

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.03.03

提高微腔孤子光频梳泵浦能量转换效率技术研究进展

陈少武^{1,2}, 陈凯荣¹, 李维^{3*}, 冯梁森³, 李昱东³, 武腾飞³

(1.中国科学院半导体研究所, 北京 100083; 2.中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100083;

3.航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘要: 分析了孤子微梳泵浦能量转换效率低的原因, 介绍了目前已提出的几种提高孤子微梳泵浦光能量转换效率的技术方案, 包括激发孤子晶体光梳利用多孤子结构、正常-反常色散双腔耦合泵浦光循环存储结构、微腔-光纤/波导环泵浦光反馈耦合干涉结构、主-副微环腔耦合超模谐振峰劈裂结构等, 并分析了这些方案的优缺点。在此基础上, 给出了本课题组对反馈耦合腔的优化设计, 仿真模拟结果显示, 单孤子微梳的泵浦光转换效率可超过 25%。最后, 对孤子微梳的低能耗产生方案作出总结和展望, 为微腔孤子光频梳泵浦能量转换效率提高技术的发展与应用提供理论参考。

关键词: 微腔光频梳; 时域腔孤子; 能量转换效率; 耦合腔; 光反馈; 泵浦光失谐量

中图分类号: TB9; N93

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2024) 03-0039-18

Research progress on technology for improving pump energy conversion efficiency of microcavity soliton optical frequency combs

CHEN Shaowu^{1,2}, CHEN Kairong¹, LI Wei³, FENG Liangsen³, LI Yudong³, WU Tengfei³

(1.Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2.College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 3.National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In this paper, the reasons for low energy conversion efficiency of soliton microcomb pump are analyzed, and several proposed technical schemes to improve the pump light energy conversion efficiency of soliton microcombs are introduced, including pump energy circulation storage structure of normal-anomalous dispersion double-cavity coupled structure, super-mode resonance splitting structure of master-auxiliary microring coupled-cavity structure, pump feedback waveguide coupled microcavity interference structure, etc. The advantages and disadvantages of each scheme are analyzed. On this basis, the optimal design of the pump feedback waveguide coupling cavity is given, and the simulation result shows that the pump light conversion efficiency of the single soliton micro comb can exceed 25%. At the end of this paper, the low energy consumption generation schemes of soliton microcombs are summarized and prospected, providing theoretical references for the development and application of techniques to improve the pump energy conversion effi-

收稿日期: 2024-05-08; 修回日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(62175229); 航空科学基金项目(ASFC-20230022036001); 科技创新 2030—“量子通信与量子计算机”重大项目(2023ZD0300804)

引用格式: 陈少武, 陈凯荣, 李维, 等. 提高微腔孤子光频梳泵浦能量转换效率技术研究进展[J]. 计测技术, 2024, 44(3): 39-56.

Citation: CHEN S W, CHEN K R, LI W, et al. Research progress on technology for improving pump energy conversion efficiency of microcavity soliton optical frequency combs [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(3): 39-56.



ciency of microcavity soliton optical frequency combs.

Key words: micro comb; time-domain cavity soliton; energy conversion efficiency; coupling cavity; optical feedback; detuning of pump light

0 引言

微腔克尔光频梳(简称微腔光梳)是连续光泵浦高品质因子(Q 值)微腔通过三阶非线性效应产生的频域上为等间距的梳状光谱。当腔内达到增益与损耗、色散与非线性的双平衡态时,时域上将形成孤子锁模脉冲,即孤子态微腔光梳^[1](简称孤子微梳)。传统光频梳是通过锁模激光器产生的^[2],与之相比,孤子微梳具有尺寸小、易加工(与互补金属氧化物半导体技术(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)兼容)、低能耗、高重频等特点,因此更具应用潜力与商用潜能。如图1所示,微腔光梳已经被应用于通信、微波生成、激光雷达、光谱学、光计算、光钟、光学频率合成、光学频率分频与量子光源等领域^[3-11]。

产生孤子的微腔结构主要有回音壁模式微腔(例如微球^[13]、微盘^[14]、微环芯^[15]等)和片上集成微环^[16]等,他们都是基于非线性光学过程中的四波混频效应来产生频梳,但两者之间又存在一些差异,主要有①微球等回音壁模光频梳是基于三维介质几何结构中的回音壁光波共振模式而形成的,其模式间的自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)较小,对应光频梳的梳齿间隔(重频)较小;而片上微环腔光频梳是基于二维平面集成化的环形腔波导结构中的各阶纵模形成的,因为微环的半径可以做得很小,所以其模式间的FSR较大,对应光频梳的梳齿间隔(重频)也较大;②微球等回音壁模式光频梳需要使用双锥形光纤或棱镜来与外部泵浦光源和探测器耦合连接,而片上微环腔光频梳可以通过芯片上的总线(Bus)波导和模斑

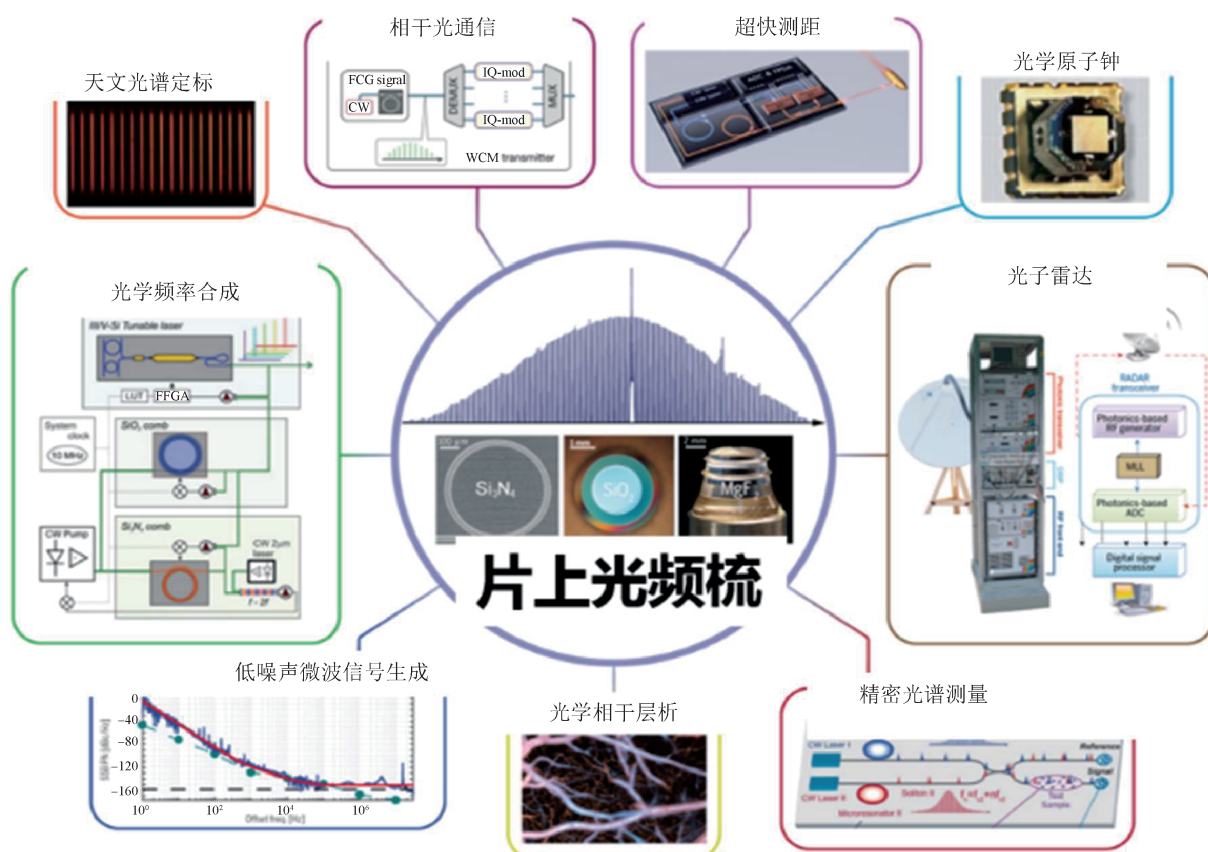


图1 微腔光梳的各种应用^[12]

Fig.1 Applications of microcomb^[12]

变换器与泵浦光源和探测器集成在同一芯片上,整体结构上更加紧凑、稳固;③微球等回音壁模式腔的品质因子一般都很高(一般都在 $10^8 \sim 10^9$ 量级),而片上集成的微环腔品质因子相对较低(一般在 $10^5 \sim 10^7$ 量级),因此回音壁微腔中产生光频梳的泵浦阈值一般较低。总之,微球腔等回音壁模式光频梳更适用于实验室探索研究,而微环腔光频梳可以实现片上功能集成化和大规模制备,其优点在于紧凑性、便携性和稳固度。未来的发展方向是保持片上集成化优势的同时,进一步提高微环腔光频梳在泵浦阈值、能量转换效率以及光梳带宽、光谱平坦度等方面的性能^[17]。

孤子微梳主要使用扫频法激发产生^[18],并通过“功率踢(power kicking)”^[19]、辅助光热补偿^[20]等方法克服微腔的热效应,使孤子调控难度大大降低。当前关于孤子微梳调控方法的研究热点方向是自注入锁定法^[21],该方法与扫频法相比,系统结构简单且调制步骤少,实验时只需调整激光二极管的注入电流,但该方法对系统器件要求极高,需要超高 Q 值的微腔(Q 值千万级)且需要微腔与激光二极管之间的反馈相位合适,整体的实验难度较高。现阶段辅助光热补偿法是对器件性能要求最少且调制难度最低的调制孤子微梳的方法,同时,该方法产生的孤子具有较高的稳定性,采用全保偏光纤的辅助光热补偿系统已经可以脱离实验室环境,作为稳定孤子源来进行相关的实际应用。但是,无论哪种调制孤子的方法,在调制出孤子后都需要确保微腔芯片的温度具有较高的温度稳定性,因为温度抖动会使微腔光梳的频率发生抖动,从而使其热噪声增大,性能降低^[22]。

目前单孤子微腔光梳的主要挑战包括泵浦光能量转换效率过低(单腔结构的泵浦能量转换效率仅为~1%量级)^[23-24]、光梳梳齿能量较低、吉赫兹级重频光梳带宽较窄等问题。提高孤子微梳特别是单孤子微梳泵浦能量转换效率,进而提高单根梳齿的光强度,在实际应用中有着重要的意义,这主要体现在以下几个方面:①对于需要使用光梳每根梳齿作为独立光载波传输并处理信号的应用,例如多波长大容量波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)光通信和射频光子滤波器

