

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.16

自注入锁定微腔克尔频梳的锁定态研究

田林龙, 郝智彪*, 孙长征, 汪莱, 罗毅

(清华大学电子工程系 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084)

摘要: 当前自注入锁定频梳理论研究在不同参数对于自启动效果的影响的探究尚不完善, 用于解释锁定机理的工作点理论与数值仿真的结果差异较大且无法很好地解释部分实验现象。本文利用包含微腔背散射效应的LLE (Lugiato-Lefever Equation) 方程, 构建了自启动克尔微梳模型, 使用基于分步傅里叶算法的数值仿真并结合各参数的物理内涵, 探究了模型关键参数对于频梳自启动锁定态的影响; 在此基础上, 针对现有自注入锁定微腔频梳锁定理论不足的问题, 从模型基本公式出发, 修正了工作点锁定理论, 提升了对自启动数值仿真中锁定态预测的准确性, 提高了理论预测与数值仿真和实验结果的契合度。

关键词: 克尔微梳; 自启动; 自注入锁定; 微环腔

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)03-0156-08

Study on locking state of Kerr microcomb with self-injection locking

TIAN Linlong, HAO Zhibiao*, SUN Changzheng, WANG Lai, LUO Yi

(Beijing National Research Center for Information Science and Technology(BNRist),

Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The current research on self-injection-locking frequency comb theory is incomplete in exploring the influence of different parameters on self-starting effect. The results of the operating-point locking theory used to explain the locking mechanism and numerical simulation are quite different and cannot explain some experimental phenomena well. Based on the Lugiato-Lefever Equation (LLE) taking into consideration of the backscattering effect, a self-starting Kerr microcomb model is constructed. The influence of key parameters in the model on the self-started locking state of the frequency comb are discussed by using the numerical simulation based on split-step Fourier method and combining the physical connotations of the parameters. Then from the basic formula of the model, the operating-point locking theory is modified to overcome the inadequacies of the self-injection locking micro-comb theory. It is demonstrated that the modified theory can improve the accuracy of the prediction of the locking state in the self-starting numerical simulation, as well as the compatibility between the theoretical prediction and the numerical simulation or experimental results.

Key words: Kerr microcomb; self-starting; self-inject locking; micro-ring cavity

0 引言

光频梳在光通信、光学传感、光学计量等领

域具有广泛的应用前景, 但实际应用中往往受到器件功耗与体积的约束。近年来, 随着集成制造技术的迅速发展, 基于克尔效应的微腔光频梳因

收稿日期: 2022-12-12; 修回日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(62235005)

引用格式: 田林龙, 郝智彪, 孙长征, 等. 自注入锁定微腔克尔频梳的锁定态研究[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 156-163.

Citation: TIAN L L, HAO Z B, SUN C Z, et al. Study on locking state of Kerr microcomb with self-injection locking[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3):156-163.



功耗低、体积小等优势受到广泛关注。基于 Si_3N_4 [1-5], GaN [6], AlN [7], LiNbO_3 [8], SiC [9-11], AlGaAs [12-13] 等材料平台的微腔频梳已被广泛研究。

目前,连续光泵浦的孤子态微腔克尔频梳的产生方式主要有泵浦光频率调谐 [5]、微环腔热调谐 [14]、辅助光热补偿 [15] 等。但受微环腔的热效应、品质因子、泵浦功率阈值等方面的限制,上述方法需要复杂的外部控制机制来进行启动与控制,并且难以较长时间维持稳定的孤子态频梳,为微腔频梳的集成化与实用化带来了很大困难。2019年, Lipson 等人 [16] 将微环谐振腔与反射式半导体光放大器 (RSOA) 集成,借助片上调谐结构实现了电池驱动的微腔频梳全片上集成。

自注入锁定原理为微腔频梳的全片上集成提供了一种新的思路。2020年,杨启帆等人 [4] 基于自注入锁定原理,提出“启钥孤子”的频梳生成方法。该方法借助分布反馈 (DFB) 半导体激光器与微环腔之间的光场相互作用以及微环腔中的非线性效应,在适当的启动条件下,微环腔中光场将会在 DFB 激光器开启一段时间后自发形成亮孤子态并在数小时内自发维持。2021年,基于自注入锁定原理的暗孤子自发产生现象也被报道 [1-2], 该方法降低了对微环腔波导色散的要求,对于微腔暗孤子频梳的实际应用具有重要意义。然而,在已报道的对自注入锁定微腔克尔频梳自启动现象的研究中,用于预测锁定态的均匀解工作点理论与数值仿真得到的锁定结果有较为明显的偏差,

相关问题将在 2.1 节进行讨论。模型参数对于锁定态的影响机制也不够清晰,原有工作点理论无法很好解释数值仿真中冷腔失谐与锁定带宽系数对于锁定态的影响,也无法与已有文献中失谐扫描导致孤子态变化的实验现象相匹配 [4]。

