时刻, 降低辅助光功率, 则光学模式的本征频率升高. 由于光学模式本征频率移动的过程中, 泵浦光的波长不变, 这会使得这个模式下的等效失谐从蓝失谐区移至红失谐区, 从而形成耗散孤子. 由于该过程中, 辅助光保持光学微腔的热稳定性, 系统中的非线性和色散在大的时间尺度上也可以保持平衡, 耗散克尔孤子就能够稳定地产生. 随后, Wildi等人^[26]将辅助光的频率降低到泵浦光附近, 共同扫频去激发同一个光学模式, 进一步降低了耗散克尔孤子的稳定难度.

在耗散克尔孤子能够简单且稳定地生成后, 越来越多的研究人员开始关注耗散克尔孤子的产生效率. 传统的耗散克尔孤子产生方式仅可在单个光学微腔中产生单个孤子. 2017年, Yang等人^[27]提出一种对向光孤子的产生方式, 将耗散克尔孤子的产生效率提高了1倍. 在实验中, 他们利用波长为1.55 μm 的连续激光器和声光调制器, 在直径为3 mm的光学微腔内生成对向传输的耗散克尔孤子(图3(b)), 然后通过声光调制器将两个孤子的重复频率调制到21.9 GHz附近, 且保持60 kHz左右的频差(图3(c)). 该频差信号能够通过拍频的方式经由光电探测器读出, 在干涉图上就能够得到重复时间为16.5 μs 的信号.

为了提高耗散克尔孤子的产生效率, 除了提高微腔使用效率, 提高泵浦到耗散克尔孤子的能量转换效率也很重要. 2022年, Boggio等人^[28]在光学微腔外引入

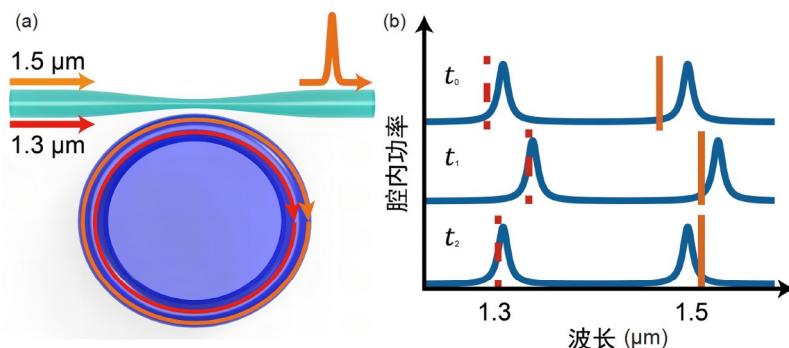


图2 (网络版彩色)利用辅助光形成耗散克尔孤子^[24]. (a) 光学微腔内耗散克尔孤子形成的示意图. (b) 形成耗散克尔孤子过程中, 泵浦光和辅助光频率变化图

Figure 2 (Color online) Formation of dissipative Kerr solitons with an auxiliary laser^[24]. (a) The schematic diagram of the dissipative Kerr soliton formation in microresonators. (b) The frequency adjustment of the auxiliary laser and the pump laser during the generation of dissipative Kerr solitons