等,每根梳齿的光能量高低直接决定着系统的总体信号转换噪声和插入损耗;②高泵浦光能量转换效率可以避免使用高功率的泵浦激光器和光放大器,有利于机载、星载等对光梳系统的重量和功耗有严格限制的特殊应用降低系统成本、重量。③高泵浦光能量转换效率意味着较低的光梳激发泵浦光阈值强度,而降低激发光梳的泵浦光阈值可以避免光梳芯片因光能量密度过高使得芯片严重发热甚至烧毁的问题,减轻芯片热电制冷器(Thermo Electric Cooler, TEC)控温的压力对于提高光梳系统的稳定性和可靠性非常重要。同时,较高的泵浦光能量转换效率和较低的泵浦光阈值也意味着可以使用较低 Q 值的微腔芯片产生光梳,这有利于降低微腔光梳芯片制备难度、提高产品良率。

通过设计包含高 Q 值微腔的复合腔结构,可以有效的提升孤子微腔光梳的泵浦能量转换效率,同时,设计微腔波导结构来优化微腔的模式色散曲线,可以有效提高微腔光梳的梳齿能量并扩展微腔光梳的谱宽^[25]。本文分析了单孤子微梳泵浦能量转换效率低的原因,介绍了目前已提出的几种提高孤子微梳能量转换效率的技术方案,包括激发孤子晶体光梳利用多孤子结构、正常-反常色散双腔耦合泵浦光循环存储结构、微腔-光纤/波导环泵浦光反馈耦合干涉结构、主-副微环腔耦合超模谐振峰劈裂结构等,并分析了各种方案的优缺点。在此基础上,给出了本课题组对反馈耦合腔的优化设计以及泵浦光转换效率的仿真模拟结果,并对孤子微梳的低能耗产生方案作出总结和展望。

1 微腔光梳的泵浦能量转换效率

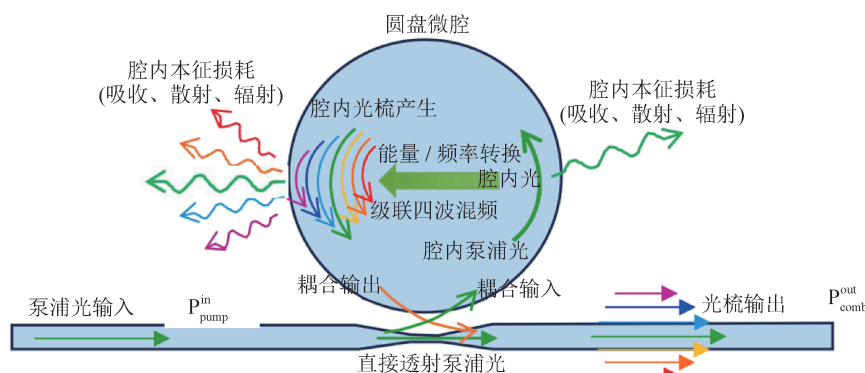
1.1 微腔光梳泵浦能量转换效率的定义

微腔光梳的泵浦能量转换效率是指泵浦光耦合进入微腔后经级联四波混频非线性过程转换为其他频率的边带梳齿光再耦合输出微腔的总能量(不含泵浦模)与腔外输入泵浦光能量的比值,其表达式如式(1)所示。

$$\eta = \frac{P_{\text{comb}}^{\text{out}}}{P_{\text{pump}}^{\text{in}}} \quad (1)$$

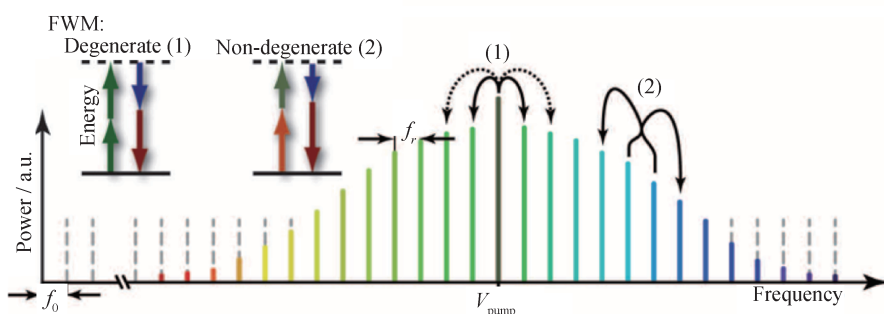
式中： $P_{\text{comb}}^{\text{out}}$ 为转换得到的边带梳齿光再耦合输出微腔的总能量， $P_{\text{pump}}^{\text{in}}$ 为腔外输入波导中的泵浦光能量。泵浦能量转换效率越高，转换出的可供利用的梳齿边带能量就越高，光梳带宽也会越宽。图2以 All-pass 型微盘腔为例来表示泵浦光到微腔的耦

合输入/输出、腔内边带梳齿的产生及耦合输出、以及各种本征损耗(材料吸收、侧壁散射、弯曲辐射损耗等)^[26]。为简单起见，泵浦光在腔内的非线性光学过程只考虑级联四波混频，而忽略受激拉曼散射、倍频等其他非线性效应。



(a) 微腔光梳产生过程中泵浦光/梳齿边带光的耦合输入/输出、能量转换以及各种损耗过程示意图

(a) Schematic diagram of coupled input/output, energy conversion, and various loss processes of pump light/comb edge band light during the generation process of microcavity optical combs



(b) 光梳产生过程中级联四波混频能量转换示意图

(b) Schematic diagram of energy conversion during intermediate four wave mixing in the process of comb generation

图2 微腔光梳的产生及能量转换过程示意图^[27]

Fig.2 Schematic diagram of the generation and energy conversion processes of a microcavity optical frequency comb^[27]

从图2中可以看出，泵浦光耦合进腔内循环传输时，由于非线性级联四波混频过程，泵浦光的一部分被转换为边带梳齿光，同时，由于腔内的本征损耗(材料吸收、侧壁散射、弯曲辐射损耗等)，部分泵浦和边带梳齿光功率会被吸收或散射，另一部分耦合出腔外到输出波导。在腔外波导输出端，残余泵浦光是由腔内耦合出的泵浦光和从耦合区直接透射的泵浦光之间的相干叠加形成的，输出波导中除残余泵浦光外，所有梳齿边带光构成了可用的梳状光谱。显然，为了接近100%的泵浦光转换效率，需要输出波导中由腔内耦合出的泵浦光和从耦合区直接透射的泵浦光之间形成完

全干涉相消的状态，但对于普通的单腔结构，这一条件往往难以满足。

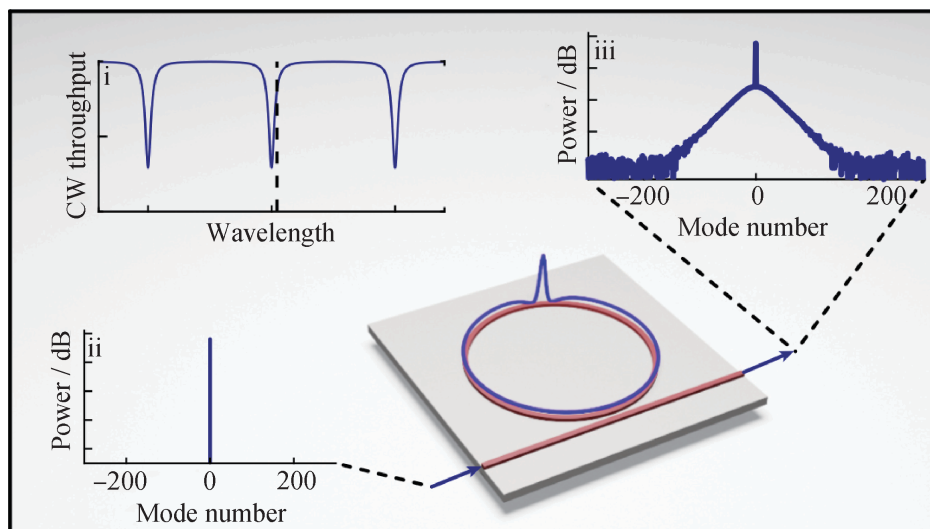
1.2 单孤子微梳泵浦能量转换效率低的原因

一般情况下，单孤子微梳的泵浦能量转换效率很低，仅为~1%量级，这就使得可供利用的梳齿边带光能量较低，边带梳齿数目也较少(对应较窄的光梳总带宽)，而且微腔输出波导中会存在较强的残余泵浦光，不利于光梳光谱包络的平坦化，也不适用于一些对能耗要求敏感的应用(如机载、星载光梳系统)。造成孤子微梳泵浦能量转换效率低下的原因可以从频域和时域两方面解释：①频域上，孤子锁模态光梳的产生要求泵浦光必须相

对于微腔谐振频率处于红移失谐的状态。孤子微梳不同于图灵 Rolls 等其他非线性动力学状态光梳，其泵浦光必须调谐到相对于微腔谐振频率处于红移失谐的频率(波长)处，而谐振器的充分耦合激发需要泵浦光处于微腔的谐振状态，这就意味着在微腔内激发产生孤子微梳时，泵浦光不能充分耦合进微腔，导致大部分泵浦光直接通过耦合区从输出波导损耗掉。②时域上，在微腔内激发出单孤子微梳后，腔内光场在时域上表现为脉宽极窄的单孤子脉冲，其光场在腔内循环传输时与连续波泵浦背景光场相互作用时间非常短暂，即光梳脉冲光场和泵浦连续光场的相互作用交换能量的时间很短，因此连续泵浦光对孤子脉冲“补充

能量”的作用时间很短，导致泵浦光-孤子脉冲能量转换效率较低。

图3是用红移泵浦光在一个微环腔中产生单孤子微梳的示意图。一般来说，用红移泵浦光产生孤子微梳时光梳梳齿数目(光梳带宽)和光梳梳齿总能量随红移失谐量的增大而增大。但在大红移失谐量下泵浦光难以有效耦合进微腔，这一矛盾形成了微腔光梳高效工作所面临的基本限制，即孤子微梳的泵浦光转换效率与所产生的孤子微梳梳齿线条数呈反比关系，这使得必须在孤子微梳的光谱带宽和梳齿能量间作出权衡。显然，这对于既要求宽带宽又要求单根梳齿功率高的应用场景十分不利。



注：图中竖直虚线表示泵浦光波长位置。孤子微梳的腔内光场为“坐落”在连续波泵浦背景光场上的孤子光脉冲，产生并输出微腔的孤子微梳频域上为光谱包络呈双曲正割平方函数的光滑梳状光谱^[16]。

图3 用红移泵浦光在一个微环腔中产生单孤子微梳的示意图

Fig.3 Schematic diagram of generating a single soliton micro comb in a micro ring cavity using red shifted pump light

