光电器件

DOI:10.16818/j.issn1001－5868.202401310

基于串联双微腔同时实现不同特征的光频梳

任志斌,刘　鑫,孔　梅*

(长春理工大学 物理学院,长春 1300221)

摘　要： 在单微腔光场非线性演化方程的基础上,推导了串联双微腔的演化方程,分析了两个微腔中色散情况相反时的腔内光场特征和初始脉冲对腔内光场的影响。理论分析结果表明,串联双微腔不仅增加了更多的参数选择自由度,还可以在两个微腔中分别输出具有不同特征的光频梳,从而显著提高微腔光频梳的产生和利用效率。通过调节初始脉冲的脉宽、幅值和相位可以控制腔内孤子的数量和位置。该研究工作对双微腔结构中稳定光孤子的产生和调制具有参考意义。

关键词： 串联双微腔；光学频率梳；光孤子；非线性光学

中图分类号： TN252　**文章编号：** 1001－5868(2025)01－0038－05

Simultaneous Generation of Optical Frequency Combs with Different Characteristics Based on Cascaded Dual Microcavities

REN Zhibin, LIU Xin, KONG Mei

(**School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN**)

Abstract: Based on the nonlinear evolution equation of optical field in a single microcavity, the evolution equation for cascaded dual microcavities is derived, and the characteristics of the intracavity optical field and the impact of initial pulse on the optical field are analyzed when the dispersions in the two microcavities are opposite. The theoretical analysis results indicate that the cascaded dual microcavities not only increase the degrees of freedom for parameter selection but can also output optical frequency combs with different characteristics from the two microcavities. This can significantly enhances the generation and utilization efficiency of microcavity frequency combs. By adjusting the width, amplitude, and phase of the initial pulse, the number and position of intracavity solitons can be controlled. This work is of reference significance for generation and modulation of stable optical solitons in dual microcavity structures.

Key words: cascaded dual microcavities; optical frequency comb; optical soliton; nonlinear optics

0　引言

光频梳是一种具有梳状结构且能稳定存在的新型光谱,它既可作为多波长光源应用于通信和光信息处理领域,又可作为许多精密测量的工具[1-4]。其中微腔光频梳由于具有体积小、重复频率高、功耗低和集成度高等优势,在光钟[5]、高速通信[6]、超快距离测量[7]等领域具有广泛的应用价值。

对于常用的单微腔结构,在反常色散条件下,可以实现强度大小、时域形状、传播速度不变的亮孤子[8-9]。在正常色散条件下,通过改变泵浦光的频率失谐[10],也可以激发光频梳的产生,但这一过程需要对泵浦功率和波长进行精确的调谐,同时需要使用强烈的扰动作为初始条件,这大大增加了在正

收稿日期:2024－01－31.

* **通信作者:**孔　梅

常色散下产生光频梳的难度[11]。

除了利用单个微腔产生光频梳，研究者们也对复合微腔光频梳可能的优势进行了一些探索，如利用并联双微腔提升泵浦功率的利用效率[12]，以及利用串联双微腔实现两个相同的光梳之间的同步[13]。

本文在单微腔光场非线性演化方程的基础上，推导出了串联双微腔结构的归一化Lugiato-Lefever方程（LLE），并设计出可以在两个微腔中分别产生不同特征的光频梳的微腔参数，即在两个微腔中分别实现了亮孤子光频梳和暗孤子光频梳。同时研究发现在正常色散条件下该串联双微腔结构比单微腔更容易激发光频梳。此外，还显示了调节初始脉冲的脉宽、幅值和相位可以控制孤子个数和位置。研究结果表明，与单微腔结构相比，串联双微腔结构不仅增加了更多的参数选择自由度，还可以显著提高微腔光频梳的产生和利用效率，从而为光频梳的利用提供更大的便利和更多的可能。

