

热效应作用下的微环克尔光频梳

何明芳^{**}, 陈开鑫^{*}, 胡哲峰

电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731

摘要 目前微环产生光频梳的理论分析方法主要有两种:非线性耦合模理论和非线性 Lugiato-Lefever 方程 (LLE) 模型。这些理论研究一般只考虑了色散和光学非线性效应,忽略了强抽运光作用下微环谐振腔中热效应的影响。通过对微环热效应的分析,在非线性 LLE 的基础上加入热效应作用的相移对方程进行修正,仿真了固定和调节初失谐量两种情况下耗散腔光孤子/光频梳在微环谐振腔内产生的整个过程,分析了两种不同方式产生克尔光频梳的机理,并对比分析了两种方式下克尔光频梳的性能和造成性能差异的原因。

关键词 非线性光学; 克尔光频梳; Lugiato-Lefever 方程模型; 热效应; 耗散腔光孤子; 初失谐量

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091901

Kerr Optical Frequency Comb Based on Micro-Ring Resonator with Thermal Effect

He Mingfang^{**}, Chen Kaixin^{*}, Hu Zhefeng

School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract At present, two theoretical analysis methods, nonlinear coupled-mode theory and nonlinear Lugiato-Lefever equation (LLE) model, are used to investigate the generation of Kerr optical frequency comb in micro-ring resonators. In previous theoretical studies, only dispersion and optical nonlinear effects were generally considered, and the thermal effects in micro-ring resonators under strong pumping were ignored. In this paper, in view of the thermal effect in the micro-ring resonator induced by the traveling light beam, the nonlinear LLE is modified, and based on the modified equation, the generation of Kerr optical frequency comb is investigated for the two cases of fixing and adjusting the initial detuning. Generation mechanisms of the Kerr optical frequency comb based on these two different ways are analyzed. The characteristics of the Kerr optical frequency comb generated by the two ways are compared, and the reason that causes their difference is investigated.

Key words nonlinear optics; Kerr optical frequency comb; Lugiato-Lefever equation model; thermal effect; dissipative cavity optical soliton; initial detuning

OCIS codes 190.3270; 190.4870; 190.4975

1 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,既可作为多波长光源应用于通信和光信息处理^[1],又可作为许多精密测量的工具^[2-3]。

基于微环谐振腔产生的克尔光频梳在频率上覆盖范围广,一般能实现从超紫外到中红外的超宽光谱,具有良好的稳定性和相干性,梳齿频率间隔可以

根据微环谐振腔的材料和设计几何尺寸调节。微环谐振腔尺寸小,易集成,功耗低,品质因数 Q 值高,且制作工艺成熟,易于批量生产,因此基于微环谐振腔产生克尔光频梳的研究引起了国内外科科研工作者的关注^[4-6]。但这些研究大多忽视了微腔内高功率密度导致的热效应的影响,依然把强光抽运下的微腔内模式当作冷腔模式扩展,并假设折射率与温度无关^[7]。微腔的回音壁模式能量限制在非常狭窄的

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-04-09; 录用日期: 2018-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(61501088)

* E-mail: chenkx@uestc.edu.cn; ** E-mail: hmf_imp@163.com

圆环腔内,密度很高的能量导致局部温度升高进而引起折射率变化。显然,这种热效应作用将影响本征模式的分布、线宽和空间扩展等。鉴于此,Carmon等^[8]分析了强光抽运下微腔内的动态热行为,并通过实验研究了其对光频梳的影响。由于热效应作用过程复杂且贯穿整个光梳形成过程,为进一步理解热效应对光梳产生过程的影响,本文在之前Lugiato-Lefever方程(LLE)的基础上,引入热效应引起的相移修正,从而将其影响反映在仿真分析中,并在此基础上重点仿真分析了调节与不调节初失谐量两种LLE的仿真模型,其中调节失谐量相当于对包括热效应在内的相移进行了人为补偿,不调节失谐量则相当于没有进行这种补偿。