基于以上分析，提高孤子微梳泵浦能量转换效率可以相应地从4个方面来考虑：

1) 提高泵浦光能量的利用率，避免泵浦光过多过快地从微腔输出波导损耗掉，即通过改进的耦合腔结构或者微腔-光纤/波导环泵浦光反馈耦合结构来实现泵浦光能量的重复循环利用；

2) 解决孤子微梳激发时泵浦光红移失谐量偏大和谐振耦合充分泵入微腔之间的矛盾，例如可以采用耦合腔结构形成模式劈裂的超模，从而使泵浦光波导可以对准模式劈裂的红移分量；

3) 在微腔中激发出孤子晶体光梳。孤子晶体光梳在时域上表现为等间距的多孤子脉冲串，若腔内同时存在数十个孤子光脉冲循环传输，就可以大幅提高连续泵浦光对孤子脉冲“补充能量”的作用时间，从而提高泵浦光能量转换效率；

4) 在正常色散微腔中激发“暗孤子”锁模脉冲光梳，或形成平顶孤子(Platicon)，可以在一定程度上提高泵浦光到微腔光梳的能量转换效率。

此外，用脉冲光泵浦微腔产生光频梳，也可以在一定程度上提高泵浦能量转换效率。下面对

这些方法逐一进行介绍和评述。

2 提高孤子微梳泵浦能量转换效率的方案

2.1 激发孤子晶体光梳利用多孤子结构

多孤子光梳或者孤子晶体光梳由于腔内的时域上存在多个孤子脉冲，其泵浦光转换效率比单孤子微梳高^[28]。微腔孤子晶体光梳是一种特殊的时空有序多孤子相干光梳形态，其是在简并模相互作用而扰动微腔局域色散或者在腔内形成周期性势场的条件下，光场在腔内自组织演化“自发”形成协同有序并集体传输的孤子群^[29]，孤子间的长程相互作用过程使得孤子间在时域上仅存在一些离散的时间间隔。这种特殊的多孤子形态使得

腔内同时存在数个乃至数十个孤子，在保持腔内连续波泵浦背景光场的情况下，每一个光孤子都可以从泵浦背景光场中转换一部分能量，孤子晶体光梳的总梳齿能量正比于腔内孤子晶体的孤子数，因此孤子晶体光梳的泵浦光能量转换效率相比单孤子微梳得到了大幅提升。

LU Z Z等人报道了在微腔中形成孤子晶体光梳后，孤子间的有序时域分布能相干增强孤子晶体光梳的梳齿能量，相比单孤子微梳梳齿能量提高了3个数量级^[30]。图4为该研究组用双波长泵浦光在微腔内形成周期性势场条件下产生可控孤子晶体的实验系统示意图和产生的孤子数为1~32的孤子晶体光梳光谱。

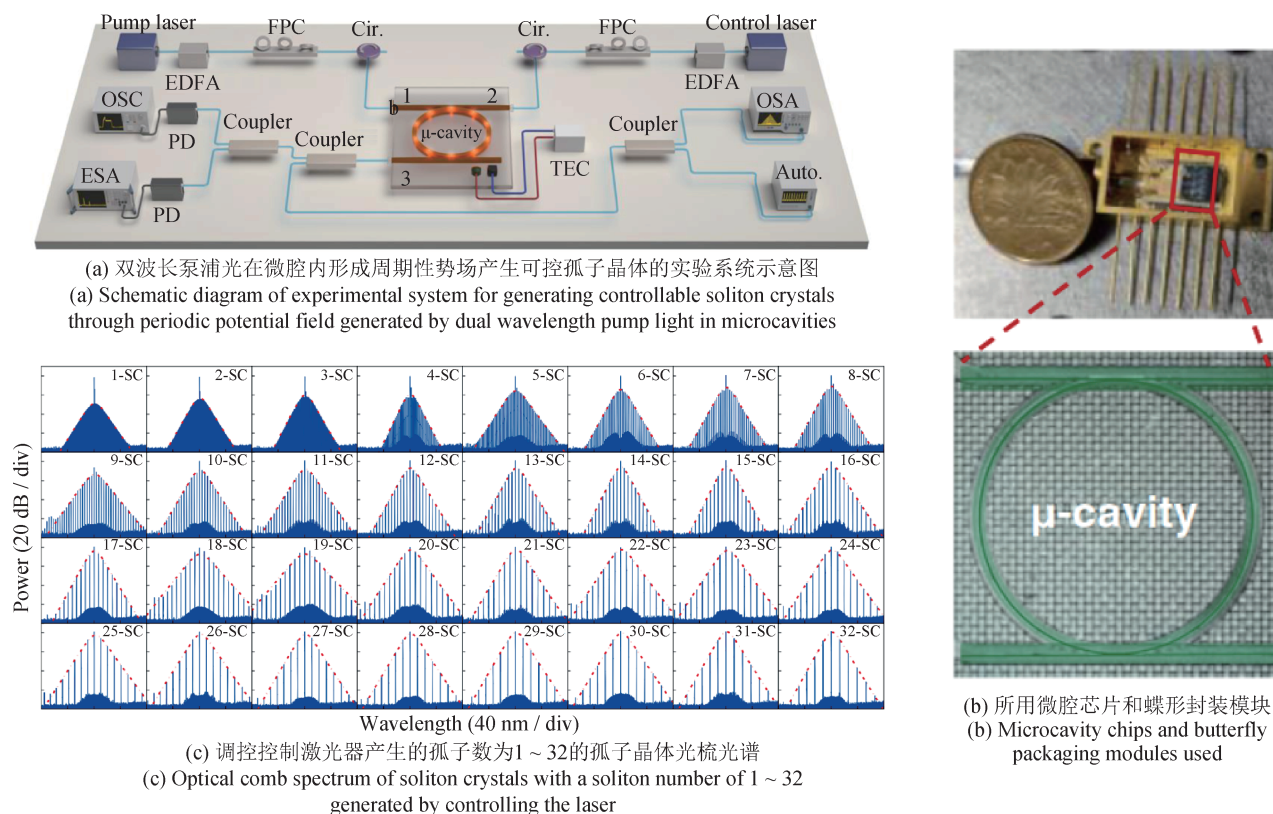


图4 双波长泵浦光在微腔内形成可控孤子晶体的实验系统及孤子晶体光梳光谱^[30]

Fig.4 Experimental system for generating controllable soliton crystals using dual-wavelength pump light in a microcavity, and soliton crystal comb spectra^[30]

孤子晶体光梳中心梳齿线光功率随孤子数变化关系的实测曲线如图5所示，相较于同等泵浦条件下激发的单孤子微梳，在微腔内合成孤子晶体光梳后，中心梳齿能量可增大 N^2 倍。因此，孤子晶体光梳的泵浦光能量转换效率可达到百分之几

十，但是孤子晶体光梳在提高泵浦光能量转换效率的同时，频域梳齿间距会增大(对应时域孤子脉冲重复周期减小)， N 孤子晶体光梳的梳齿频率间隔将增大为 $N \times \text{FSR}$ ，这不适用于需要低重频、窄频率间隔的光梳应用场景。因此，可以认为，孤

子晶体光梳单纯通过增大腔内的孤子脉冲数目来增大泵浦能量转换效率,但单孤子脉冲的泵浦能量转换效率并没有得到有效提升。

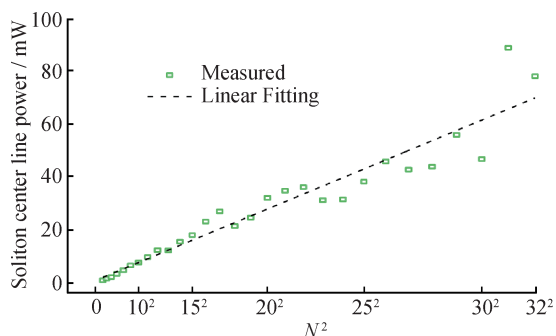


图5 孤子晶体光梳中心梳齿线光功率随孤子数平方 N^2 变化关系实测曲线^[30]

Fig.5 The measured curve of the optical power of the comb tooth line at the center of a soliton crystal comb as a function of the square of the number of solitons N^2 ^[30]

2.2 正常-反常色散双腔耦合泵浦光循环存储结构

2019年薛晓晓等人提出了一种双环复合腔结构^[31],如图6所示,该结构通过反常色散微腔(孤子腔)的非线性效应产生孤子,同时通过正常色散微腔(泵浦腔)收集并循环利用泵浦能量,理论上泵浦光通过级联四波混频产生光梳边带的能量转换效率能够达到100%,可有效提高孤子微腔光梳的泵浦能量转换效率。

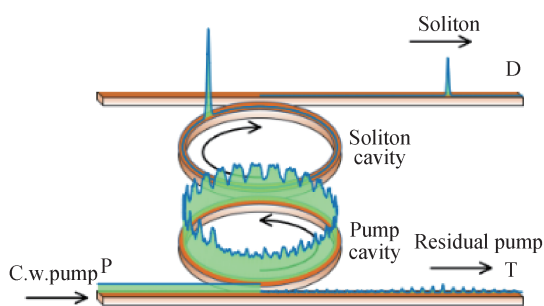


图6 正常色散与反常色散的耦合双环复合腔结构^[31]

Fig.6 A coupled double ring composite cavity structure with normal dispersion and abnormal dispersion^[31]

该研究团队在忽略本征损耗的情况下进行了互耦光学微谐振腔中孤子微梳产生的数值模拟实验。模拟结果如图7所示,孤子微梳在D端口的输出功率占总功率的98.0%,在T端口的剩余功率仅为2.0%;从耦合腔输出的孤子微梳光谱中可以观

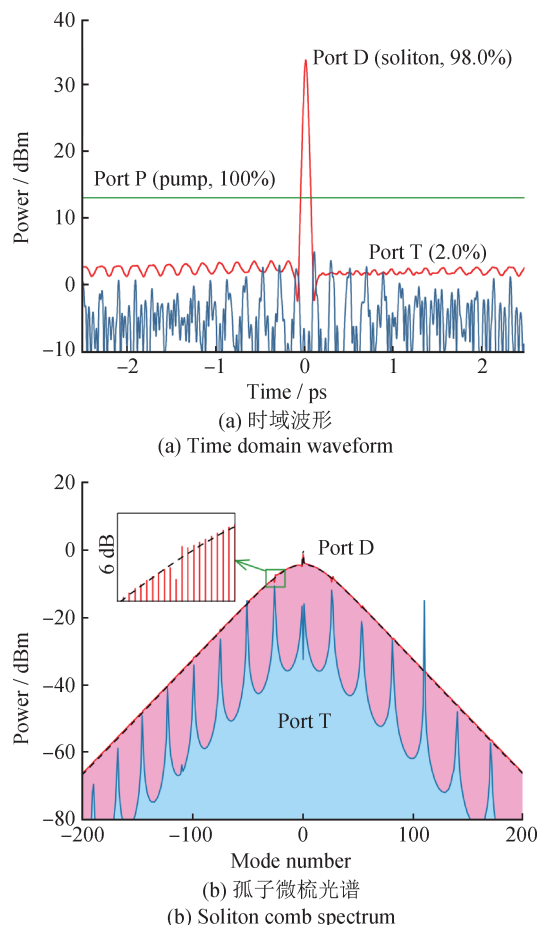


图7 忽略本征损耗的情况下互耦光学微谐振腔中孤子微梳产生数值模拟^[31]