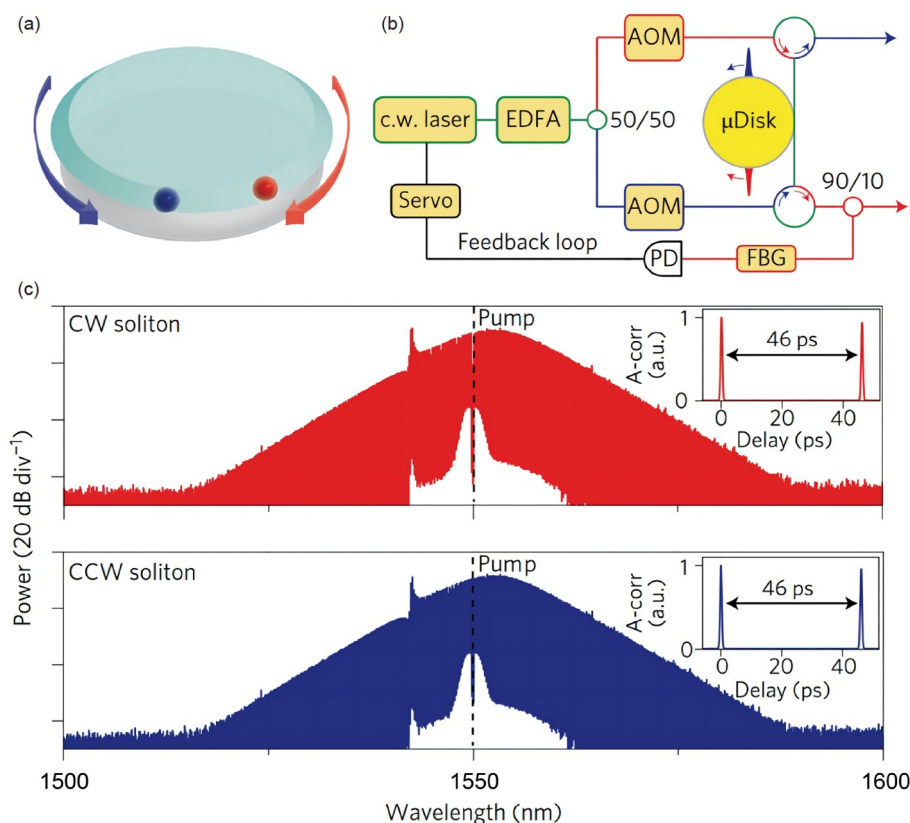


图 3 (网络版彩色)对向传播的耗散克尔孤子^[27]. (a) 光学微腔内对向传播的两个耗散克尔孤子的示意图. (b) 对向传播耗散克尔孤子的实验装置示意图. (c) 对向传播耗散克尔孤子的频域图, 插图为孤子在时域上的图像

Figure 3 (Color online) Counter-propagating dissipative Kerr solitons^[27]. (a) The scheme of two counter-propagating dissipative Kerr solitons in a microcavity. (b) The experiment set-up of counter-propagating dissipative Kerr solitons. (c) The optical spectrum of counter-propagating dissipative Kerr solitons. The insert shows the train of solitons in the time domain

额外反馈, 将耗散克尔孤子的能量转换效率提升了55%.

1.2 光学微腔中的其他耗散光孤子

耗散克尔孤子利用非线性光腔内常见的克尔非线性来平衡色散. 新的色散机制、非线性机制以及能量增益机制的引入也会导致新的平衡出现, 从而产生新的光学微腔耗散光孤子. 2015年, Milián等人^[29]将拉曼效应引入到耗散克尔孤子的形成机理中, 提出锁频拉曼孤子模型, 并在随后的实验中观察到了拉曼孤子的频域状态^[30]. 2019年, Rueda等人^[9]不再借助克尔非线性来平衡光学微腔中的色散, 而是通过二阶非线性效应——电光效应与光学微腔内色散平衡形成一个稳定的耗散结构, 并在通讯波段生成梳齿间距8.9 GHz、宽度达到1.7 THz的电光频梳. 随后, Shi等人^[31]将光力非线性引入到孤子形成的平衡条件中, 在强光力相互作用

的条件下, 实现了一种振动克尔孤子. 这种孤子在传播过程中会出现周期性的包络变化, 同时在其中产生包括极限环、阵发性混沌在内的多种非线性现象. 同年, Meng等人^[10]利用半导体材料制作光学微腔, 利用电势能代替连续光源为耗散克尔孤子提供能量增益, 并在中红外频段产生片上耗散光孤子.

1.3 光学微腔中耗散光孤子的应用

光学微腔中的耗散光孤子为光学微腔传感开辟出了一条全新的道路. 光学微腔内耗散光孤子在二进制信息传输^[4]、片上光学频率合成器^[32]、系外类地行星的探索^[8,33]、光钟^[34]、分频器^[35]、快速光谱技术^[36]及并行光计算的卷积核构建^[37]等方面都有重要应用.

双光梳光谱技术是耗散光孤子实现高精度传感的一个重要手段. 双光梳光谱技术是一种高精度的频谱分析手段, 常利用频域上梳齿间距较近的两个光学频

率梳或光孤子链, 共同作用于被测物体上, 并通过拍频信号的强弱在射频谱段还原被测信号的频率分布信息. 双光梳光谱技术利用光频梳频率分辨率较高且频谱带宽较宽的特点, 能够实现高分辨率、高灵敏度的宽带频谱分析^[38-40].

近年来, 基于光学微腔耗散克尔孤子的双光梳光谱技术取得了显著的进展. 2016年, Suh等人^[41]利用两个直径约3 mm、品质因子为 3×10^8 的光学微腔生成重复频率分别为21.9842和21.9815 GHz的耗散克尔孤子, 并将两个耗散克尔孤子通过耦合器耦合后分两路输出, 其中一路经过充满 H^{13}CN 气体的腔室, 另一路作为对照组直接输出. 通过对比两路输出信号的拍频, 还原出了 H^{13}CN 气体的吸收谱. 该工作利用两个重复频率相差2.6 MHz的耗散克尔孤子作拍频, 在射频谱仪上观测到了频率间隔为2.6 MHz、带宽约为500 MHz的射频频梳信号, 并将化学吸收谱的测定精确到了兆赫兹水平. 为了降低双光梳系统的结构复杂性, Dutt等人^[42]在

2018年将双光梳系统整合到单个晶片上, 并利用单一光源产生了两个频率相差1.4 GHz的光学频率梳. 随着双光梳产生机制的进一步研究, 如图4所示, 基于耗散克尔孤子的双光梳光谱技术在距离测量^[7,43]、化学成分检测^[41,44]、光声探测^[45]等方面的应用都得以便捷高效地实现.