首先从数值仿真出发,分析了模型中冷腔激光器失谐值、相位参数以及锁定带宽系数等关键参数对于亮孤子自启动演化结果的影响。进一步从模型的基本公式出发,构建出改进的工作点理论,旨在对数值仿真与实验中的锁定现象进行更加准确的预测与解释,为实验系统设计与测试提供理论参考。

1 自注入锁定模型及关键参数

1.1 自注入锁定 LLE 模型

LLE (Lugiato-Lefever Equation) 是一种被广泛采用的微腔克尔频梳产生过程的仿真模型。面向自注入锁定过程,构建 LLE 模型的关键在于对微环腔内的正向传输光场、背向散射光场以及泵浦激光器腔内光场建立动力学方程。一方面,在 DFB 激光器泵浦作用下,微环腔内基于瑞利散射产生的反向传输光将会给予 DFB 激光器一定反馈 [17], 进而对激光器泵浦波长进行调控;另一方面,在微环腔内非线性效应以及色散效应的综合作用下,微环腔内正向传输光场将形成孤子态。自注入锁定效应下的归一化 LLE 模型可以表述为 [4]

$$\frac{\partial \rho_F}{\partial \tau} = -(1 + i\alpha)\rho_F + id_2 \frac{\partial^2 \rho_F}{\partial \theta^2} + i \left(2|\overline{\rho_B}|^2 + |\rho_F|^2 \right) \rho_F + i\beta^* \overline{\rho_B} + F \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial \tau} = -(1 + i\alpha)\rho_B + id_2 \frac{\partial^2 \rho_B}{\partial \theta^2} + i \left(2|\overline{\rho_F}|^2 + |\rho_B|^2 \right) \rho_B + i\beta \overline{\rho_F} \quad (2)$$

$$\frac{d\phi_L}{d\tau} = \alpha_L - \alpha + \alpha_g \Gamma + K \text{Im} \left[e^{i\phi} \frac{\overline{\rho_B}}{i\beta F} \right] \quad (3)$$

式中: ρ_F 为微环腔内正向传输光场慢变场包络 A_F 相对于泵浦阈值 $\sqrt{E_{th}} = \sqrt{\kappa/(2g)}$ 的归一化的结果, $\rho_F = A_F \sqrt{2g/\kappa}$, 其中, g 为非线性耦合系数, κ 为微环腔内模式传输损耗 (量纲 s^{-1}); ρ_B 为微环腔内背向传输光场慢变场包络 A_B 相对于泵浦阈值的归一化的结果, $\rho_B = A_B \sqrt{2g/\kappa}$; β 为相对于 $\kappa/2$ 归一化的背散射耦合系数; α_L , α 分别为相对于 $\kappa/2$ 归一化的微环冷腔谐振频率 ω_c 与自由运行状态激光器工作频率 ω_L 以及注入锁定状态激光器工作频率

ω_0 的失谐量, $\alpha_L = 2(\omega_c - \omega_L)/\kappa$, $\alpha = 2(\omega_c - \omega_0)/\kappa$; d_2 为对二阶色散系数 D_2 的归一化量, $d_2 = D_2/\kappa$; θ 为微环腔的方位角; τ 为相对于 $\kappa/2$ 归一化的时间变量, $\tau = \kappa t/2$; F 为归一化泵浦系数, $F = -2\sqrt{T\eta\Lambda} e^{i\phi_B} \rho_L$, 其中, T 为激光器与微环腔芯片的端面耦合透射率, η , Λ 分别为归一化的激光器输出耦合系数及微环腔耦合系数, $\eta = \kappa_1/\kappa$, $\Lambda = \kappa_2/\kappa$, ϕ_B 为激光器与微环腔芯片之间光传输产生的相位延迟, ρ_L 为泵浦源激光腔内光场慢变场包络 A_L 相对于泵浦阈值归一化的结果, $\rho_L = A_L \sqrt{2g/\kappa}$; K

为锁定带宽系数； α_g 为激光器的线宽展宽因子； ϕ 为相位参数。

锁定带宽系数 K 与相位参数 ϕ 的公式为

$$K = 4T\eta\Lambda|\beta|\sqrt{1+\alpha_g^2} \quad (4)$$

$$\phi = 2\phi_B + \text{Arg}[\beta] - \arctan(\alpha) + \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

基于式(1)~(3)，使用分步傅里叶算法进行数值仿真，在合适的参数条件下，可以观察到DFB激光器启动之后，腔内光场自发演化为孤子态频梳，单孤子态演化结果如图1所示。