Fig.7 Numerical simulation of soliton micro comb generation in a coupled optical micro resonant cavity without considering intrinsic losses^[31]

察到在端口T处出现明显的泵浦光耗尽,对应于94.2%的高转换效率(滤除残余泵浦光后端口D处梳齿功率与总输入泵功率之比)。

这种双腔耦合结构虽然在理论上能获得极高的泵浦光转换效率,但实际制造并利用该结构产生孤子微腔光梳时存在较大的工艺难度。如在氮化硅平台上制造该结构时,由于需要2个色散不同的环腔,波导结构特别是波导高度就必须不同,这对波导层材料低压化学气相沉积(Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD)的沉积工艺提出了挑战,即必须通过二次外延生成不同厚度的波导膜层,刻蚀波导时也需要高精度二次套刻,同时必须设计特定的结构以实现2种不同色散和波导截面面积微环的高效耦合,这些使得该结构的

设计和制备难度极大。另外,复合腔制造完成后,调制孤子的难度较大,因为该结构实现泵浦循环利用的前提是泵浦光频率在泵浦环谐振波长的附近,而调制孤子的过程中通常是需要进行扫频操作的,无论是扫孤子腔的谐振频率还是扫泵浦光的频率,都需要在泵浦腔上添加一些额外的结构并进行精准的调控,以保证泵浦光频率与泵浦腔谐振频率近似相等。基于以上原因,尽管该结构理论上泵浦能量转换效率极高,但一直没有后续实验结果报道。

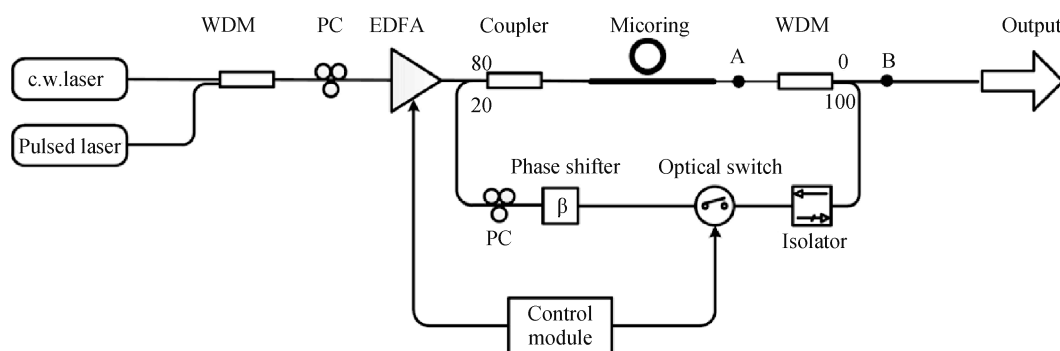
2.3 微腔-光纤/波导环泵浦光反馈耦合干涉结构

孤子微梳泵浦能量转换效率低是由于大量泵浦光无法有效耦合进微腔而是从Bus波导输出端损耗掉,设法通过光纤或波导环将泄露的泵浦光反馈耦合进微腔实现泵浦光的重复利用,可以提高微腔光梳的泵浦能量转换效率。本课题组在2017年便提出并研究了用光纤环反馈泵浦光提高微腔

光梳泵浦能量转换效率的方案^[32]。该方案设计的反馈系统如图8所示,通过引入高强度的泵浦反馈光,经过反馈光路重新耦合注入到微腔中的方法来增大能量转换效率。

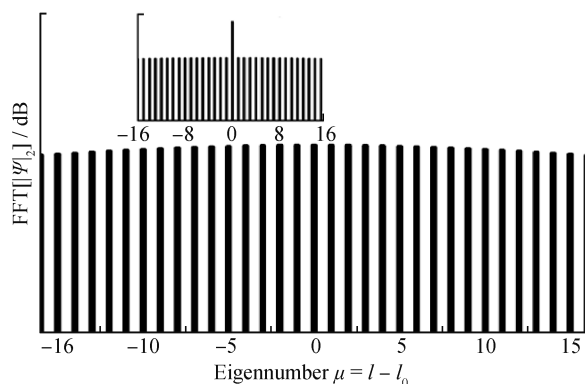
图8(a)为微腔-光纤环泵浦反馈耦合光梳产生实验系统示意图,整个反馈光路由控制模块(Control module)进行控制。一束由连续光和脉冲光混合的光源经过偏振态的控制之后,经掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)放大后注入微腔中可以激发孤子脉冲,这种获得孤子的方案已经在光纤环路中实现^[33]。在Through端通过WDM将泵浦模的光引入至反馈回路,最终与泵浦输入光一起耦合注入到微腔中,并输出如图8(b)所示光谱。

图9(a)是基于描述光梳演化非线性动力学的Lugito-Lefever方程^[34-35]模拟得到的孤子光梳泵浦能量转换效率随泵浦反馈引入前后的变化情况,同



(a) 微腔-光纤环泵浦反馈耦合光梳产生实验系统示意图

(a) Schematic diagram of experimental system for micro cavity fiber ring pumped feedback coupled optical comb generation



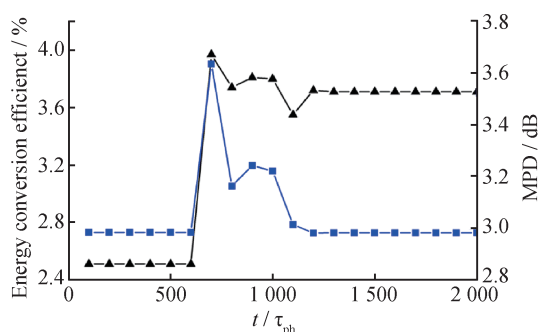
(b) 输出光梳光谱

(b) Output comb spectrum

图8 微腔-光纤环泵浦反馈耦合光梳产生实验系统及其输出光谱^[32]

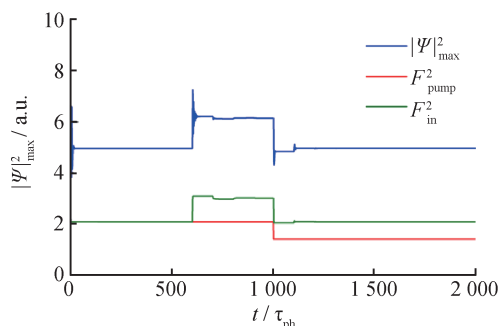
Fig.8 Experimental system for generating a microcavity-fiber ring pumped feedback-coupled optical comb and its output spectrum^[32]

时图9(a)还给出了描述孤子微梳中央光谱区平坦度的衡量指标最大功率差(Maximum Power Difference, MPD)(指孤子微梳中间32根梳齿间光功率的最大差值)随泵浦反馈引入前后的变化情况。结果如图9(b)所示,通过光开关控制在 $t = 600 \tau_{ph}$ 时引入泵浦反馈光,并且在 $t = 1000 \tau_{ph}$ 时减小泵浦光功率,蓝色曲线表示腔内光场功率变化,绿色曲线表示注入到微环中总的光强变化,红色曲线表示泵浦激光器输出的光功率变化。该泵浦光反馈系统能够在保证孤子频域平坦特性的前提下增加孤子的非线性能量转换效率,使泵浦光能量转换效率提高约47%,同时能够降低孤子微梳产生的泵浦光阈值。但由于没有对系统中的光纤分光耦合器和WDM复用器的耦合比进行优化,也没有对反



(a) 光纤环泵浦反馈耦合腔泵浦能量转换效率与MPD随泵浦引入前后的变化

(a) The variation of pump energy conversion efficiency and MPD with and without pump introduction in fiber ring pumped feedback coupled cavity



(b) 腔内光梳光场强度及泵浦光强在泵浦光反馈引入前后的变化情况

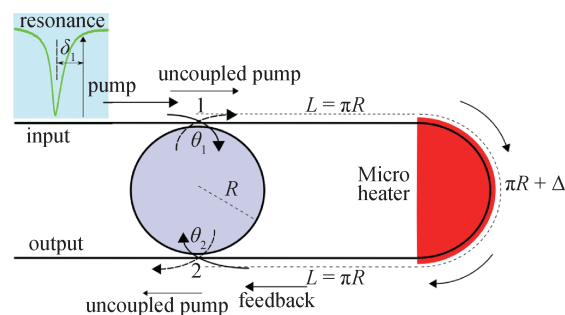
(b) The variation of the intensity of the cavity comb light field and the pump light intensity before and after the introduction of pump light feedback

图9 光纤环泵浦反馈耦合系统中泵浦能量转换效率与光场强度的变化情况^[32]

Fig.9 Changes in pump energy conversion efficiency and optical field intensity in a fiber ring pumped feedback-coupled system^[32]

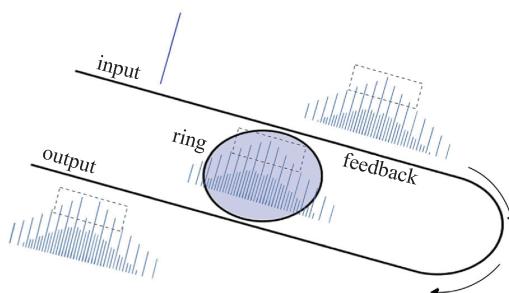
馈环路的反馈光相位进行最优控制,模拟得到的孤子微梳泵浦能量转换效率提高幅度有限。但该研究结果仍证明了这种泵浦反馈结构是一种提高微腔光梳泵浦能量转换效率的可行方法。

2022年,BOGGIO J G等人报道了一种在微腔与U形反馈波导构成的复合腔结构中产生孤子微梳的实验结果^[36-37]。如图10所示,该结构采用U形反馈波导循环利用微腔 Through 端输出的残余泵浦光,通过U形反馈波导传输到微腔另一侧进行再次耦合,通过控制U形反馈波导的长度(即反馈光相位),使其与微腔内该侧耦合输出的泵浦光达到干涉相消状态,实现泵浦光在微腔内的充分耦合利



(a) 环形谐振腔被嵌在一个两倍于它的长度的等效外腔中

(a) The annular resonant cavity is embedded in a equivalent outer cavity twice its length