2 光力微腔中的耗散孤子

随着对光学微腔系统的进一步研究, 人们将光力这一概念引入到光学微腔中, 从而形成了光力微腔的模型. 与光学微腔中的耗散光孤子不同, 光力微腔中的耗散孤子不仅包含耗散光孤子, 也会在机械模式上产生耗散孤子. 这种机械模式上产生的耗散孤子与Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou链^[46-48]、微机械系统^[49-51]以及晶体机械孤子^[52]在内的多种机械孤子有着类似的现象, 且相较于其他系统中的机械孤子, 光力微腔中的耗散孤子具有梳齿间距小、集成度高等特点, 在片上系统

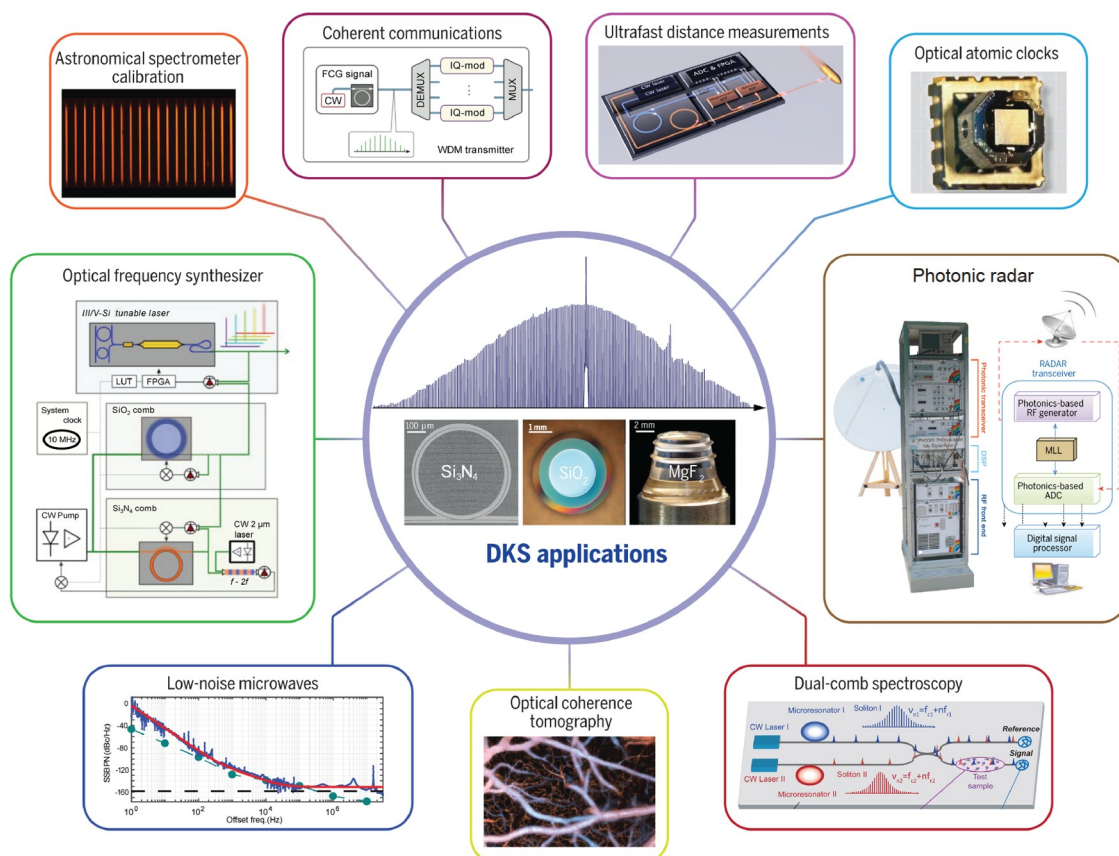


图4 (网络版彩色)耗散克尔孤子的应用^[5], 包括超快速距离测量^[7,43]、光钟^[34]、双光梳光谱技术^[41]、光层析成像等

Figure 4 (Color online) The applications of dissipative Kerr solitons^[5], including ultrafast distance measurement^[7,43], optical atomic clocks^[34], dual-comb spectroscopy^[41], optical tomography, etc.