2 微环谐振腔产生光频梳的理论模型

克尔光频梳在微环谐振腔中产生,是由于耦合进入高 Q 值微腔中的光场谐振增强,当腔内光功率超过产生非线性效应的阈值时,通过环内发生参量振荡带来频率转换,激发腔内其他频率的谐振模式。图1为微环谐振腔产生克尔光频梳的实验配置示意图^[5]。

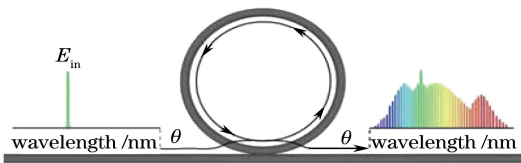


图1 微环谐振腔产生克尔光频梳的实验配置示意图

Fig. 1 Configuration of micro-ring resonator-based optical frequency comb generation

2.1 LLE

目前,描述微环谐振腔产生克尔光频梳过程的理论模型主要有两种。一种是非线性耦合模理论模型^[7,9],该模型通过微腔中的耦合模方程,将频域上的抽运模式逐渐拓展到其他谐振模式。该方程在频域求解的数值计算需考虑模式四波混频关系,计算时间与微腔模式数的三次方成正比,因此难以计算模式数超过几百个的光梳演化过程。另一种是非线性LLE模型^[10-11],该模型是利用光场在非线性色散介质中传输的非线性薛定谔方程,结合微环谐振腔的周期性边界条件,包含衰减、耦合、色散等因素的非线性薛定谔方程,即LLE,利用分步傅里叶法计算很好地解决了计算模式数过大的问题,第一次模拟了光频梳动态过程,理论计算结果与之前的实验结果吻合。该LLE模型可写为^[12]

$$t_R \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} =$$

$$\left[-\alpha - i\delta_0 + iL \sum_{k \geq 2} \frac{\beta_k}{k!} \left(i \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^k + iL\gamma |E|^2 \right] \times E + \sqrt{\theta} E_{in}, \quad (1)$$

式中: t_R 为光场沿微环传输一圈的时间; $\alpha = (\alpha_i + \theta)/2$ 为整个谐振腔的损耗,其中 α_i 为腔内衰减, θ 为耦合系数; $\delta_0 = 2\pi L - \phi_0$ 为抽运光场与冷腔共振波长的失谐, ϕ_0 为抽运光初始相位; β_k 为谐振腔的第 k 阶色散系数; γ 为克尔非线性系数; E_{in} 为抽运光场;连续时间 t 表示腔内光场的慢变时间。

2.2 加入热效应作用修正的LLE

光波在传输过程中产生的热量会使微环谐振腔自身的温度升高,由于热光效应的存在,温度变化导致折射率改变,非线性相移增加,即相位作用改变。波导中传播光场经过长度 L 后相位变化量可表示为 $\Delta\varphi = k_0 L n_{eff}$,其中 k_0 为光场在真空中的波数, n_{eff} 为波导有效折射率。热光效应作用下 n_{eff} 的变化量 Δn_{eff} 可用波导芯层折射率 n_1 的变化量 Δn_1 近似表示,热效应引起的光波经过长度 L 后相移变化可表示为

$$\Delta\varphi_t = k_0 \Delta n_1 = k_0 K_{THO} \Delta T(t), \quad (2)$$

式中: K_{THO} 为芯层材料热光系数; n_1 为芯层折射率; ΔT 为光场传输单位长度的时间内波导温度的增量。

从物理意义上来说,LLE就是光场沿波导传输时,其包络中的每一个频谱分量都得到一些与频率或强度有关的相移,引起这些相移的因素包括色散、衰减和失谐等。考虑到热效应的影响后,加入热光效应作用修正后的LLE可表示为

$$t_R \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} = \left[-\alpha - i\delta_0 + iL \sum_{k \geq 2} \frac{\beta_k}{k!} \left(i \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^k + iL\gamma |E|^2 + iL\Delta\varphi_t \right] E + \sqrt{\theta} E_{in}, \quad (3)$$