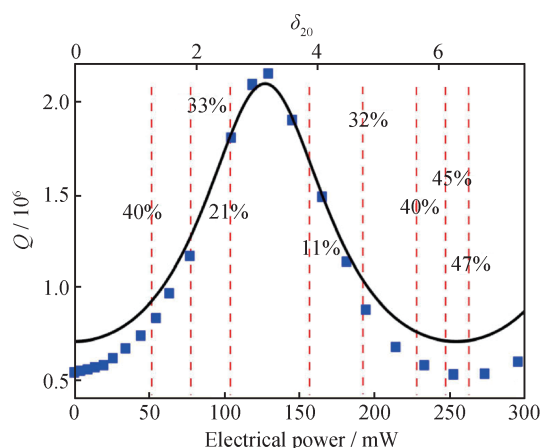
(b) 环形腔、等效外腔反馈波导和输出波导中光频梳频谱的演变
(b) The evolution of optical frequency comb spectra in ring cavity, equivalent feedback waveguide, and output waveguide

注:由于泵浦光共振失谐 δ_1 通常是非零的,因此在耦合点1和2处,仅有一部分光场被耦合进/出环形谐振腔,而其余部分则被反射。通过微加热器调整反馈波导部分的长度 Δ ,调节光场的干涉相位。如果从环形腔和等效反馈波导出来的泵浦光场具有相似的振幅和相反的相位,则在耦合腔的输出波导处发生极端的泵浦光耗尽。可通过改变耦合系数,控制维持孤子脉冲所必需的环形腔内循环泵浦功率的大小。

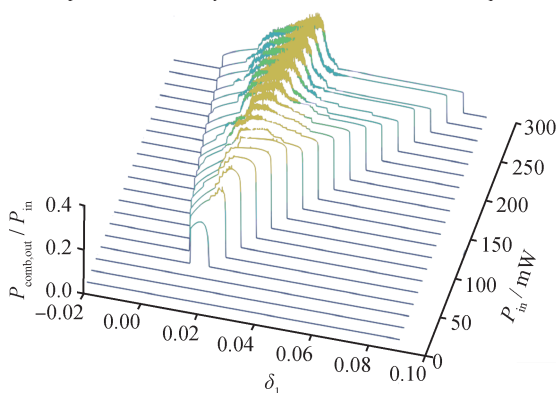
图10 具有干涉反馈耦合结构的环形谐振腔原理图^[36]

Fig.10 Principle diagram of a ring resonant cavity with interference feedback coupling structure^[36]

用, 泵浦能量转换效率理论模拟结果高达80%, 实际器件测试结果达到55%。图11显示了理论上U形波导长度对微腔泵浦模式的总 Q 值调控与梳齿能量转换效率调控。本质上, 该结构是通过U形反馈波导与微腔左半部分环构成的等效环形腔来实现对泵浦光的循环利用, 从而实现高泵浦光梳能量转换效率。



(a) 完美孤子晶体能量转换效率和平均 Q 因子与电功率的关系
(a) Energy conversion efficiency and average Q factor of perfect soliton crystals as a function of electrical power



(b) 对于不同输入泵浦功率值, 通过数值模拟扫描泵浦光频率失谐 δ_1 得到的输出光梳功率
(b) For different input pump power, the output comb power obtained by numerically simulating the frequency detuning δ_1 of the scanning pump light

注: 红色虚线上黑色字体标识的百分比是能量转换效率, 其是在恒定的输入泵浦功率下改变 Δ 由实验得到的完美孤子晶体(Perfect Soliton Crystal, PSC)光谱计算得出的。测量的平均 Q 因子作为电功率的函数用蓝色实心方框表示, 而实线表示理论计算值。

图11 孤子微梳泵浦能量转换效率的干涉调谐通过在加热器上施加电功率而改变 $\Delta(\delta_{20})$ ^[36]

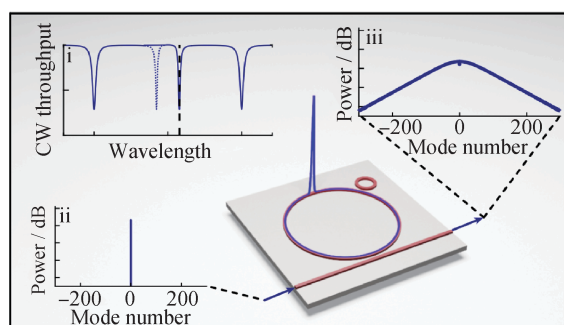
Fig.11 Interference tuning of energy conversion efficiency for soliton micro comb pumping changed by applying electrical power to the heater $\Delta(\delta_{20})$ ^[36]

但该文献并没有深入探究U形波导对复合腔系统的影响, 所提供的理论模型不适合扩展研究其他U形波导长度的复合腔结构(文献中U形波导长度为微腔周长的1.5倍左右, 该理论模型不适合扩展研究如U形波导长度为微腔周长2倍的复合腔结构)。同时, 该文章进行的实验未能成功调制出单孤子, 所报道的55%的泵浦能量转换效率是指孤子晶体光梳的结果, 而孤子晶体和多孤子光梳存在梳齿间隔太大(是单孤子光梳梳齿间隔的若干倍至几十倍)、光梳光谱包络杂乱等问题, 不满足信道间隔小、光梳光谱平坦度高的应用需求(如微腔光梳用于密集波分复用的多波长光源)。因此需要设计一个适合推广不同复合腔结构的单孤子调制方案。

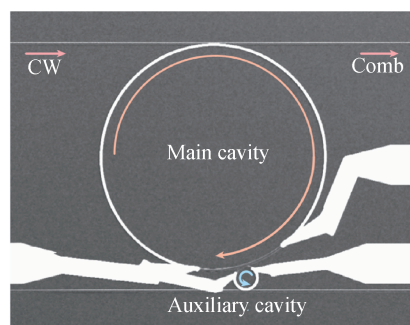
2.4 主-副微环腔耦合超模谐振峰劈裂结构

2023年, 瑞典查尔莫斯大学的HELGASON等人设计了一种双环耦合引起模式劈裂的“光子分子”的复合腔结构^[16], 如图12所示, 该结构通过辅助环(小环)与主环的耦合, 使主环的泵浦模式谐振峰(离泵浦激光最近的谐振峰)发生模式劈裂。从定性的角度看, 孤子产生区域对应的泵浦光波长应该处于主环原本谐振峰的红移处, 辅助环的作用是使主环的谐振峰发生模式劈裂, 将劈裂后的红移子谐振峰拉到该红移失谐附近, 大幅减小了微腔谐振和泵浦光的频率失谐量, 使得在孤子产生的波长位置仍有大量泵浦光可以进入微腔, 从而提升单孤子泵浦能效。理论研究表明, 这种结构不仅能使孤子微梳的能量转换效率大幅提高(理论上可达80%), 而且光梳的带宽也更宽, 打破了“孤子微梳转换效率同梳齿数目成反比”的一般规律。

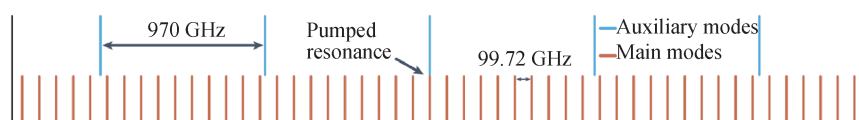
该方法在实验上已经实现了高达54%的单孤子能量转换效率, 是目前报道的最高的单孤子能量转换效率。但本课题组科研人员近期到瑞典查尔莫斯理工大学实地观摩该实验, 通过与作者交流后发现, 该实验目前调制孤子的难度较高, 观摩过程中未能成功调制出孤子, 说明调制孤子的方案仍需优化。理论模型只能定性解释泵浦能量在孤子产生时大量进入微腔的原因, 并不能完全阐释辅助环对主环产生孤子的影响。



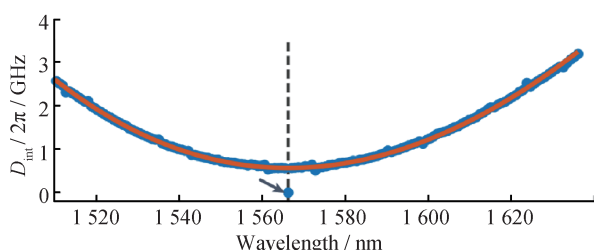
(a) 主副环耦合腔中泵浦模式交叉引起模式劈裂, 利用红移劈裂模式泵浦微腔产生单孤子微梳
(a) The mode splitting is caused by the crossing of pump modes in the coupling cavity of the main and secondary rings, and a single soliton micro comb is generated by using the red shift splitting mode to pump the microcavity



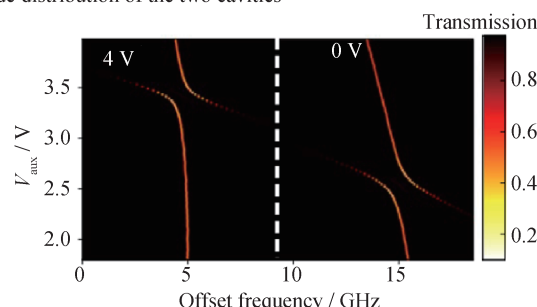
(b) 制备出的双环耦合腔器件扫描电子显微镜图像
(b) Scanning electron microscopy images of the prepared dual ring coupled cavity device (the white part is the heater)



(c) 两个腔的谐振模分布示意图
(c) Schematic diagram of the resonant mode distribution of the two cavities



(d) 图(c)中模式劈裂对应的色散变化
(d) The dispersion change corresponding to mode splitting in (c)



(e) 副环加热器温控的复合腔模式交叉
(e) Mode crossing in a composite cavity controlled by secondary ring heater temperature

注: 图 (b) 白色部分是加热器。由于两个腔的 FSR 不匹配, 因此一次只能对某一个主环纵模施加模式交叉扰动并引起强的模式劈裂。

图 12 双环耦合模式劈裂复合腔结构^[16]