1　串联双微腔光频梳理论分析模型

串联双微腔结构如图1所示，由两个微腔和一个直波导相互耦合而成，两个微腔之间不发生耦合，第一个微腔内的光传输完全不受第二个微腔的影响。泵浦光经直波导耦合进入第一个微腔中，直通的泵浦光和从第一个微腔耦合回直波导的光经直波导右端输出，以泵浦光的形式经波导结构耦合到第二个微腔中，最终由输出端输出。

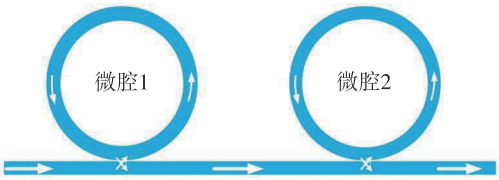


图1　串联双微腔结构示意图

单微腔光场非线性演化过程可以用归一化LLE描述[14]，即：

$$\frac{\partial\psi}{\partial\tau}=\left[-(1+\mathrm{i}\delta)-\mathrm{i}\frac{\beta}{2}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2}+\mathrm{i}|\psi|^2\right]\psi+f_0 \quad (1)$$

式中，$\psi(\theta,\tau)$是腔内光场的复振幅，$\theta\in[-\pi,\pi]$为沿着微腔的方位角，τ是无量纲的时间，δ表示腔谐振频率和泵浦频率之间的归一化失谐系数，β为归一化色散系数，f_0为归一化泵浦参量。

对于图1所示的串联双微腔，腔1的LLE与单微腔相同，可以写为：

$$\frac{\partial\psi_1}{\partial\tau}=\left[-(1+\mathrm{i}\delta_1)-\mathrm{i}\frac{\beta_1}{2}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2}+\mathrm{i}|\psi_1|^2\right]\psi_1+f_1 \quad (2)$$

光在腔1中循环一圈后的输出光场和经过腔1后剩余的泵浦光一起成为腔2的泵浦光，按参数归一化的设定[14]，可求得非归一化的腔2泵浦光为：

$$E_{\mathrm{in},2}=\mathrm{i}\sqrt{k}\frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma L}{\alpha}}}\psi+\sqrt{1-k}\frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma Lk}{\alpha^3}}}f_1 \quad (3)$$

进入腔2的归一化泵浦光为：

$$f_2=\sqrt{\frac{\gamma Lk}{\alpha^3}}E'_{\mathrm{out1}}=\mathrm{i}\psi+\sqrt{1-k}\,f_1 \quad (4)$$

式中，k为耦合区的功率耦合系数，γ为非线性系数，L是腔周长，α为腔的总损耗，设定两个腔的这些参数是相同的。因此，腔2的LLE为：

$$\frac{\partial\psi_2}{\partial\tau}=\left[-(1+\mathrm{i}\delta_2)-\mathrm{i}\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2}+\mathrm{i}|\psi_2|^2\right]\psi_2+\mathrm{i}\psi_1+\sqrt{1-k}\,f_1 \quad (5)$$

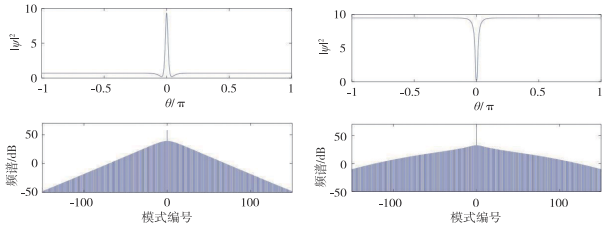
公式(3)和(5)中各参量含义与公式(1)中的相同，下角标1和2分别代表腔1和腔2的参数。公式中所有参数都进行了无量纲化处理，这使得数值计算不需要拘泥于具体的谐振腔参数。根据公式(1)和(4)可以分别得到腔1和腔2的光场分布情况。