即

$$t_R \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} = \left[-\alpha - i\delta_0 + iL \sum_{k \geq 2} \frac{\beta_k}{k!} \left(i \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^k + iL\gamma |E|^2 + iLk_0 K_{THO} \Delta T(t) \right] E + \sqrt{\theta} E_{in}. \quad (4)$$

在后章节的仿真中,氮化硅微环谐振腔内的温度变化利用微腔的热动态方程得到^[8]。根据能量守恒原则,微环谐振腔热量的改变为吸收的热量与通过表面散发的热量之差,即

$$C_P \frac{d\Delta T(t)}{dt} = \frac{dq_{in}(t)}{dt} - \frac{dq_{out}(t)}{dt} = I_h \frac{1}{\left[\frac{\lambda_p - \lambda_0(1+a)\Delta T}{\Delta\lambda/2} \right]^2 + 1} - K\Delta T(t), \quad (5)$$

式中: C_p 为热容量; $q_{in}(t)$ 和 $q_{out}(t)$ 分别为 t 时刻谐振腔吸收和散发的热量; λ_p 为抽运光波长。

3 LLE 模型仿真

为了使仿真更具有参考价值且对实验有指导意义, 仿真中的参数利用已有的微环谐振腔产生光频梳的实验参数^[13]。仿真过程中只考虑二阶色散, 主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Free spectral range $\Delta\omega_{FSR}$	226 GHz
Pump wavelength λ_p	1550 nm
Nonlinear parameter γ	$1 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Loss per roundtrip α_1	0.009
Power transmission coefficient θ	0.009
2 nd -order dispersion coefficient β_2	$-4.711 \times 10^{-26} \text{ s}^2/\text{m}$
Pump power P_{in}	0.755 W

仿真中考虑两种不同的处理方式, 一种是调节初失谐量, 即在实验中对抽运光波长进行线性调节;

另一种是固定初失谐量, 实验中不调节抽运光波长, 只需用一个具有固定初失谐量的波长进行抽运。该 LLE 可以通过分步傅里叶方法^[14] 利用 MATLAB 进行数值仿真, 具体来说是在假定光场在传输过程中, 每经过一段微小距离, 分别考虑色散和非线性效应的作用, 这种分离色散与非线性效应的处理方法简单有效, 可得到一个近似结果。

3.1 调节初失谐量的 LLE 仿真

为了使微腔快速进入热平衡状态从而令腔内孤子稳定, 可通过调制抽运光与冷腔的失谐实现, 这种调节同时也是对热效应引入的相移的补偿。利用热效应修正后的 LLE[(4)式]仿真得到克尔光梳频谱及时域波形随抽运光失谐量 δ_0 的演变, 其中 δ_0 以 $2 \times 10^{-3} \text{ ns}^{-1}$ 的扫描速度从 -0.0045 扫描到 0.0653 , 腔内孤子、光频梳和功率的演变如图 2 所示。一般认为在调节失谐量的情况下, 光梳和孤子的演变可分为四个连续阶段, 即稳定的调制不稳定性阶段、不稳定的调制不稳定性阶段、不稳定的腔孤子状态和稳定的腔孤子状态^[15]。