传感方面有着很好的应用前景。

目前, 光力微腔中的耗散孤子根据其产生机制可分为两类: 一类是利用光力微腔阵列产生的耗散光孤子, 另一类是通过光力非线性和声子激光^[53], 在单个光力微腔中产生的光力耗散孤子。

2.1 光力微腔阵列中的耗散光孤子

光力微腔阵列常利用拓扑结构引入额外的光学色散, 使其与光力非线性相平衡来实现耗散机械孤子。2016年, Gan等人^[54]根据光力微腔中的光力非线性提出一种基于光力微腔阵列的耗散光孤子, 在这种孤子形成过程中, 相邻光力微腔间的耦合引入了额外的光学色散, 与光力非线性相平衡, 从而形成稳定的耗散结构。随后的一年内, Xiong等人^[55]在理论上论证了具有较强光力非线性的光力微腔阵列会产生Kuznetsov-Ma孤子。2018年, Xiong和Wu^[56]利用光力微腔间的耦合产生光学色散项, 通过光力非线性和光学色散进行平衡, 并利用光学泵浦弥补光学的耗散, 从而仿真实现光力微腔阵列中的光学Akhmediev呼吸子, 同时借助光力耦合在光力微腔阵列中产生机械Akhmediev呼吸子。

2.2 光力微腔中的耗散机械孤子

2021年, Zhang等人^[11]将声子激光引入到光力微腔机械孤子的形成过程中, 并在光力微腔中发现了光力耗散孤子。这种光力耗散孤子的波包在尺度上达到光力微腔直径的数倍, 远超之前所有的耗散光孤子。如图5(a)所示, 由于光辐射压力的存在, 光学微腔内的光场会导致机械振动的产生, 并向中心的硅柱传播。机械振动与硅柱的碰撞会反转其传播方向, 并产生 π 相位的相位差, 从而产生向光力微腔边缘传播的机械振动。该机械振动在到达光力微腔边缘处时, 会受到光信号的调制, 并重复之前的过程, 从而构成了光力耗散孤子的光力晶格模型, 如图5(a)所示。在这个光力晶格模型中, 光力作用会在光力微腔边缘处对传播中的机械波进行周期性的调制, 这种调制会导致机械波出现色散, 而该色散又受到微腔中光力非线性的压制。当色散与光力非线性形成平衡时, 机械波传播过程中的波包形状就会趋于稳定, 最终形成光力耗散孤子(图5(a)中虚线)。在输入光失谐较小时, 光力效应引入的非线性太强, 会导致机械系统处在稳定的周期区(图5(b)); 随着输入光失谐量的不断增大, 光力非线性减弱, 并逐渐接近机械波的传播色散, 此时机械振动会从周期区经过椭圆余弦

波区(图5(c)), 最终达到光力耗散孤子区(图5(d))。

光力耗散孤子的形成需要利用光力非线性对机械波包的调制来平衡机械振动的传播色散, 同时需要机械振动产生的声子激光与饱和增益来平衡机械孤子传播中的损耗。为了更清晰地描述这两个平衡, 可以利用改进后的Korteweg-de Vries(KdV)方程来描述光力耗散孤子:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left[(G - \Gamma_m) - \xi u^2 \right] u - v \frac{\partial u}{\partial z} - \sigma u \frac{\partial u}{\partial z} - d_{\text{KdV}} \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} + \zeta(t), \quad (2)$$

其中, u 表示机械振动波的幅度, z 是沿着光力微腔径向的坐标, G 是声子激光引入的机械增益项, Γ_m 是机械波传播中的耗散率, ξ 代表光力引入的三阶非线性强度, v 是光力耗散孤子的有效传播速度, σ 是机械振动的非线性系数, d_{KdV} 是光力耗散孤子传播过程中的三阶色散强度, $\zeta(t)$ 是系统中的白噪声。

通过改进后的KdV方程, 能够看出光力耗散孤子的耗散增益平衡由声子激光引入的增益、机械传播的损耗以及光力非线性引入的饱和增益共同实现, 而色散、非线性平衡由机械波传播过程中的三阶色散与光力非线性共同实现, 从而形成了稳定的光力耗散孤子。

2.3 光力微腔耗散孤子的应用

光力耗散孤子由于其频率低、稳定性能好且精度高的特点, 能够实现千赫兹到兆赫兹级宽谱信号的高灵敏探测, 在振动频率测量^[11,57]、水下距离探测^[58]、信息传输^[59]等方面有广阔的应用。