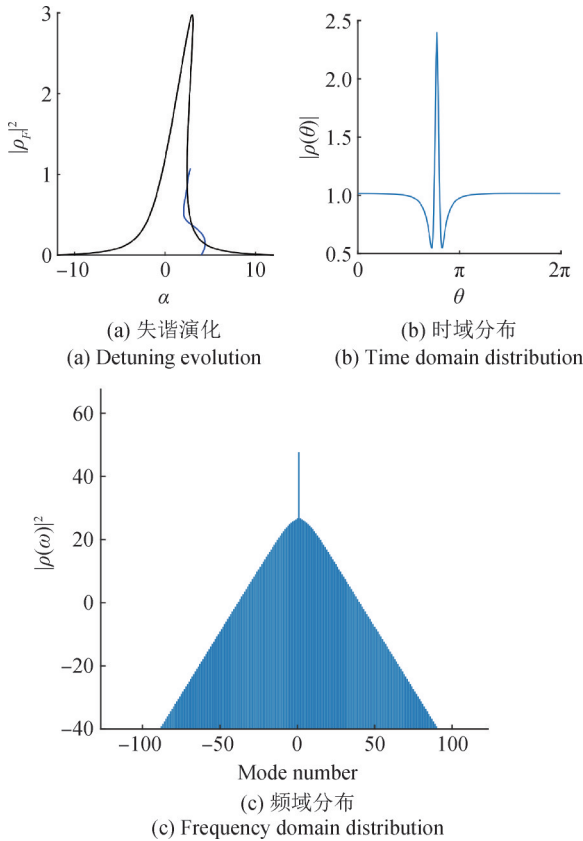


图1 单孤子态演化结果

Fig.1 Evolutionary results of single soliton

图1(a)中，蓝色曲线为演化过程中泵浦光失谐值 α 与腔内正向传输光功率 $|\rho_F|^2$ 的变化关系，黑色曲线为式(1)在无背散射情况下得到的均匀解中 α 与 $|\rho_F|^2$ 的关系。可以发现，蓝色演化曲线最终稳定于一个固定的位置，此时泵浦光处于红失谐状态($\alpha > 0$)。图1(b)和(c)分别展示了在最终稳定位置时，腔内正向传输光包络场的时域与频域分布特性。可以发现，微环腔内光包络场最终收敛于稳定的单孤子态。

1.2 自注入锁定模型参数对结果的影响

在公式(1)~(3)中，冷腔激光器失谐值 α_L 、相位参数 ϕ 以及锁定带宽系数 K 是自注入锁定模型中的重要参数，探究这些参数对启动结果的影响，对于后续自注入锁定频梳实验系统的设计与测试具有十分重要的意义。

1.2.1 冷腔激光失谐

在自由运行状态下(即不考虑自注入锁定效应的影响时)，DFB激光器的工作波长由其结构参数、注入电流以及工作温度等因素决定。考虑自注入锁定效应影响的情况下，泵浦光失谐值会相对于自由运行状态下的失谐值(冷腔激光器失谐值 α_L)发生改变，并在内部反馈机制的作用下最终锁定于特定值。图2展示了在归一化冷腔失谐值

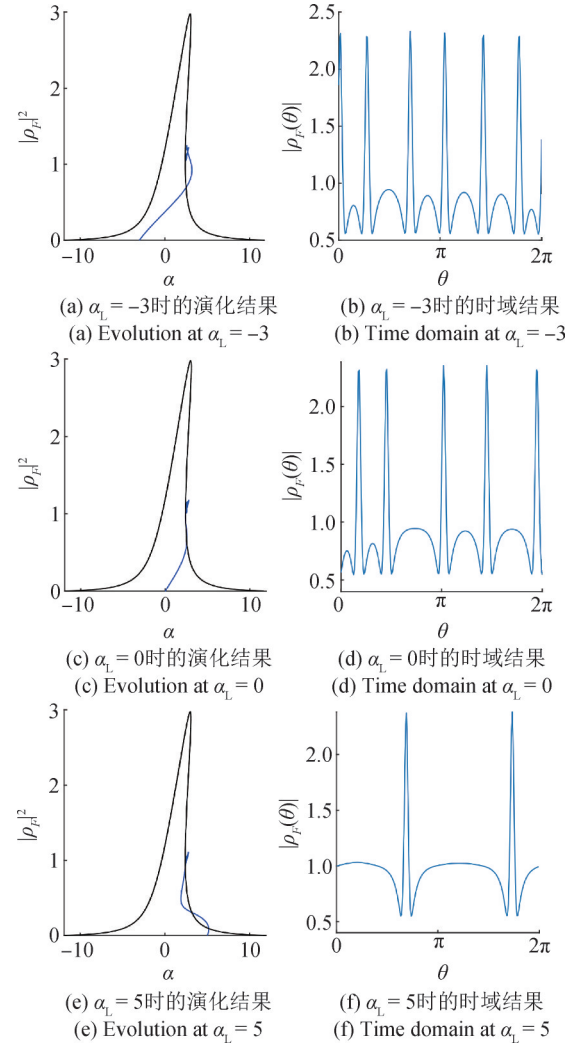


图2 不同冷腔激光失谐值 α_L 下的数值仿真演化结果与时域结果

Fig.2 Numerical simulation evolution results and time domain results under different cold cavity laser detuning value α_L

初始值分别设定为 $\alpha_L = -3, 0, 5$ 时的自启动演化结果与时域结果, 其他参数设定为: $K = 40, \phi = 0.3\pi, d_2 = 0.01, |F|^2 = 3, |\beta| = 0.5$ 。