2　同时实现不同特征的光频梳

在微腔内激发稳定的单孤子光频梳对微腔光学频率梳具有重要意义。然而，只有当腔内色散和非线性效应平衡以及增益和损耗平衡时才能形成光孤子[15]。所以微腔的几个参量必须落到一些很小的组合区间内，才能形成孤子光频梳。本研究发现，通过设置合理的双微腔参数，可在微腔1和微腔2中同时产生孤子光频梳。当两个微腔的色散情况相反时，还能同时实现不同特征的光频梳，具体参数选取和计算结果如下。

为了在腔1中得到亮孤子光频梳，腔1的归一化色散取为反常色散，$\beta_1=-0.02$，为在腔2中得到暗孤子光频梳，归一化色散取为正常色散，$\beta_2=0.001$。双微腔的其他参数优化选取为：$\delta_1=\delta_2=3.5$，$f_0=2.5$，$k=0.009$。计算中，需设定初始光场，即公式(4)中起始时刻的ψ_0。微腔内的光频梳是经由调制不稳定性演化而来[16]，可将初始光场设为高斯脉冲，取初始光场$\psi_0=0.5+\exp\left[-0.5\times\right.$

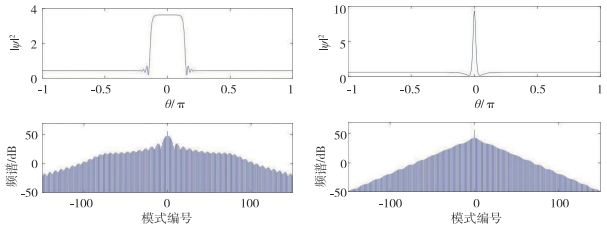
$\left(\theta/0.1\right)^2\Big]$。如图2所示，在腔1中得到稳定的亮孤子，相应的频谱由宽带频梳组成，频谱包络较为平滑。在腔2中得到稳定的暗孤子，相应的频谱具有高平坦度。



（a）腔1内光场和光谱分布　（b）腔2内光场和光谱分布

图2　在腔1和腔2中分别实现亮和暗孤子光频梳

反之，如果两个微腔的色散情况与前一种相反，取腔1和腔2的归一化色散分别为$\beta_1=0.001$和$\beta_2=-0.02$，其他参数为：$\delta_1=3.3$，$\delta_2=3.8$，$f_0=2$，初始脉冲相同，则会在第一个微腔中形成泵浦转化效率高的平顶孤子，在第二个微腔中形成亮孤子，如图3所示，也能同时实现不同特征的光频梳。基于此，在串联双微腔结构中，通过结构参数的独立设计可以同时实现两个相同或不同的光频梳，泵浦光与第一个微腔输出的光在第二个微腔中的非简并四波混频效应具有更高的转换效率，通过四波混频过程更高阶的边带梳齿迅速产生，并扩展到整个频域范围，形成光频梳。因此，双微腔可以显著提高微腔光频梳的产生和利用效率，并应用于微波频率产生和相干探测等。