2019年, Ganesan和Seshia^[57]利用机械孤子成功实现了光力微腔共振频率追踪。他们借助一个3.85 MHz的泵浦场来实现氮化铝谐振腔的本征频率检测。泵浦场和光力微腔的本征模式会产生混频, 并在本征频率附近生成频梳, 通过检测生成频梳的中心位置就能够精确得到谐振腔的本征频率为3.8475 MHz。2021年, Zhang等人^[11]利用机械本征频率为27.3 MHz的高 Q 值微型环芯腔产生了光力耗散孤子, 并测量得到悬臂梁的振动频率为384.24 kHz。

2019年, Wu等人^[58]利用机械双梳方法实现了高精度的水下距离测量, 能够在10 m内实现精度超过微米级别的测量。2022年, Qian等人^[59]将4种梳齿间距不同的机械孤子作为4个信道实现了水下信息的多信道传输, 他们将天津大学校徽图像编码后在水下发射, 并在

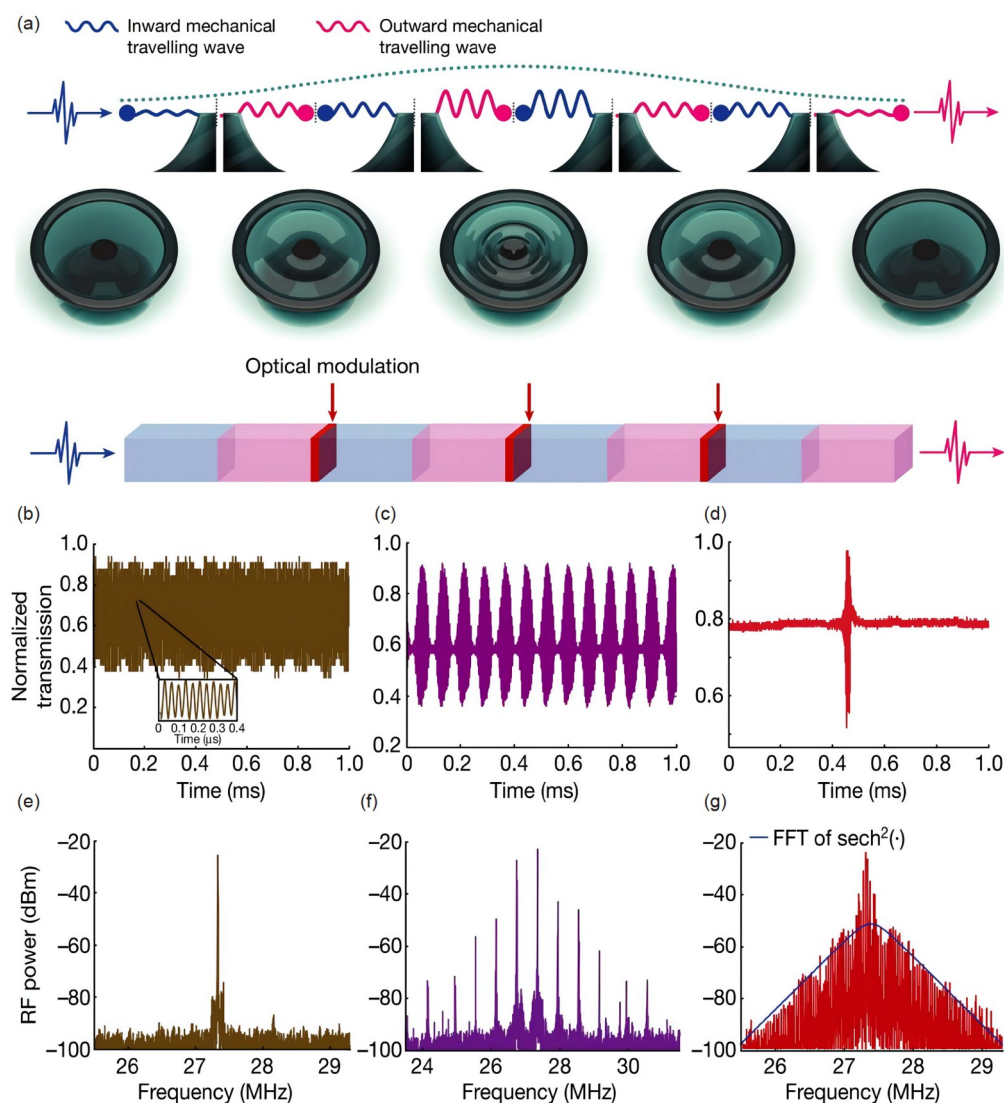


图5 (网络版彩色) 光力耗散孤子的形成^[11]. (a) 光力耗散孤子的光力晶格模型示意图. (b) 机械模式处于周期区的时域图像. (c) 机械模式处于椭圆余弦波区的时域图像. (d) 机械模式处于孤子区的时域图像. 正弦区(e)、椭圆余弦波区(f)和孤子区(g)的频谱信号

Figure 5 (Color online) The generation of optomechanical dissipative solitons^[11]. (a) The optomechanical lattice model of optomechanical dissipative solitons. (b) Time domain spectra of the mechanical mode in the periodic regime. (c) Time domain spectra of the mechanical mode in the cnoidal regime. (d) Time domain spectra of the mechanical mode in the soliton regime. Frequency spectra of sinusoidal-wave (e), cnoidal-wave (f) and soliton (g)

10 m外成功恢复了校徽图像. 利用机械孤子实现的多信道传输方式具有较高的信噪比和较低的误码率, 为水下信息传输提供了高效的方案.