从仿真结果可以发现, 冷腔失谐值从蓝失谐($\alpha_L < 0$)向红失谐逐渐($\alpha_L > 0$)变化时, 自启动产生的孤子数逐步减少。实际上, 腔内正向传输场的总功率 $|\rho_F|^2$ 也会呈现阶梯式降低。在 α_L 超出一定范围后, 自启动产生频梳的现象将不再发生。

1.2.2 相位参数

相位参数 ϕ 由式(5)给出, 对于给定的激光器与微环腔, 传输相位延迟 ϕ_B 是相对容易调节的参数。图3展示了 ϕ 取 $0, 0.2\pi, 0.3\pi$ 三种取值下的自启动过程与结果, 其他参数设定为: $K = 40, \alpha_L = 4, d_2 = 0.01, |F|^2 = 3, |\beta| = 0.5$ 。可以发现, 在一定范围内, 随着 ϕ 增大, 自启动产生的孤

子数目逐渐减少, 当 ϕ 超出一定范围后, 自启动现象将不再发生, 泵浦光失谐值将会锁定在不产生孤子的区域。

1.2.3 锁定带宽系数

上文分别讨论了冷腔激光失谐值 α_L 与反馈相位参数 ϕ 对自启动过程的影响, 通过绘制二者联合变化时演化最终态的梳齿功率分布图如图4所示, 可以观察到二者共同变化对自启动演化结果的影响。

图4(a)展示了在锁定带宽系数 $K = 10$ 时, 腔内光场的梳齿功率分布特性, 其他参数设定为: $d_2 = 0.01, |F|^2 = 3, |\beta| = 0.5$ 。可以发现, 自启动产生频梳对不同的 ϕ , 所对应的 α_L 范围也有所不同。当 ϕ 设定在特定范围内时, 如图4(a)中 $\phi = 0.6\pi \sim 1.1\pi$, 无论冷腔失谐 α_L 如何设置, 锁定时

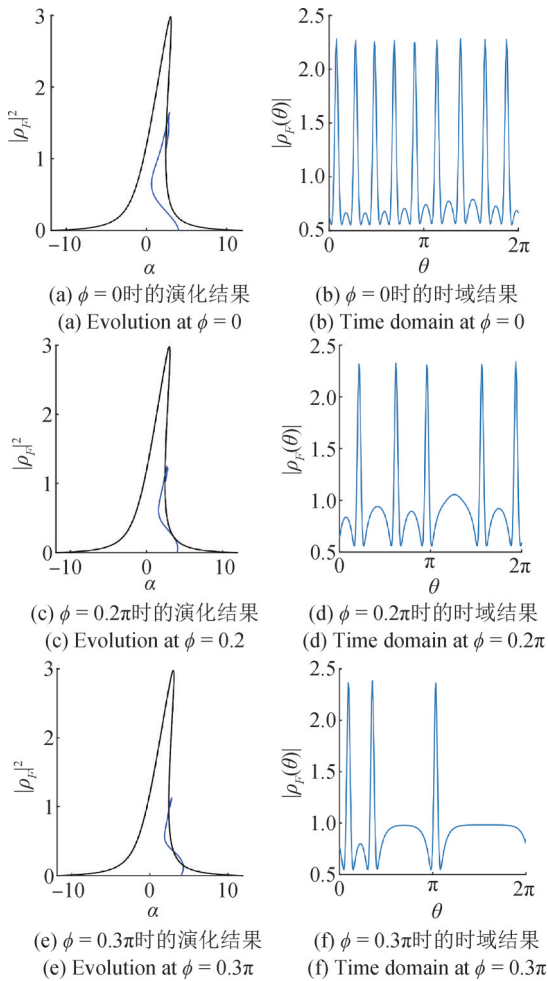


图3 不同相位参数 ϕ 下的数值仿真演化结果与时域结果

Fig.3 Numerical simulation evolution results and time domain results under different phase parameter ϕ