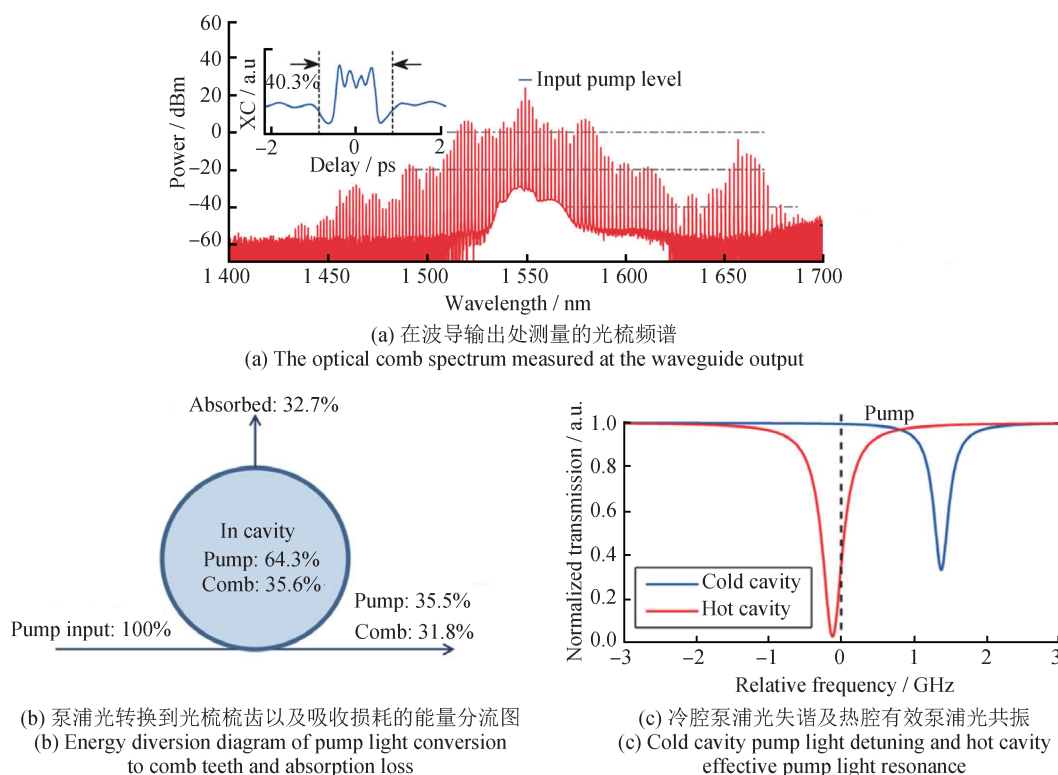
Fig.12 Double loop coupled mode split composite cavity structure^[16]

2.5 在正常色散微腔中激发时域暗孤子锁模脉冲光梳方案

一般情况下, 微腔中产生亮孤子光梳的前提条件是微腔波导需要呈现为反常色散。但是理论和实验研究均表明, 在正常色散微腔中也可以产生一种特殊的“暗孤子”锁模脉冲光梳^[38-39]。文献[26]报道了一种基于正常色散微腔中产生的暗孤子锁模脉冲微梳, 其泵浦光经级联四波混频激发光梳的能量转换效率可达到 31.8%, 比反常色散单个亮孤子微梳的泵浦光能量转换效率高, 一方面是因为激发暗孤子脉冲光梳时泵浦光的热腔有效失谐量相比于冷腔失谐量大大减小, 更有利于

泵浦光耦合进入微腔中参与光梳产生; 另一方面, 从暗孤子脉冲光梳的时域波形来看, 暗孤子脉冲的时域占空比相比于反常色散的亮孤子微梳要大得多, 对应更大的泵浦光能量转换效率。图 13 是正常色散微腔中激发暗孤子锁模脉冲光梳的光谱图和能量转换效率实验测试结果。

在微腔中产生暗孤子锁模脉冲光梳时不需要微腔波导必须呈反常色散, 这有利于氮化硅材料微腔光梳芯片的制备。首先, 因为反常色散需要较厚的氮化硅薄膜(厚度一般要求大于 700 nm), 而较厚的高质量氮化硅薄膜用 LPCVD 工艺生长非常困难, 且薄膜内往往存在应力失配造成的大量



注：图 (a) 中的插图显示了用自参考互相关(Cross-Correlation, XC)测量的时域波形。
图 13 耦合到总线波导的正常色散 All-pass 型微环谐振腔中产生锁模暗脉冲光梳的实验结果^[26]

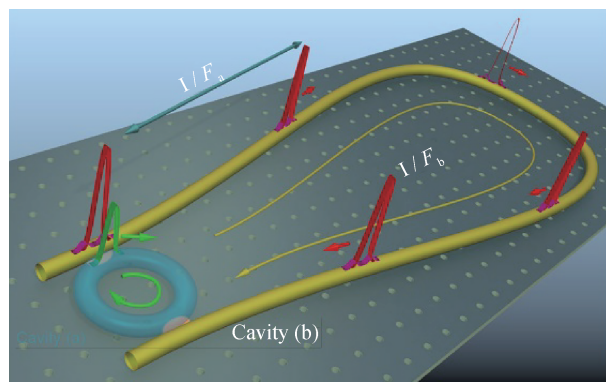
Fig.13 Experimental results of mode-locked dark pulse comb generation in a normal dispersion All-pass micro ring resonant cavity coupled to a bus waveguide^[26]

微裂纹，严重影响微腔波导的传输损耗和微腔 Q 值。但是正常色散波导在波导厚度为 200 ~ 300 nm 时就能实现，因此避免了厚膜氮化硅生长工艺的挑战。其次，暗孤子锁模脉冲光梳的泵浦光转换效率虽然较高，但是一般情况下暗孤子锁模脉冲光梳的光谱宽度较窄，而且在由泵浦光强度-泵浦光频率失谐量构成的参数空间(相空间)中，这种特殊形态的光梳能够存在的空间范围很小，意味着对泵浦光的可调控参数空间小，且产生的暗孤子脉冲光梳容易失稳消失。

2.6 其他泵浦方案和腔结构

2.6.1 微腔耦合增益外腔结构

微腔耦合增益外腔结构^[40]如图 14 所示，该结构利用微腔提供反常色散，增益腔为微腔产生的各级梳齿光梳提供增益，高阶梳齿光梳的增益不再仅来源于泵浦光，而是可以用很低的泵浦光产生孤子微腔光梳。该结构主要存在的问题：需要额外的装置向增益腔提供能量、增益腔增益谱调



注：短脉冲(绿色)在微腔(蓝色)中传播，并由放大环路(黄色)中的一个较长脉冲(红色)和一个弱的高阶“超模脉冲”(紫色)维持^[40]。

图 14 激光腔孤子原理示意图

Fig.14 Principle of operation of microcomb laser cavity-soliton formation^[40]

制孤子微腔光梳的频谱使频谱发生畸变、时域脉冲的脉宽增大及频域谱宽的缩小等。

2.6.2 光子分子腔

类双原子分子的光子分子腔^[41-43]即双环微腔结构，其使用的 2 个微环各项参数近似相同。实现高

泵浦能量转换效率的原理与文献[16]相同,即利用双环结构使原本单环结构的谐振峰发生劈裂,使泵浦光处于孤子存在区域时仍有大量的泵浦光能量可以进入微腔系统。使用近似相同的2个微环构成双环结构,辅助环不仅会影响主环的泵浦模式,而且会极大的影响高阶梳齿模式,与单环结构相比具有更为复杂的非线性动力学过程,整体分析难度较大,但也能编辑出更为实用的光谱,文献[43]中报道的输出孤子光谱便具有较好的梳齿平坦度。

2.6.3 耦合共振腔

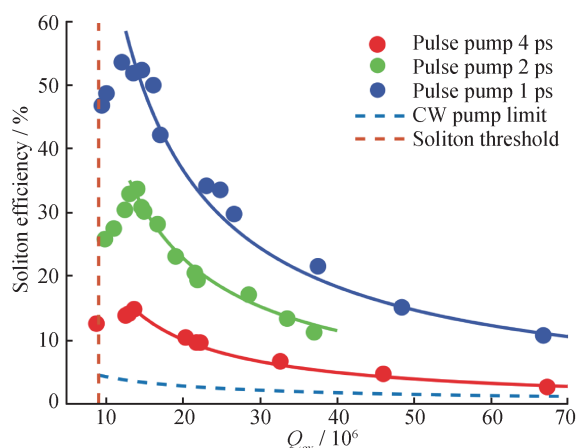
该结构是一种能实现高效电光光频梳^[44]的耦合共振腔结构,用于解决产生电光光频梳的单环微腔结构处于严重欠耦合状态的问题。该结构将产生电光光梳的微腔命名为主腔,在入射波导与主腔之间引入一个辅助微腔,通过合理的耦合参数设计,使得对于主腔的泵浦模式来说,由辅助腔与入射波导构成的等效波导与主腔之间处于广义临界耦合状态或广义过耦合状态,从而在产生电光光频梳时有更多的泵浦光子能够进入主腔,提升泵浦能量转换效率。

2.6.4 脉冲泵浦微腔

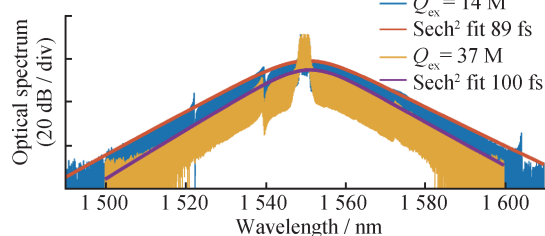
脉冲泵浦微腔方案^[45-49]是利用脉冲光泵浦而不是传统的连续波泵浦,可以在一定程度上提高光梳的泵浦能量转换效率,其产生的腔内孤子脉冲在时域上位于泵浦光脉冲的包络之内,这样孤子脉冲就可以从比泵浦脉冲平均光功率高很多的峰值光功率背景光场中获取能量。另外,孤子脉冲从腔内耦合输出时,可以与直接透过微腔的残余泵浦脉冲光场实现更大程度的相消干涉,这样就可以使泵浦脉冲能量更多地耦合进微腔内参与四波混频能量转换产生孤子光梳,从而达到提升泵浦能量转换效率的目的,一般情况下转换效率为5%~8%^[49]。同时,脉冲泵浦也有助于降低光梳产生的参量振荡阈值(对应泵浦光阈值光功率)^[50]。如图15所示,文献[45]研究了在皮秒脉冲泵浦的硅楔形微腔中产生孤子光梳的实验。在强过耦合的微腔中,使用2 ps泵浦脉冲实现了稳定的单孤子运转,转换效率高达34%。在频率扫描条件下,使用1 ps泵浦脉冲时,瞬时转换效率

高达54%。

脉冲泵浦虽然可以提高孤子微梳的泵浦光能量转换效率,但是产生孤子微梳的光谱带宽相对于连续光泵浦的孤子微梳较窄,而且这种光梳产生泵浦方案需要一台高重频、窄脉宽、高峰值功率的泵浦光源,这对光梳产生系统的成本和体积都带来了一定的负面影响。最近报道了一种在硅基片上集成的被动Q开关高能量脉冲激光器芯片^[51],该芯片可以产生输出中心波长为1.9 μm、脉冲能量大于150 nJ、脉宽为200 ns的光脉冲。该方案为未来片上集成脉冲泵浦激光器的超小型化混合集成微腔光梳系统奠定了基础。



(a) 不同数量的脉冲泵浦梳齿线对孤子转换效率的影响
(a) The effect of different numbers of pulse pumped comb lines on soliton conversion efficiency



(b) 脉冲泵浦孤子微梳的光谱图
(b) Spectral images of pulse pumped soliton microcombs

图15 脉冲泵浦产生孤子光梳的转换效率测量^[45]