3 总结与展望

本文介绍了近年来光学微腔中耗散孤子的研究进展, 主要围绕耗散孤子形成时耗散增益间的能量平衡、非线性与波传播色散间的色散平衡, 介绍了光学微腔中的耗散光孤子和耗散机械孤子这两种孤子, 并

描述了其在光学微腔中的产生、演化过程以及应用. 目前光学微腔中的耗散克尔孤子已经拥有成熟的模型和众多衍生成果, 耗散克尔孤子在硅基芯片上的多种应用已经在国内外得以实现. 同时, 耗散机械孤子方面的研究已经具有初步的进展, 基于改进后的KdV方程的模型被提出. 这些成果为耗散孤子传感的应用打好了坚实的基础.

耗散光孤子研究已经取得较大进展, 基于耗散光孤子的高精度测量和高分辨率成像都已得到广泛应用.

与耗散光孤子不同, 机械孤子, 尤其是光力耗散孤子方面的研究才刚刚起步. 在未来的研究中, 还可以关注以下几个方面: (1) 由于光力耗散孤子形成过程中的椭圆余弦波区与频梳有类似的形态, 可以利用这个信号实现射频信号校准、太空频梳等高精度信号测量. (2) 利

用光力耗散孤子实现宽带宽、高精度的射频信号传感. (3) 利用光力耗散孤子多频率、多通道的特点实现长距离高效信号传输. 通过对耗散孤子形成和应用的研究, 我们希望耗散孤子能够在包括传感、通讯在内更广阔的应用中展现其价值.