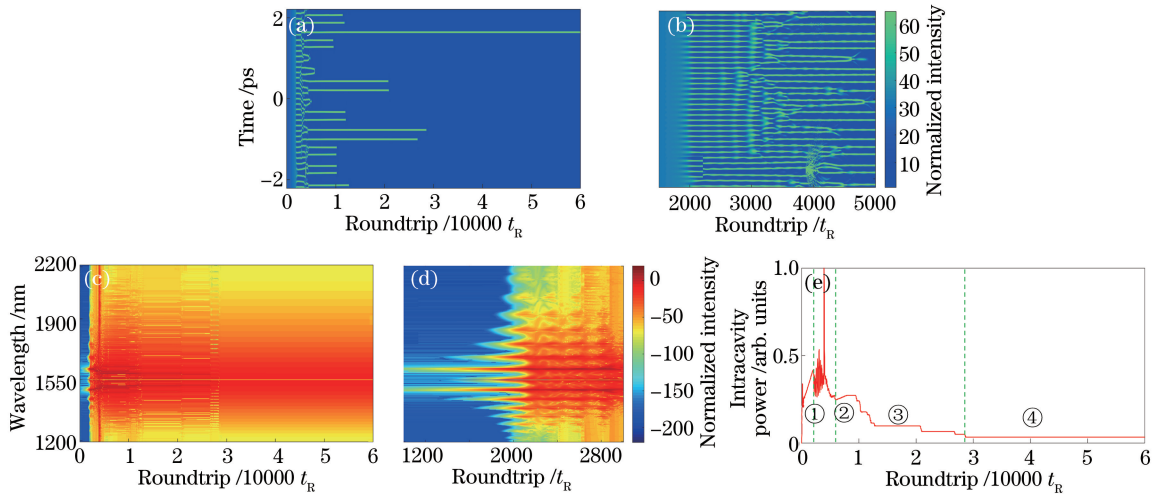


图 2 调节初失谐量时微环谐振腔产生光孤子和克尔光频梳演变过程。(a) 耗散腔光孤子的演变过程; (b) 仿真中 1500~5000 圈的孤子演变; (c) 克尔光频梳的演变过程; (d) 仿真中 1000~3000 圈的光梳演变; (e) 微环谐振腔内的功率变化曲线

Fig. 2 Generation of optical solitons and Kerr optical frequency comb in micro-ring resonators by adjusting the initial detuning. (a) Evolution of dissipative cavity solitons; (b) simulation of the soliton evolution from the 1500th to the 5000th loop; (c) evolution of the Kerr optical frequency comb; (d) simulation of the optical comb evolution from the 1000th to the 3000th loop; (e) power variation in the micro-ring resonator

为了更清晰地看到调节初失谐量情况下的孤子演变过程, 辅以图 3 来说明。

在第①阶段, 随着抽运光与冷腔的失谐逐渐减小, 腔内功率迅速升高, 调制不稳定性在它的增益谱中产生光梳主线, 并通过四波混频(FWM)效应复制到更多的谐振模式上。此时非线性、热效应和色散

等效效应导致的相位偏移相互抵消使梳线相位锁定, 时域为稳定的多脉冲。

进入第②阶段后, 腔内功率还在持续增加并产生光梳次线, 不同次线重叠使光梳之间相位失配, 整个光梳随机起伏, 时域波形随机抖动。由于此时腔内功率仍较高, 因此所有随机抖动波形都可能获得

足够的增益补偿腔内损耗从而保持在微环内。

当腔内功率升高到抽运光受到的非线性交叉相位调制大于抽运光失谐导致的相位偏移时,光梳演变进入第③阶段。腔内抽运光功率迅速下降,使大多数随机抖动获得的增益无法补偿回环损耗,逐渐从腔内消失。只有个别具有较高幅度的波形保持在微腔中,在色散和非线性相位调制的共同作用下演化为振荡孤子,随后逐渐收敛为稳定的耗散腔孤子。该过程中距离很近的两个孤子会发生碰撞进而湮灭,如图3中圈出的红色区域所示。

最后进入稳定的第④阶段,腔内功率稳定,只有一个(或多个)孤子稳定存在,在频域上梳线排满整个频谱带宽^[16]。

3.2 固定初失谐量的 LLE 仿真

在之前的仿真和已有报道的实验中,一般利用调制输入的单色连续抽运光的波长达到仿真中调节初失

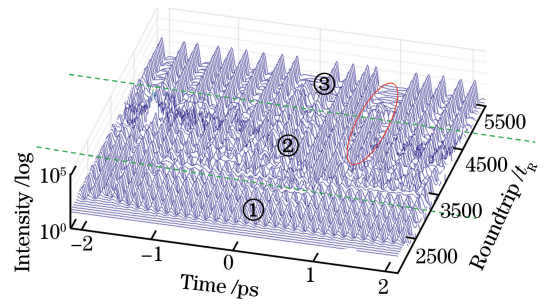


图3 微环谐振腔中光孤子的演变过程

Fig. 3 Evolution of dissipative optical solitons in the micro-ring resonator

谐量值的目的,这种调节也是由于热效应的存在。当固定初失谐量的值时,相当于不对热效应引入的相移进行补偿,因此热效应的影响明显表现出来,微腔进入热平衡状态和孤子到达稳定状态所需的时间变长。当初失谐量 δ 固定在0.0296时仿真结果如图4所示。