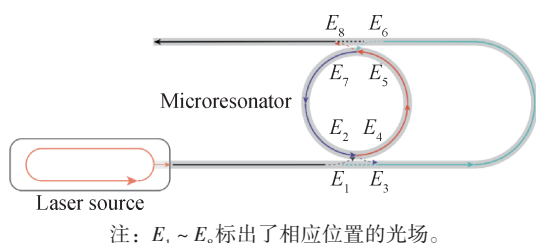
Fig.15 Measurement of the conversion efficiency of soliton comb generated by pulse pumping^[45]

2.7 反馈耦合腔优化设计及泵浦光转换效率模拟结果

在研究提升微腔光频梳能量转换效率的结构时,研究人员关注的焦点为反馈结构对泵浦光的相位调控,使泵浦光能够在孤子产生区域,即泵

浦光与微腔谐振频率存在一定失谐的情况下能够大量进入微腔,从而使得大量泵浦光留在微腔中参与非线性转换。这种思路在理论和实验上均取得了显著的成果,在反馈或复合结构能有效抑制系统的泵浦光总输出比例时,微腔系统将具有极高的泵浦-光梳能量转换效率。

但目前大多数研究结果并未深入探究反馈或复合结构对微腔各个梳齿的影响,因此需要进一步的研究,以便能够更好地掌握和利用微腔光梳系统的输出光谱特性。本课题组利用现有的耦合模理论结合LLE方程,理论上深入研究了如图16所示的高 Q 微腔-U形波导反馈耦合结构^[52]。



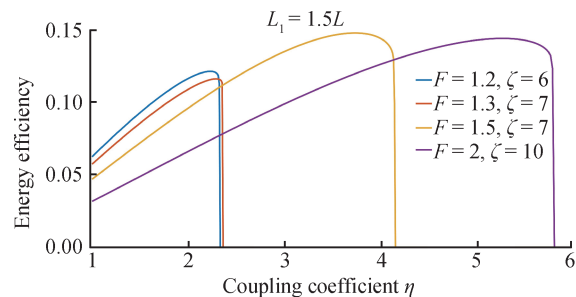
注: $E_1 \sim E_8$ 标出了相应位置的光场。

图16 微环谐振腔-U型波导反馈耦合结构示意图^[52]

Fig.16 Schematic diagram of feedback coupling structure for U-shaped waveguide with micro ring resonant cavity^[52]

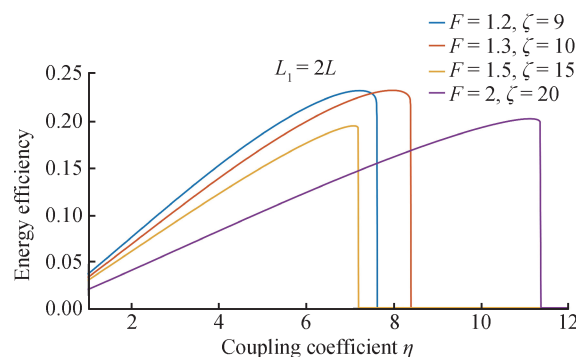
本课题组在仿真过程中发现, U形反馈波导长度为微腔周长2倍时的结构比文献[36]中采用的长度为微腔周长1.5倍的结构具有更低的参量振荡阈值以及更高的泵浦光能量转换效率。为了方便说明,定义U形波导的长度为 L_1 ,微腔的周长为 L ,注入微腔的外泵浦光强度为 F ,微腔与波导之间的耦合程度指数 η (该参数为微腔与波长的耦合强度, $\eta=1$ 表示临界耦合, η 越大表示微腔与波导之间的耦合强度越大),泵浦的归一化失谐 ζ 。

从图17中可以看到,当微腔腔内产生单孤子时,较大程度的过耦合是实现高能效的必要条件,当耦合腔结构中微腔与U形波导之间的耦合强度合适时, $L_1=2L$ 的结构能够达到的最高能量转换效率(约25%,若进一步优化参数,能量转换效率将高于25%)比 $L_1=1.5L$ 能够达到的最高能量转换效率(约15%)要大。同时经过参量振荡阈值分析,这种结构在过耦合区域(结构中耦合系数 $\eta>1$),且 $L_1=2L$ 的参量振荡阈值与 $L_1=1.5L$ 的结构相比降低了50%以上。



(a) $L_1=1.5L$ 的结构在微腔腔内产生单孤子时系统的泵浦能量转换效率随 η 的变化

(a) The pump energy conversion efficiency of the system with the structures of $L_1=1.5L$ generating single solitons in the microcavity as a function of η



(b) $L_1=2L$ 的结构在微腔腔内产生单孤子时系统的泵浦能量转换效率随 η 的变化

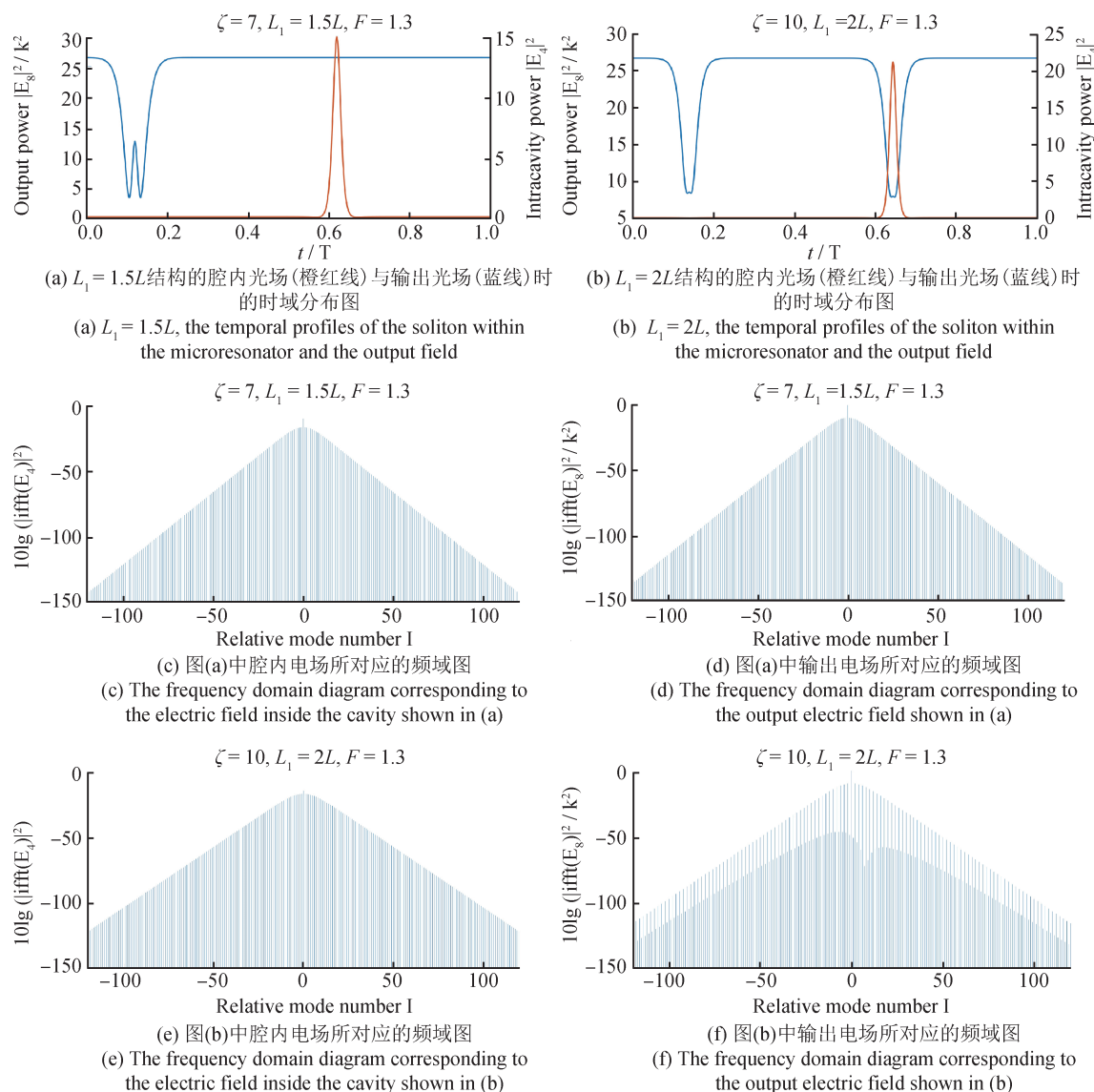
(b) The pump energy conversion efficiency of the system with the structures of $L_1=2L$ generating single solitons in the microcavity as a function of η

图17 微腔-U形反馈波导间耦合系数对泵浦能量转换效率的影响^[52]

Fig.17 The influence of coupling coefficient between microcavity and U-shaped feedback waveguides on pump energy conversion efficiency^[52]

另外, U形反馈波导长度的改变将影响微腔系统的输出光场。掌握反馈结构影响输出光场的规律是实际运用这种结构产生所期望光谱特征的微腔光梳的前提。

通过对微腔系统的非线性稳态分析,本课题组发现微腔系统的对外输出电场会受U形波导的长度调制,如图18所示,在微腔腔内电场以单孤子的形式传播时, $L_1=1.5L$ 的微腔系统的输出电场仍以单孤子的形式传播,而 $L_1=2L$ 的微腔系统输出电场就有了双孤子晶体的特征。本课题组认为,对复杂微腔系统输出光特性的深入探讨是必要的,其可以预测不同参数的复杂微腔系统可能输出的光谱以实现光谱定制,也能因避免参数的不合理设计导致可能需要的光谱无法输出的问题。

图 18 U 形反馈波导长度对微腔系统输出光的影响^[52]Fig.18 The influence of U-shaped feedback waveguide length on the output light of microcavity systems^[52]

3 总结与展望

低能耗与高的单根梳齿能量是微腔光梳技术实际运用的关键。本文针对当前孤子微梳技术面临的泵浦能量转换效率低下这一严重短板问题,重点分析了孤子微梳泵浦能量转换效率低的原因,指出孤子微梳泵浦能量转换效率低下有频域和时域两方面的原因:①频域上,产生孤子锁模态光梳时,泵浦光相对于微腔谐振频率处于较大红移失谐的状态,造成泵浦光不能充分耦合进微腔,而直接从输出波导浪费掉;②时域上,单孤子微梳腔内光场表现为脉宽极窄的单孤子脉冲,其光