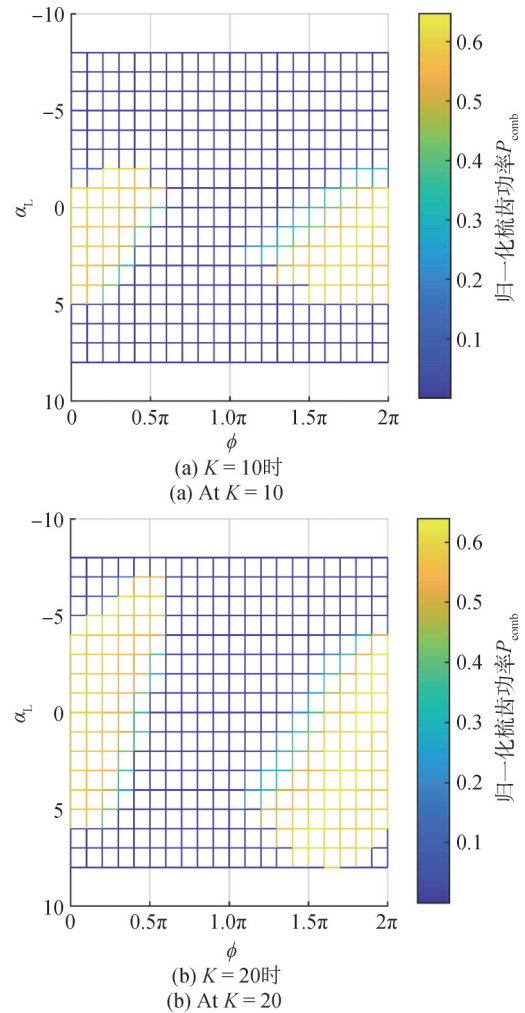


图4 $\alpha_L - \phi$ 相图

Fig.4 Phase diagram of $\alpha_L - \phi$

的梳齿功率都为0,不会产生频梳。同时, K 对于自启动也有一定影响,图4(b)展示了锁定带宽系数增大至 $K=20$ 后得到的梳齿功率分布图。可以发现, K 的增大明显扩大了自启动产生频梳的 α_L 范围,但是对于自启动产生频梳对应 ϕ 范围的影响并不明显。

2 自注入锁定模型的均匀解工作点理论

上述分析中的数值方法并不能对自启动锁定位置与状态发生变化的原因与规律进行解释,在此,对工件点理论进行改进,对相关问题进行说明。

2.1 工件点理论的基本关系推导

首先,考虑稳定状态下式(1)的均匀解,即 $\partial^2 \rho_F / \partial \theta^2 = 0$, 与此前文献 [4] 分析不同,此处将背散射效应以及背散射光带来的交叉相位调制的影响考虑进来,结果表示为

$$F = \left[1 + i \left(\alpha - |\rho_F|^2 - 2|\rho_B|^2 \right) \right] \rho_F - i\beta^* \rho_B \quad (6)$$

对于描述背散射光场特性的式(2),稳态均匀解可以表示为

$$\rho_B = \frac{i\beta\rho_F}{1 + i \left(\alpha - 2|\rho_F|^2 - |\rho_B|^2 \right)} \quad (7)$$

需要注意的是,在均匀解的情况下,微环腔内场分布将与其平均场分布等效。将式(6)式(7)代入式(3),可以得到

$$\frac{d\phi_L}{d\tau} = \alpha_L - \alpha + \alpha_g \Gamma + K\chi(|\rho_F|^2, |\rho_B|^2, \alpha, \phi) \quad (8)$$

式中:

$$\chi(|\rho_F|^2, |\rho_B|^2, \alpha, \phi) = \frac{[1 + |\beta|^2 - P_1 P_2] \sin \phi - P_3 \cos \phi}{|1 + |\beta|^2 - P_1 P_2 + iP_3|^2},$$

其中, $P_1 = \alpha - |\rho_F|^2 - 2|\rho_B|^2$, $P_2 = \alpha - 2|\rho_F|^2 - |\rho_B|^2$, $P_3 = 2\alpha - 3|\rho_F|^2 - 3|\rho_B|^2$ 。

当模型处于稳态时,应当有 $d\phi_L/d\tau = 0$, 根据式(8)可以得到泵浦光失谐值 α 与正向传输光场功率 $|\rho_F|^2$ 、背向散射光功率 $|\rho_B|^2$ 、相位参数 ϕ 之间的关系式为

$$\alpha = \alpha_L + \alpha_g \Gamma + K\chi(|\rho_F|^2, |\rho_B|^2, \alpha, \phi) \quad (9)$$

根据式(7)可以得到

$$|\rho_B|^6 + 2(2|\rho_F|^2 - \alpha)|\rho_B|^4 + \left[1 + (2|\rho_F|^2 - \alpha)^2 \right] |\rho_B|^2 - |\beta|^2 |\rho_F|^2 = 0 \quad (10)$$

结合式(9)和式(10),理论上可以得到在稳态下,失谐值 α 与腔内正向传输光功率 $|\rho_F|^2$ 、相位参数 ϕ 、冷腔失谐值 α_L 以及背散射系数 $|\beta|$ 之间应当满足的关系式为

$$G_1(|\rho_F|^2, \alpha, \alpha_L, \phi, |\beta|, K) = 0 \quad (11)$$

结合式(6)和式(7),理论上可以得到在稳态下,失谐值 α 与腔内正向传输光功率 $|\rho_F|^2$ 、背散射系数 $|\beta|$ 以及泵浦光功率 $|F|^2$ 之间应当满足的关系式为

$$G_2(|\rho_F|^2, \alpha, |F|^2, |\beta|) = 0 \quad (12)$$

此处 G_1 与 G_2 的命名仅为为了便于后续说明,不具有显式表达式。二者本质是将式(9)式(10)与式(6)式(7)各自联立求解的结果。以下为了方便陈述,将两组方程的解分别称为“锁定约束”与“谐振约束”。