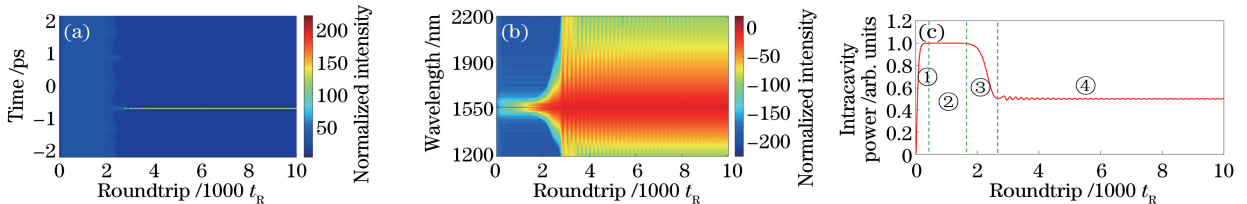


图4 不调节初失谐量时微环谐振腔产生光孤子和克尔光频梳演变过程。(a)微腔光孤子演变过程;
(b)克尔光频梳演变过程;(c)腔内功率变化曲线

Fig. 4 Generation of optical solitons and Kerr optical frequency comb in micro-ring resonators when fixing the initial detuning. (a) Evolution of dissipative cavity solitons; (b) evolution of the Kerr optical frequency comb;
(c) power variation in the micro-ring resonator

图5中能清晰地看到固定初失谐量时光孤子的主要演变过程。

在第①阶段,调制不稳定性对连续抽运光产生幅度和频率的自调制,使叠加在连续波上的扰动呈指数增长。随机噪声在该过程中不断放大,腔内功率急剧上升,随机抖动呈现一定的功率峰,形成随机脉冲,频域上抽运光波长周围出现边带。

随着随机波形的产生,腔内功率暂时稳定下来,光梳或孤子演变进入第②阶段。由于色散和非线性效应,随机脉冲被压缩,所以脉冲的峰值功率在该阶段一直增加。

当随机脉冲的功率增加到非线性作用大于原本固定的抽运光初失谐时到达第③阶段,随机脉冲得到的参量不足以补偿在腔内循环的损耗。随着时间逐渐消失,腔内功率逐渐减小,只有少量功率较大的随机脉冲保留下来。

最后进入第④阶段,保留下来的脉冲继续受到非线性效应的影响,自行调节其形状和脉宽,腔内功

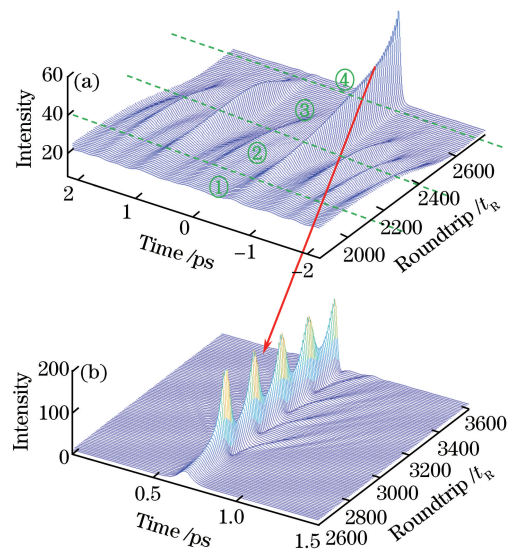


图5 (a)微环谐振腔中光孤子演变过程;(b)最后保留的一个孤子的演变

Fig. 5 (a) Evolution of optical solitons in the micro-ring resonator; (b) evolution of the last preserved soliton