场在腔内循环传输时,与连续波泵浦背景光场只有非常短暂的相互作用时间,造成较低的泵浦光-孤子脉冲能量转换效率。在此基础上,重点介绍了目前提出的几种提高孤子微梳泵浦光能量转换效率的技术方案,包括激发孤子晶体光梳利用多孤子结构、正常-反常色散双腔耦合泵浦光循环存储结构、微腔-波导反馈耦合干涉结构、主-副微腔耦合超模谐振峰劈裂结构等,并分析了各种方案的优缺点。最后给出了本课题组对泵浦光能量反馈波导耦合腔的优化设计,仿真模拟结果显示,单孤子微梳的泵浦光转换效率可超过 25%。

未来孤子微梳低泵浦阈值产生并低能耗工作

运转的发展方向将围绕如何更好地克服孤子微梳泵浦能量转换效率低的问题, 并应从造成这一问题的时域和频域两方面原因进行深入探索和优化设计, 包括:

1) 采用更加有效的复合腔结构, 例如, 可以考虑将当前已经证明有效的微腔-反馈波导耦合干涉结构和主-副微环腔耦合超模谐振峰劈裂结构有机结合在一起形成“超级”耦合腔结构, 同时解决泵浦光频率大红移失谐和泵浦光直接从输出波导泄露的问题, 产生孤子微梳时预期可以得到更高的泵浦光能量转换效率。也可以将片上集成的被动 Q 开关激光器等片上集成的窄脉冲高重频脉冲光源同微腔光梳芯片进行混合集成, 充分利用脉冲泵浦方式在提高泵浦能量转换效率方面的技术优势, 实现转换效率更高、结构更紧凑、系统更稳固的片上混合集成微腔光梳产生系统。

2) 通过调控波导中的高阶横模/偏振模的模式交叉, 可以拓展孤子微梳的边带梳齿能量分布。通过优化微腔波导在特点波长位置的相位匹配, 还可以在孤子微梳中心波导的远端红移/蓝移侧激发孤子切伦科夫辐射波(色散波)^[53], 提高泵浦能量向孤子微梳中心波长两侧远端的扩展能力。利用现在正蓬勃发展的逆向设计技术^[25], 可以优化设计微腔波导的色散分布, 以期产生光谱可以“定制”的孤子微梳, 提高孤子微梳的泵浦能量转换效率, 并扩展孤子微梳的光谱带宽。

参考文献

- [1] KIPPENBERG T J, HOLZWARTH R, DIDDAMS S A. Microresonator-based optical frequency combs [J]. *Science*, 2011, 332(6029): 555–559.
- [2] BARTELS A, HEINECKE D, DIDDAMS S A. 10-GHz self-referenced optical frequency comb [J]. *Science*, 2009, 326(5953): 681.
- [3] LI P, LI Q, TANG W, et al. Scalable parallel ultrafast optical random bit generation based on a single chaotic microcomb [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(4): 637–644.
- [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] KUES M, REIMER C, ROZTOCKI P, et al. On-chip generation of high-dimensional entangled quantum states and their coherent control [J]. *Nature*, 2017, 546(7660): 622–626.
- [6] MARIN PALOMO P, KEMAL J N, KARPOV M, et al. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications [J]. *Nature*, 2017, 546(7657): 274–279.
- [7] SPENCER D T, DRAKE T, BRILES T C, et al. An optical-frequency synthesizer using integrated photonics [J]. *Nature*, 2018, 557(7703): 81–85.
- [8] NEWMAN Z L, MAURICE V, DRAKE T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock [J]. *Optica*, 2019, 6(5): 680–685.
- [9] RIEMENSBERGER J, LUKASHCHUK A, KARPOV M, et al. Massively parallel coherent laser ranging using a soliton microcomb [J]. *Nature*, 2020, 581(7807): 164–170.
- [10] FELDMANN J, YOUNGBLOOD N, KARPOV M, et al. Parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core [J]. *Nature*, 2021, 589(7840): 52–58.
- [11] TETSUMOTO T, NAGATSUMA T, FERMAN M E, et al. Optically referenced 300 GHz millimetre-wave oscillator [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(7): 516–522.
- [12] KIPPENBERG T J, GAETA A L, LIPSON M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators [J]. *Science*, 2018, 361(6402): 1–39.
- [13] SAVCHENKOV A A, MATSKO A B, ILCHENKO V S, et al. Tunable optical frequency comb with a crystalline whispering gallery mode resonator [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(9): 1–4.
- [14] FANG Z, LUO H, LIN J, et al. Efficient electro-optical tuning of an optical frequency microcomb on a monolithically integrated high-Q lithium niobate microdisk [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5953–5956.
- [15] DEL' HAYE P, SCHLIESSER A, ARCIZET O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator [J]. *Nature*, 2007, 450(7173): 1214–1217.
- [16] HELGASON Ó B, GIRARDI M, YE Z, et al. Surpassing the nonlinear conversion efficiency of soliton microcombs [J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(11): 992–999.
- [17] KOVACH A, CHEN D, HE J, et al. Emerging material systems for integrated optical Kerr frequency combs [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(1):

- 135–222.
- [18] HERR T, BRASCH V, JOST J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(2): 145–152.
- [19] YI X, YANG Q F, YANG K Y, et al. Active capture and stabilization of temporal solitons in microresonators [J]. *Optics letters*, 2016, 41(9): 2037–2040.
- [20] 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): 1–10.
- [21] 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.
- [22] LIANG W, ELIYAHU D, ILCHENKO V S, et al. High spectral purity Kerr frequency comb radio frequency photonic oscillator [J]. *Nature Communications*, 2015, 6 (1): 1–8.
- [23] BAO C, ZHANG L, MATSKO A, et al. Nonlinear conversion efficiency in Kerr frequency comb generation [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6126–6129.
- [24] WANG P H, JARAMILLO VILLEGAS J A, XUAN Y, et al. Intracavity characterization of micro-comb generation in the single-soliton regime [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (10): 10890–10897.
- [25] LUCAS E, YU S P, BRILES T C, et al. Tailoring microcombs with inverse-designed, meta-dispersion microresonators [J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(11): 943–950.
- [26] XUE X, WANG P H, XUAN Y, et al. Microresonator Kerr frequency combs with high conversion efficiency [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(1): 1–4.
- [27] KIPPENBERG T J, HOLZWARTH R, DIDDAMS S A. Microresonator based optical frequency combs [J]. *Science*, 2011, 332(6029): 555–559.
- [28] KARPOV M, PFEIFFER M H, GUO H, et al. Dynamics of soliton crystals in optical microresonators [J]. *Nature Physics*, 2019, 15(10): 1071–1077.
- [29] COLE D C, LAMB E S, DELHAYE P, et al. Soliton crystals in Kerr resonators [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11 (10): 671–676.
- [30] LU Z, CHEN H J, WANG W, et al. Synthesized soliton crystals [J]. *Nature communications*, 2021, 12(1): 1–7
- [31] XUE X, ZHENG X, ZHOU B. Super-efficient temporal solitons in mutually coupled optical cavities [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(9): 616–622.
- [32] LEI X, CHEN S, ZHANG L. Improving the nonlinear energy conversion efficiency of a Kerr-comb-based broadband multi-wavelength light source by introducing an optical feedback loop [J]. *Laser Physics*, 2017, 27(6): 1–7.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] CHEMBO Y K, MENYUK C R. Spatiotemporal Lugiato-Lefever formalism for Kerr-comb generation in whispering-gallery-mode resonators [J]. *Physical Review A*, 2013, 87 (5): 1–5.
- [36] BOGGIO J C, BODENMÜLLER D, AHMED S, et al. Efficient Kerr soliton comb generation in micro-resonator with interferometric back-coupling [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1–11.
- [37] GONG Z, LI M, LIU X, et al. Photonic dissipation control for Kerr soliton generation in strongly Raman-active media [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125 (18) : 1–7.
- [38] XUE X, XUAN Y, LIU Y, et al. Mode-locked dark pulse Kerr combs in normal-dispersion microresonators [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(9): 594–600.
- [39] XUE X, XUAN Y, WANG P H, et al. Normal-dispersion microcombs enabled by controllable mode interactions [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(4): 23–28.
- [40] BAO H, COOPER A, ROWLEY M, et al. Laser cavity-soliton microcombs [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(6): 384–389.
- [41] TIKAN A, RIEMENSBERGER J, KOMAGATA K, et al. Emergent nonlinear phenomena in a driven dissipative photonic dimer [J]. *Nature Physics*, 2021, 17 (5) : 604–610.
- [42] ZHANG M, WANG C, HU Y, et al. Electronically programmable photonic molecule [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 36–40.
- [43] HELGASON Ó B, ARTEAGA SIERRA F R, YE Z, et al. Dissipative solitons in photonic molecules [J]. *Nature Pho-*

- tonics, 2021, 15(4): 305–310.
- [44] HU Y, YU M, BUSCAINO B, et al. High-efficiency and broadband on-chip electro-optic frequency comb generators [J]. Nature Photonics, 2022, 16(10): 679–685.
- [45] LI J, BAO C, JI Q X, et al. Efficiency of pulse pumped soliton microcombs[J]. Optica, 2022, 9(2): 231–239.
- [46] XU Y, SHARPLES A, FATOME J, et al. Frequency comb generation in a pulse - pumped normal dispersion Kerr mini-resonator [J]. Optics Letters, 2021, 46(3): 512–515.
- [47] MALINOWSKI M, RAO A, DELFYETT P, et al. Optical frequency comb generation by pulsed pumping [J]. APL Photonics, 2017, 2(6):1–6.
- [48] OBRZUD E, LECOMTE S, HERR T. Temporal solitons in microresonators driven by optical pulses [J]. Nature Photonics, 2017, 11(9): 600–607.
- [49] ANDERSON M H, BOUCHAND R, LIU J, et al. Photonic chip - based resonant supercontinuum via pulse - driven Kerr microresonator solitons[J]. Optica, 2021, 8(6): 771–779.
- [50] XU Y, LIN Y, NIELSEN A, et al. Harmonic and rational harmonic driving of microresonator soliton frequency combs[J]. Optica, 2020, 7(8): 940–946.
- [51] SINGH N, LORENZEN J, SINOBAD M, et al. Silicon photonics-based high-energy passively Q-switched laser [J]. Nature Photonics, 2024, 18(5): 485–491.
- [52] KAIRONG CHEN S C, WEI L, LIANGSEN F, et al. Impact of U-shaped waveguide structures on optical comb generation in microresonator systems [J]. Under Submission.
- [53] BRASCH V, GEISELMANN M, HERR T, et al. Photonic chip-based optical frequency comb using soliton Cherenkov radiation [J]. Science, 2016, 351 (6271) : 357–360.

(本文编辑: 刘宇轩, 米若鑫)



第一/通信作者: 陈少武(1968—), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事硅基光子学、非线性光子器件、微腔光学相关研究。



通信作者: 李维(1986—), 男, 高级工程师, 博士, 硕士生导师, 主要从事芯片化计量与传感相关研究。