自注入锁定模型的均匀解应当同时满足上述两组约束条件。通过绘制两组约束条件的图像,寻找交叉点,就可以确定自注入锁定方程组均匀解锁定的位置,即为工件点。

已有文献中工件点理论用两个等式描述为^[4]

$$F = \left[1 + i \left(\alpha - |\rho_F|^2 \right) \right] \rho_F \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{3}{2} |\rho_F|^2 - \cot \phi + \frac{\sqrt{4 + |\rho_F|^4 \sin^2 \phi}}{2 \sin \phi} \quad (14)$$

原文献内的推导过程引入了近似(忽略背散射效应与交叉相位调制效应)与极端假设($K \rightarrow \infty$),使得预测工件点位置相比数值仿真结果出现较明显偏差。

为了验证改进的工件点理论的合理性,将得到的工件点位置与数值仿真路径进行对照。图5展示了两组约束条件的分布情况以及数值仿真的演化路径, A点为此前理论的工作点预测^[4], B点为本文献的工作点预测。参数选择参考相关文献[4] ($\alpha_L = 5$, $d_2 = 0.015$, $|\beta| = 0.5$, $|F|^2 = 3$), 用以模拟实验中弱背散射 ($|\beta| < 1$)、反常色散 ($d_2 > 0$) 以及泵浦功率为微环泵浦阈值数倍 ($|F|^2 = 3 > 1$)

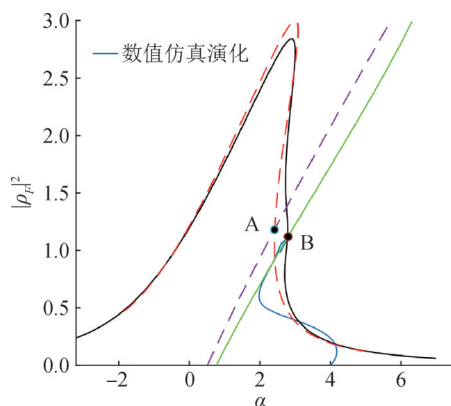


图5 工作点预测与数值仿真结果的对比

Fig.5 Comparison of operating point and numerical simulation results

表1 工作点仿真所用参数表

Tab.1 Parameters used for simulation of operation point in

α_L	ϕ	d_2	$ F ^2$	$ \beta $
4	0.2π	0.01	3	0.5

的环境, ϕ 的选择确保可以自启动产生孤子, 参数整体如表 1 所示。黑色实线代表了修正后谐振约束 $G_2 = 0$ 时失谐值 α 与腔内正向传输光功率的关系; 绿色实线代表了修正后锁定约束 $G_1 = 0$ 的解分布特性; 蓝色曲线为通过分步傅里叶法对模型进行数值仿真的演化过程。可以发现, 两组约束条件交叉于点 B, 坐标约为 (2.78, 1.11), 恰好位于演化路径的均匀解锁定附近, 坐标约为 (2.78, 1.11)。点 A 是基于已有文献的工作点理论^[4] (基于式 (13), (14)) 对于工作点位置的预测, 坐标约为 (2.42, 1.19)。可以发现, 对于工作点的预测与数值演化结果更加吻合。

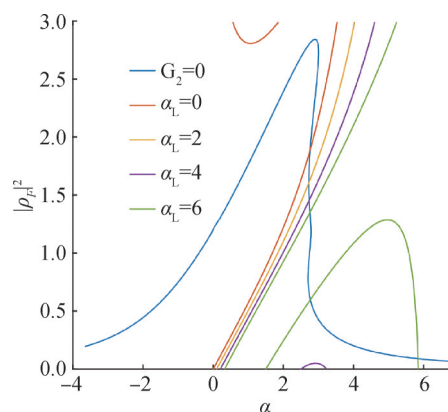
同时也需要注意, 仿真在到达均匀解锁定附近后, 由于微环腔内非线性效应的作用, 频梳逐步建立起来, 此时, 工作点理论的均匀解前提将不再成立, 最终的锁定位置不再完全满足均匀解工作点理论。但是, 均匀解的工作点位置与最终锁定位置的位置仍然具有一定关联性, 一般来说, 最终锁定位置的位置会位于均匀解工作点附近。均匀解工作点所对应的腔内功率更低, 其最终锁定产生的孤子态也会倾向于演化到更低功率位置, 对应锁定态中更少的孤子数目。

2.2 模型参数对工作点的影响

模型中各参数会影响均匀解工作点位置, 这对理解模型中孤子态的调控机理有重要意义。观察式 (13), (14) 发现, 已有文献工作点理论有助于分析相位参数 ϕ 对于工作点的影响^[4], 但无法解释冷腔失谐值 α_L 与锁定带宽系数 K 的作用。以下基于改进的工作点理论, 分别讨论 α_L , ϕ 以及 K 三者对工作点位置的影响。