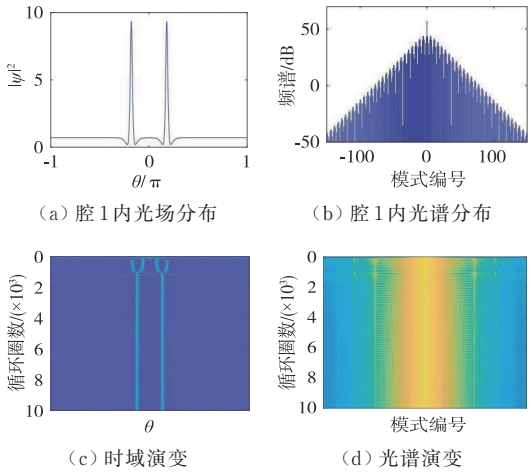


（a）腔1内光场和光谱分布　（b）腔2内光场和光谱分布

图3　在腔1和腔2中分别实现暗和亮孤子光频梳

3　初始脉冲对腔内光场的影响

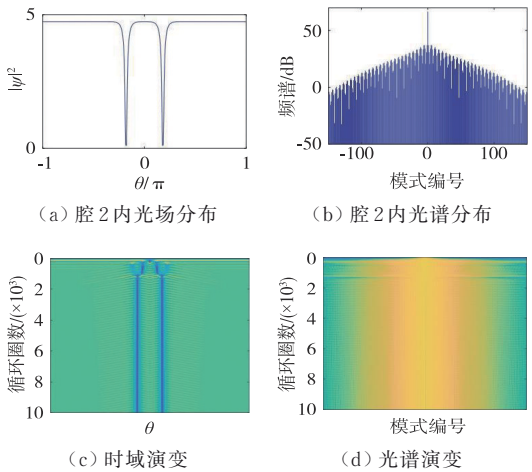
初始脉冲能量决定产生孤子的个数[17]，所以串联双微腔内的孤子数量可以通过改变初始脉冲的脉宽或幅值来实现。在其他参数与计算图2时相同的情况下，实验探究初始脉冲对光场的影响。当初始脉冲的脉宽从上一节的0.1增加到0.3时，计算表明双微腔内的单孤子都分裂成双孤子。图4(a)和(b)分别描述了当初始脉冲的脉宽为0.3时带有反常色散的腔1内稳定的双孤子光场和光谱分布。图4(c)描述腔1内光场随腔内循环圈数的时域演变，图4(d)描述腔1光谱分布随腔内循环圈数的演变情况。图5(a)和(b)分别描述了当初始脉冲的脉宽为0.3时带有正常色散的腔2内稳定的暗双孤子光场和光谱分布。图5(c)描述腔2内光场随腔内循环圈数的时域演变，图5(d)描述腔2光谱分布随腔内循环圈数的光谱演变。



（a）腔1内光场分布　（b）腔1内光谱分布

（c）时域演变　（d）光谱演变

图4　当初始脉冲增大到0.3时，腔1中亮孤子光频梳及其随腔内循环圈数的演化过程



（a）腔2内光场分布　（b）腔2内光谱分布

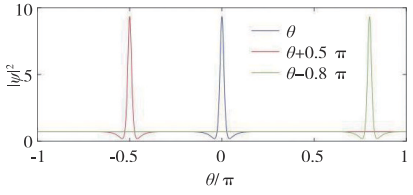
（c）时域演变　（d）光谱演变

图5　当初始脉冲增大到0.3时，腔2中暗孤子光频梳及其随腔内循环圈数的演化过程

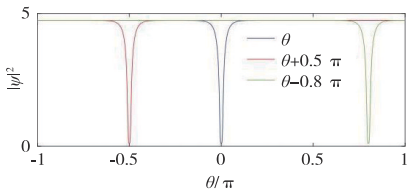
当改变初始脉冲的幅值时，同样能使腔内能量改变，导致腔内孤子个数改变。由此可见，腔内光场的演化结果对腔内的初始脉冲有很强的依赖关系。经分析，这些现象应该是初始脉冲的宽度和幅

值变化导致腔内光对泵浦光的利用率发生变化，从而影响了腔内色散和非线性效应的平衡，进一步导致了时域和频域光强分布的变化。如前文所述，初始脉冲即腔1中的初始光场，其宽度和幅值越大，表明初始脉冲能量越大，也就能更充分地利用泵浦光。

串联双微腔内孤子的位置也可以通过改变初始脉冲的相位（$\theta+\varphi$）来实现。如图6分别给出了初始脉冲的相位对两个微腔内孤子位置的影响，其他参数与计算图2时相同。可见，对于带有不同色散情况的两个微腔，当改变初始脉冲的相位时，腔内孤子的时域脉冲波形没有任何改变，只是孤子在腔内的位置随着相位的改变而移动。因此，通过改变初始脉冲的相位，就可以灵活地控制亮孤子、暗孤子在腔内的位置。