率发生周期性变化,逐渐调制到稳定状态,最后腔内形成稳定的孤子。

4 仿真结果分析

第3节分别仿真了调节初失谐量和固定初失谐量两种情况下的耗散腔孤子和光频梳的演变过程,最终的孤子和光频梳状态如图6所示。

对比发现,在时域上,调节初失谐量的孤子峰值远高于固定初失谐量的峰值,且时域噪声很小,除孤子脉冲外能量基本为0。固定失谐量的情况下,由于微腔并没有很快进入热平衡状态,在非线性和色散的持续作用过程中相位失配逐渐减小,最终实现相位匹配。对比图2(a)和图4(a)可以看出,两种情况下孤子演变过程不同,在固定初失谐量情况下基本都是调制不稳定性加强或减弱

随机抖动的功率,没有经历明显的多孤子状态,最后能量最高的随机抖动直接演化为孤子状态,其他位置的抖动逐渐自调节到平坦,所以也存在一定功率;在频域上,调节初失谐量产生的光频梳整个带宽大且平坦度也比固定初失谐量时好。从图2(c)和图4(b)明显看到,固定初失谐量时,梳线的演变过程中没有主梳的产生过程,整个演变过程是由四波混频作用以抽运光波长为中心逐渐发展到整个频域。两种情况下频域梳线的等效射频(RF)频谱如图7所示,梳线噪声和线宽基本相同。值得注意的是,两种方式的比较是在每个阶段的整体比较,并不是真正意义上时间点(仿真圈数)的比较,因为在仿真过程中失谐量调节速度是人为设定的,在实验过程中也可以利用调谐抽运光波长的方法控制失谐速度。

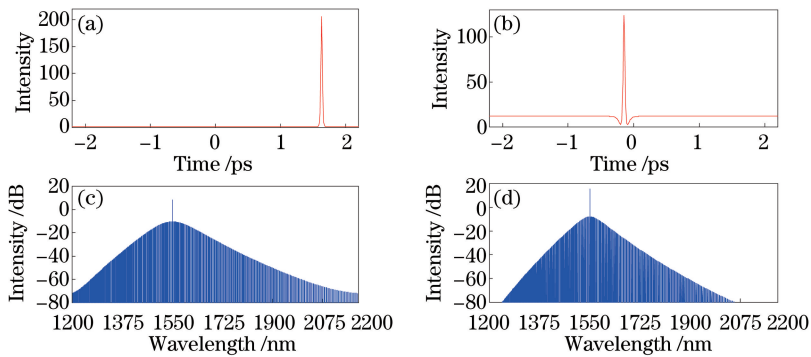


图6 (a)(b)调节初失谐量情况下的孤子和光频梳状态;(c)(d)固定初失谐量情况下的孤子和光频梳状态

Fig. 6 Soliton and optical frequency comb. (a)(b) Adjusting the initial detuning; (c)(d) fixing the initial detuning

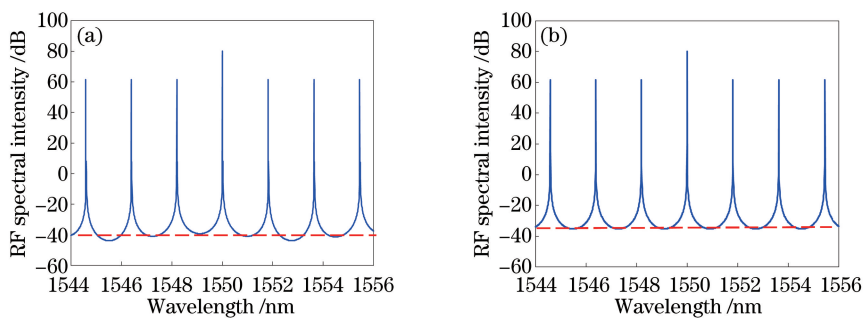


图7 (a)调节初失谐量情况下的光梳;(b)固定初失谐量情况下的光梳

Fig. 7 Optical frequency combs when (a) adjusting and (b) fixing the initial detuning