2.2.1 激光器冷腔失谐

图 6 展示了在归一化冷腔失谐值 $\alpha_L = 0, 2, 4, 6$ 时, 两组约束条件的分布情况, 其他参数设定为: $K = 15$, $\phi = 0$, $d_2 = 0.01$, $|F|^2 = 3$, $|\beta| = 0.5$ 。图 6 中蓝色曲线为谐振约束 $G_2 = 0$ 所代表的 $\alpha - |\rho_F|^2$ 图像, 其余曲线为在不同冷腔失谐值 α_L 设定下, 锁定约束 $G_1 = 0$ 的 $\alpha - |\rho_F|^2$ 图像。随着 α_L 在一定范围内增大, 均匀解工作点对应的腔内正向传输光场的功率 $|\rho_F|^2$ 会逐渐减小。这一现象与图 2 观察到的孤子态转变规律相对应, 即冷腔失谐值在一定范围内增大, 最终锁定位置的孤子数目也逐渐减少, 意味着其腔内功率在逐步降低。

图6 不同 α_L 设置下的工作点位置对比Fig.6 Comparison between operating point prediction different α_L

当 α_L 值逐渐增大偏离谐振频率时, 锁定约束 $G_1 = 0$ 将与谐振约束 $G_2 = 0$ 在红失谐的低功率区域形成交叉, 这不利于孤子锁定的发生。

2.2.2 相位参数

图 7 展示了不同的相位参数 ϕ 条件下的工作点分布情况, 其他参数设定为: $K = 15$, $\alpha_L = 4$, $d_2 = 0.01$, $|F|^2 = 3$, $|\beta| = 0.5$ 。图 7 中蓝色曲线

为谐振约束 $G_2 = 0$ 所代表的 $\alpha - |\rho_F|^2$ 图像, 其余曲线为在不同 ϕ 设定下, 锁定约束 $G_1 = 0$ 的 $\alpha - |\rho_F|^2$ 图像。可以发现, ϕ 的变化也会对均匀解工作点的位置产生影响。一定范围内, ϕ 的增大会导致均匀解工作点的正向传输场腔内功率 $|\rho_F|^2$ 降低, 与图3观察到的孤子数目减少的数值仿真现象相对应。

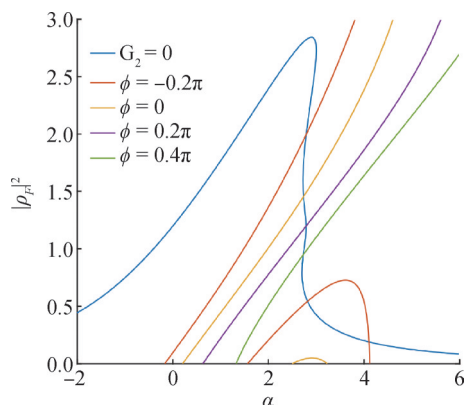


图7 不同相位参数 ϕ 下的工作点对比

Fig.7 Comparison of operating points for different phase parameter ϕ

2.2.3 锁定带宽系数

锁定带宽系数 K 不仅影响工作点位置, 也影响多工作点情况下的实际锁定位置。通常情况下, K 越大, 对于泵浦光失谐值的调控能力就越强。在某些参数条件下, 锁定约束条件 G_1 与谐振约束条件会有多个交叉点。图8(a)展示了 $K = 30$ 时, 工作点分布以及数值仿真的演化结果, 其他参数设定为: $\alpha_L = 6, d_2 = 0.01, |F|^2 = 3, |\beta| = 0.5, \phi = 0$ 。除了通常意义上的工作点 A, 还会出现额外的两个交叉点 B 和 C。根据稳定性判断, B 点为不稳定解, 故在仿真中不会收敛至 B, A 点与 C 点则是局部稳定解。此时, K 值的选取会对均匀解最终的锁定位置产生重要影响。根据式(8), K 值越大, 对于泵浦失谐的调节能力越强, 在数值仿真中, 演化路径越容易在腔内功率较低时摆脱局部稳定工作点 C 的约束, 进而到达预想的工作点 A 附近并形成孤子态。作为对比, 图8(b)展示了将 K 降低为 15 时的工作点分布情况与演化结果。此时, A, B, C 三个工作点的稳定特性不变, 但 K 值由于不足以再将失谐值牵引到工作点 A, 最终锁定到了低功率工作点 C 位置, 腔内没有频梳产生。这与相关实验中需

要将激光器冷腔失谐值设定在微环腔谐振频率附近的要求相符^[1-2,4]。改进工作点理论对于锁定带宽系数的认识表明出现期望位置的工作点不是自启动产生孤子的充分条件, 对于自启动成功率分析有一定参考价值。