参考文献

- 1 Zabusky N J, Kruskal M D. Interaction of “Solitons” in a collisionless plasma and the recurrence of initial states. *Phys Rev Lett*, 1965, 15: 240–243
- 2 Picholle E, Montes C, Leycuras C, et al. Observation of dissipative superluminous solitons in a Brillouin fiber ring laser. *Phys Rev Lett*, 1991, 66: 1454–1457
- 3 Rozanov N N. Dissipative optical solitons. *J Opt Technol*, 2009, 76: 187–198
- 4 Leo F, Coen S, Kockaert P, et al. Temporal cavity solitons in one-dimensional Kerr media as bits in an all-optical buffer. *Nat Photonics*, 2010, 4: 471–476
- 5 Kippenberg T J, Gaeta A L, Lipson M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators. *Science*, 2018, 361: eaan8083
- 6 Li X, Shen B, Wang H, et al. Universal isocontours for dissipative Kerr solitons. *Opt Lett*, 2018, 43: 2567
- 7 Suh M G, Vahala K J. Soliton microcomb range measurement. *Science*, 2018, 359: 884–887
- 8 Obrzud E, Rainer M, Harutyunyan A, et al. A microphotonic astrocomb. *Nat Photonics*, 2019, 13: 31–35
- 9 Rueda A, Sedlmeir F, Kumari M, et al. Resonant electro-optic frequency comb. *Nature*, 2019, 568: 378–381
- 10 Meng B, Singleton M, Hillbrand J, et al. Dissipative Kerr solitons in semiconductor ring lasers. *Nat Photonics*, 2022, 16: 142–147
- 11 Zhang J, Peng B, Kim S, et al. Optomechanical dissipative solitons. *Nature*, 2021, 600: 75–80
- 12 Grelu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers. *Nat Photonics*, 2012, 6: 84–92
- 13 Akhmediev N, Ankiewicz A. Dissipative Solitons. Berlin: Springer, 2005
- 14 Barland S, Tredicce J R, Brambilla M, et al. Cavity solitons as pixels in semiconductor microcavities. *Nature*, 2002, 419: 699–702
- 15 Del’Haye P, Schliesser A, Arcizet O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator. *Nature*, 2007, 450: 1214–1217
- 16 Herr T, Brasch V, Jost J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators. *Nat Photonics*, 2014, 8: 145–152
- 17 Guo H, Karpov M, Lucas E, et al. Universal dynamics and deterministic switching of dissipative Kerr solitons in optical microresonators. *Nat Phys*, 2017, 13: 94–102
- 18 Li Q, Briles T C, Westly D A, et al. Stably accessing octave-spanning microresonator frequency combs in the soliton regime. *Optica*, 2017, 4: 193
- 19 Wang Z Y, Wang P Y, Li M, et al. Numerical characterization of soliton microcomb in an athermal hybrid $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiO}_2$ microring. *Appl Opt*, 2022, 61: 4329–4335
- 20 Papp S B, Del’Haye P, Diddams S A. Parametric seeding of a microresonator optical frequency comb. *Phys Rev X*, 2013, 21: 17615–17624
- 21 Del’Haye P, Beha K, Papp S B, et al. Self-injection locking and phase-locked states in microresonator-based optical frequency combs. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 043905
- 22 Brasch V, Geiselmann M, Pfeiffer M H P, et al. Bringing short-lived dissipative Kerr soliton states in microresonators into a steady state. *Opt Express*, 2016, 24: 29312
- 23 Yi X, Yang Q F, Youl Yang K, et al. Active capture and stabilization of temporal solitons in microresonators. *Opt Lett*, 2016, 41: 2037
- 24 Zhang S, Silver J M, Del Bino L, et al. Sub-milliwatt-level microresonator solitons with extended access range using an auxiliary laser. *Optica*, 2019, 6: 206
- 25 Zhou H, Geng Y, Cui W, et al. Soliton bursts and deterministic dissipative Kerr soliton generation in auxiliary-assisted microcavities. *Light Sci Appl*, 2019, 8: 50
- 26 Wildi T, Brasch V, Liu J, et al. Thermally stable access to microresonator solitons via slow pump modulation. *Opt Lett*, 2019, 44: 4447
- 27 Yang Q F, Yi X, Yang K Y, et al. Counter-propagating solitons in microresonators. *Nat Photonics*, 2017, 11: 560–564
- 28 Boggio J M C, Bodenmüller D, Ahmed S, et al. Efficient Kerr soliton comb generation in micro-resonator with interferometric back-coupling. *Nat Commun*, 2022, 13: 1292
- 29 Milián C, Gorbach A V, Taki M, et al. Solitons and frequency combs in silica microring resonators: Interplay of the Raman and higher-order dispersion effects. *Phys Rev A*, 2015, 92: 033851
- 30 Yang Q F, Yi X, Yang K Y, et al. Stokes solitons in optical microcavities. *Nat Phys*, 2017, 13: 53–57
- 31 Shi J C, Ji Q X, Cao Q T, et al. Vibrational Kerr solitons in an optomechanical microresonator. *Phys Rev Lett*, 2022, 128: 073901