5 结论

主要用热效应作用的相位关系修正原来只包含色散、衰减损耗和失谐的LLE,然后用两种方法仿真了孤子在微环谐振腔中的耗散腔光孤子的演变过程,发现两种方法都可以让加入随机噪声的单色连续抽运光演变为孤子,但调节失谐量的情况下产生

的孤子和光频梳的噪声小。然而,在实际实验中,调节失谐量的情况下实验难度很大,如果对时域脉冲噪声要求不高,可以固定抽运光波长。

参考文献

- [1] Qin M, Wu J H, Duan C Y. Study of terabit transmission experiment based on CO-OFDM with

- the optical fiber combs[J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(3): 52-55.
- 覃勳, 吴锦虹, 段春艳. 基于光频 CO-OFDM 的太比特传输实验研究[J]. *光通信技术*, 2016, 40(3): 52-55.
- [2] Wu X J, Li Y, Wei H Y, *et al.* Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030001.
- 吴学健, 李岩, 尉昊赞, 等. 飞秒光学频率梳在精密测量中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030001.
- [3] Zhuge J C, Xing S J, Gao J S. Theoretical analysis of arbitrary and absolute length measurement by using femtosecond optical frequency comb[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0112004.
- 诸葛晶晶, 邢书剑, 高建树. 飞秒光频梳的任意长绝对测距理论分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0112004.
- [4] Chembo Y K. Kerr optical frequency combs: theory, applications and perspectives [J]. *Nanophotonics*, 2016, 5(2): 214-230.
- [5] Li M F, Wang J H, He Y, *et al.* Progress in theoretical studies on the generation of micro-ring resonator-based optical frequency combs [J]. *Study on Optical Communications*, 2015(5): 38-40.
- 李梅凤, 王景灏, 何岩, 等. 基于微环谐振腔产生光频梳的理论研究进展[J]. *光通信研究*, 2015(5): 38-40.
- [6] Wang Y W, Zhang M M, Xia L, *et al.* Progress in dispersion control of micro-ring resonator-based optical frequency comb generation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 060001.
- 王元武, 张敏明, 夏历, 等. 基于微环谐振腔产生光频梳的色散控制的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 060001.
- [7] Chembo Y K, Yu N. Modal expansion approach to optical-frequency-comb generation with monolithic whispering-gallery-mode resonators [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033801.
- [8] Carmon T, Yang L, Vahala K J. Dynamical thermal behavior and thermal self-stability of microcavities [J]. *Optics Express*, 2004, 12(20): 4724-4750.
- [9] Chembo Y K, Strekalov D V, Yu N. Spectrum and dynamics of optical frequency combs generated with monolithic whispering gallery mode resonators [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 103902.
- [10] Coen S, Randle H G, Sylvestre T, *et al.* Modeling of octave-spanning Kerr frequency combs using a generalized mean-field Lugiato-Lefever model [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 37-39.
- [11] Leo F, Coen S, Kockaert P, *et al.* Temporal cavity solitons in one-dimensional Kerr media as bits in an all-optical buffer[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(7): 471-476.
- [12] Hansson T, Wabnitz S. Frequency comb generation beyond the Lugiato-Lefever equation: multi-stability and super cavity solitons[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(7): 1259-1261.
- [13] Okawachi Y, Saha K, Levy J S, *et al.* Octave-spanning frequency comb generation in a silicon nitride chip[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3398-3400.
- [14] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. San Diego: Academic Press, 2007.
- [15] Lamont M R E, Okawachi Y, Gaeta A L. Route to stabilized ultrabroad band microresonator-based frequency combs[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(18): 3478-3481.
- [16] Zhou H. *Fundamental and application studies of nonlinear optics in three types of optical waveguides and structures* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 45-46.
- 周恒. 几类光波导中的非线性光学基础研究及应用探索[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 45-46.