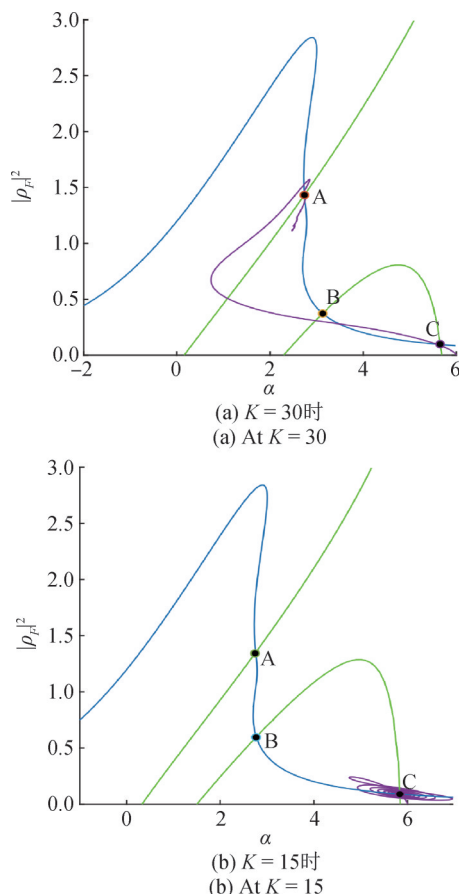


图8 锁定带宽系数 K 不同时的仿真演化情况

Fig.8 simulation evolution with different locking bandwidth coefficient K

3 结论

针对现有自注入锁定微腔频梳锁定理论的不足, 通过修正包含微腔背散射效应的 LLE 方程构建自启动克尔微梳模型, 发展了改进的自注入锁定微腔频梳均匀解工作点理论, 并利用数值仿真研究了冷腔激光器失谐值、相位参数、锁定带宽系数三个关键参数对于自启动锁定态的影响规律。

改进的工作点理论解决了原有工作点理论锁定位置预测值与数值仿真结果差异较大的问题, 提高了理论的准确性。同时, 改进的工作点理论将更多模型参数的影响纳入考虑, 可以更好地阐

释冷腔激光器失谐值以及锁定带宽系数等参数对于模型锁定态调控的意义。

参考文献

- [1] LIHACHEV G, WENG W, LIU J, et al. Platicon micro-comb generation using laser self-injection locking[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1771.
- [2] JIN W, YANG Q F, CHANG L, et al. Hertz-linewidth semiconductor lasers using CMOS-ready ultra-high-Q microresonators[J]. Nature Photonics, 2021, 15(5): 346 – 353.
- [3] LIU J, LUCAS E, RAJA A S, et al. Photonic microwave generation in the X- and K-band using integrated soliton microcombs [J]. Nature Photonics, 2020, 14 (8) : 486 – 491.
- [4] SHEN B, CHANG L, LIU J, et al. Integrated turnkey soliton microcombs[J]. Nature, 2020, 582(7812): 365–369.
- [5] HERR T, BRASCH V, JOST J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators[J]. Nature Photonics, 2014, 8 (2): 145 – 152.
- [6] ZHENG Y Z, SUN C Z, XIONG B, et al. Integrated gallium nitride nonlinear photonics [J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(1).
- [7] LIU X, SUN C Z, XIONG B, et al. Integrated high Q crystalline ALN microresonators for broadband Kerr and raman frequency combs [J]. ACS Photonics, 2018, 5 (5): 1943 – 1950.
- [8] HE Y, YANG Q F, LING J, et al. Self-starting bi-chromatic LiNbO₃ soliton microcomb[J]. Optica, 2019, 6(9).
- [9] CAI L T, LI J W, WANG R X, et al. Octave-spanning microcomb generation in 4H-silicon-carbide-on-insulator photonics platform[J]. Photonics Research, 2022, 10(4) : 870 – 876.
- [10] WANG C L, FANG Z W, YI A L, et al. High- Q microresonators on 4H-silicon-carbide-on-insulator platform for nonlinear photonics [J]. Light: Science & Applications, 2021, 8: 1474–1484.
- [11] ZHENG Y, PU M H, YI A L, et al. 4H-SiC microring resonators for nonlinear integrated photonics [J]. Optics Letters, 2019, 44(23): 5784 – 5787.
- [12] SHU H W, CHANG L, TAO Y S, et al. Microcomb-driven silicon photonic systems [J]. Nature, 2022, 605 (7910) : 457 – 463.
- [13] CHANG L, XIE W, SHU H, et al. Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1331.
- [14] XUE X, XUAN Y, WANG C, et al. Thermal tuning of Kerr frequency combs in silicon nitride microring resonators[J]. Optics Express, 2016, 24(1): 687.
- [15] ZHOU H, GENG Y, CUI W, et al. Soliton bursts and deterministic dissipative Kerr soliton generation in auxiliary-assisted microcavities[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 50.
- [16] STERN B, JI X, OKAWACHI Y, et al. Battery-operated integrated frequency comb generator[J]. Nature, 2018, 562(7727): 401 – 405.
- [17] GORODETSKY M L, PRYAMIKOV A D, ILCHENKO V S. Rayleigh scattering in high Q microspheres[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2000, 17(6): 1051.

(本文编辑: 田艳玲)



第一作者: 田林龙 (1999—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微腔克尔频梳。



通讯作者: 郝智彪 (1974—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为半导体材料与光电子器件。