（a）反常色散腔1



（b）正常色散腔2

图6　初始光场相位对腔内孤子位置的影响

计算结果表明，考虑两微腔之间总线波导长度对应的相移不会影响腔2中孤子的位置，其原因在于腔2中的光完全来自腔1，其初始脉冲和泵浦光之间的相位差与腔1中二者关系相同，而与两个微腔之间的距离无关。

4　结论

实现不同特征的光频梳对于适应不同的应用需求有重要意义。本文在单微腔结构的理论基础上，推导了串联双微腔结构的光场演化方程，分析了带有不同色散情况时双微腔结构光频梳的特征。经研究结果表明，与单微腔结构相比，利用串联双微腔结构可以同时实现不同特征的光频梳，还可以通过调节初始脉冲的脉宽、幅值和相位来实现孤子个数和位置的控制。在实际应用中，不同色散的微腔可以通过控制每个微腔的结构参数，如波导宽度来实现，为每个腔附加一个耦合输出波导，就可以分别得到两个不同特征的光梳。本研究工作进一步揭示了复合微腔光频梳所展现出的新颖功能，同时对未来利用复合微腔实现更多具有新异特征的光频梳提供了借鉴与参考。

参考文献：

[1] Geng Y, Zhou H, Han X, et al. Coherent optical communications using coherence-cloned Kerr soliton microcombs[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1070.

[2] Liang W, Eliyahu D, Ilchenko V S, et al. High spectral purity Kerr frequency comb radio frequency photonic oscillator[J]. Nature Communications, 2015, 6: 7957.

[3] Reimer C, Kues M, Roztocki P, et al. Generation of multiphoton entangled quantum states by means of integrated frequency combs[J]. Science, 2016, 351(6278): 1176-1180.

[4] Suh M G, Yang Q F, Yang K Y, et al. Microresonator soliton dual-comb spectroscopy[J]. Science, 2016, 354(6312): 600-603.

[5] Newman Z L, Maurice V, Drake T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock[J]. Optica, 2019, 6(5): 680.

[6] Torres-Company V, Weiner A M. Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(3): 368-393.

[7] Trocha P, Karpov M, Ganin D, et al. Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs[J]. Science, 2018, 359(6378): 887-891.

[8] Kippenberg T J, Gaeta A L, Lipson M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators[J]. Science, 2018, 361(6402): eaan8083.

[9] Kippenberg T J, Holzwarth R, Diddams S A. Microresonator-based optical frequency combs[J]. Science, 2011, 332(6029): 555-559.

[10] Herr T, Brasch V, Jost J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators[J]. Nature Photonics, 2013, 8(2): 145-152.

[11] Matsko A B, Savchenkov A A, Ilchenko V S, et al. Hard and soft excitation regimes of Kerr frequency combs[J]. Physical Review A, 2012, 85: 023830.

[12] Xue X, Zheng X, Zhou B. Super-efficient temporal solitons in mutually coupled optical cavities[J]. Nature Photonics, 2019, 13(9): 616-622.

[13] Jang J K, Klenner A, Ji X, et al. Synchronization of coupled optical microresonators[J]. Nature Photonics, 2018, 12(11): 688-693.

[14] Coen S, Erkintalo M. Universal scaling laws of Kerr

frequency combs[J]. Optics Letters, 2013, 38(11): 1790-1792.

[15] Lucas E G A. Physics of dissipative kerr solitons in optical microresonators and application to low-noise frequency synthesis[D]. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2019.

[16] Coen S, Haelterman M. Continuous-wave ultrahigh-repetition-rate pulse-train generation through modulational instability in a passive fiber cavity[J]. Optics Letters, 2001, 26(1): 39-41.

[17] 王景灏. 硅基微环谐振腔中的克尔光频梳研究[D]. 武汉：华中科技大学, 2018.

Wang Jinghao. Reaearch on the kerr optical frequency combs in silicon-based microresonators [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018.

作者简介：

任志斌(1998—)，男，硕士研究生，目前主要研究方向为微腔光学频率梳；

孔　梅(1967—)，女，博士，教授，主要研究方向为导波光学器件物理和应用、光学传感技术等。