- 32 Spencer D T, Drake T, Briles T C, et al. An optical-frequency synthesizer using integrated photonics. *Nature*, 2018, 557: 81–85
- 33 Suh M G, Yi X, Lai Y H, et al. Searching for exoplanets using a microresonator astrocomb. *Nat Photonics*, 2019, 13: 25–30
- 34 Newman Z L, Maurice V, Drake T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock. *Optica*, 2019, 6: 680
- 35 Weng W, Kaszubowska-Anandarajah A, Liu J, et al. Frequency division using a soliton-injected semiconductor gain-switched frequency comb. *Sci Adv*, 2020, 6: 2807
- 36 Niu R, Wan S, Li J, et al. Fast spectroscopy based on a modulated soliton microcomb. *IEEE Photonics J*, 2021, 13: 6801204
- 37 Feldmann J, Youngblood N, Karpov M, et al. Parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core. *Nature*, 2021, 589: 52–58
- 38 Coddington I, Newbury N, Swann W. Dual-comb spectroscopy. *Optica*, 2016, 3: 414
- 39 Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy. *Nat Photonics*, 2019, 13: 146–157
- 40 Shams-Ansari A, Yu M, Chen Z, et al. Thin-film lithium-niobate electro-optic platform for spectrally tailored dual-comb spectroscopy. *Commun Phys*, 2022, 5: 88
- 41 Suh M G, Yang Q F, Yang K Y, et al. Microresonator soliton dual-comb spectroscopy. *Science*, 2016, 354: 600–603
- 42 Dutt A, Joshi C, Ji X, et al. On-chip dual-comb source for spectroscopy. *Sci Adv*, 2018, 4: e1701858
- 43 Trocha P, Karpov M, Ganin D, et al. Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs. *Science*, 2018, 359: 887–891
- 44 Yang Q F, Shen B, Wang H, et al. Vernier spectrometer using counterpropagating soliton microcombs. *Science*, 2019, 363: 965–968
- 45 Wildi T, Voumard T, Brasch V, et al. Dual-comb spectroscopy with photoacoustic detection. In: *Optical Sensors and Sensing Congress*. Washington DC: Optica Publishing Group, 2020. EM2C.1
- 46 Cao L S, Qi D X, Peng R W, et al. Phononic frequency combs through nonlinear resonances. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 075505
- 47 Ganesan A, Do C, Seshia A. Phononic frequency comb via intrinsic three-wave mixing. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 033903
- 48 Ganesan A, Do C, Seshia A. Phononic frequency comb via three-mode parametric resonance. *Appl Phys Lett*, 2018, 112: 021906
- 49 Ganesan A, Do C, Seshia A. Observation of three-mode parametric instability in a micromechanical resonator. *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 193501
- 50 Savchenkov A A, Matsko A B, Ilchenko V S, et al. Surface acoustic wave opto-mechanical oscillator and frequency comb generator. *Opt Lett*, 2011, 36: 3338–3340
- 51 Czaplewski D A, Chen C, Lopez D, et al. Bifurcation generated mechanical frequency comb. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 244302
- 52 Hao H Y, Maris H J. Experiments with acoustic solitons in crystalline solids. *Phys Rev B*, 2001, 64: 064302
- 53 Zhang J, Peng B, Özdemir Ş K, et al. A phonon laser operating at an exceptional point. *Nat Photonics*, 2018, 12: 479–484
- 54 Gan J H, Xiong H, Si L G, et al. Solitons in optomechanical arrays. *Opt Lett*, 2016, 41: 2676
- 55 Xiong H, Gan J, Wu Y. Kuznetsov-Ma soliton dynamics based on the mechanical effect of light. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 153901
- 56 Xiong H, Wu Y. Optomechanical akhmediev breathers. *Laser Photonics Rev*, 2018, 12: 1700305
- 57 Ganesan A, Seshia A. Resonance tracking in a micromechanical device using phononic frequency combs. *Sci Rep*, 2019, 9: 9452
- 58 Wu H, Qian Z, Zhang H, et al. Precise underwater distance measurement by dual acoustic frequency combs. *Ann Phys-Berlin*, 2019, 531: 1900283
- 59 Qian Z, Sun W, Ma X, et al. Quadrature acoustic frequency combs multiplexing for massive parallel underwater acoustic communications. *Ann Phys-Berlin*, 2022, 534: 2100426

Summary for “光学微腔中的耗散孤子”

Dissipative solitons in optical microresonators

Zhenning Yang¹ & Jing Zhang^{2,3*}

¹ Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² School of Automation Science and Engineering, Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

³ Ministry of Education Key Lab for Intelligent Networks and Network Security, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

* Corresponding author, E-mail: zhangjing.1997@tsinghua.org.cn

A soliton is a stationary local structure that keeps its waveform and spreading speed during propagation. Recent research shows that chip-scale optical microresonators can support dissipative solitons with surprisingly high energy efficiency and stability. The formation of optical microresonator dissipative solitons requires two balances, gain-loss balance and dispersion-nonlinearity balance. The gain-loss balance maintains the soliton's amplitude while the dispersion-nonlinearity balance keeps its width. In this paper, we review the formation, development, and applications of dissipative optical solitons, as well as dissipative mechanical solitons in optical microresonators, and analyze the balances in different solitons. This review mainly consists of two parts: Optical microresonator dissipative solitons and opto-mechanical microresonator dissipative solitons. The first part discusses a typical kind of solitons named dissipative Kerr solitons. Dissipative Kerr solitons balance the propagation dispersion through Kerr nonlinearity in optical microresonators and are widely studied due to their easy implementation in silicon-based microcavities. In order to improve the practical performance of dissipative Kerr solitons, researchers have proposed many schemes to improve their stability and efficiency. Meanwhile, various high-precision sensing applications based on dissipative Kerr solitons, such as photonic radar, range measurement, and absorption spectrum detection, have drawn extensive attention. The second part introduces the dissipative solitons in optomechanical microresonators. A recently-discovered type of solitons, optomechanical dissipative solitons, is introduced. Unlike the dissipative Kerr solitons, the optomechanical dissipative solitons gain their power from phonon lasing, and compensate the propagation dispersion by optomechanical nonlinearity. The dynamics of the optomechanical dissipative solitons are described by the modified Korteweg-de Vries equation. Low-frequency optomechanical dissipative solitons can achieve kHz-accuracy acoustic signal measurement, which can be used in acoustic detection and communication. Finally, we summarize the formation, development, and applications of dissipative solitons in optomechanical microresonators. We also provide an outlook for future applications like radio-frequency calibration, radio-frequency communications, and underwater tomography.

dissipative structure, dissipative Kerr soliton, optomechanical dissipative soliton, dual-comb spectroscopy

doi: [10.1360/TB-2022-0504](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0504)