

AlN 微环谐振腔倍频程孤子光频梳 (特邀)

涂慧钢¹, 刘佳^{1*}, 翁海中², 张雨丹¹, 戴江南¹, 陆巧银¹, John F. Donegan², 国伟华^{1*}

(1. 华中科技大学 武汉光电国家研究中心&光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;
2. 都柏林圣三一学院 物理学院, 爱尔兰 都柏林)

摘要: 基于光学微谐振腔的自参考耗散克尔孤子 (Dissipative Kerr Solitons, DKSs) 有广泛的应用, 如频率合成器、相干通信、天文光谱仪校准、精密测量、光学时钟、双梳光谱学等。倍频程 DKS 已在氮化硅和铌酸锂微谐振腔中实现, 笔者提出了一种在氮化铝 (AlN) 微环谐振腔中通过单一泵浦直接产生倍频程 DKS 的简单方案。通过将两个谐振频率相近的模式 TE_{00} 和 TE_{10} 分别作为泵浦谐振和辅助谐振模式, 红失谐侧的辅助模式 TE_{10} 可以有效地平衡孤子形成过程中的热拖曳效应。慢速扫描泵浦光波长可获得稳定的倍频程展宽的孤子梳, 带宽为 1 100~2 300 nm, 孤子存在范围最大为 10.4 GHz (83 pm)。这是首次在 AlN 平台上获得倍频程展宽的克尔光孤子。该方案在单一泵浦源下就可以获得稳定的倍频程光孤子以及宽的孤子访问窗口, 不同于其他方案需要额外引入复杂的控制手段和设备。

关键词: 微环谐振腔; 四波混频; 倍频程光频梳; 光孤子

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220311

Octave-spanning soliton optical frequency comb based on AlN microring resonator (Invited)

Tu Huilang¹, Liu Jia^{1*}, Weng Haizhong², Zhang Yudan¹, Dai Jiangnan¹,
Lu Qiaoyin¹, John F. Donegan², Guo Weihua^{1*}

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics & School of Optical and Electronic Information,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. School of Physics, CRANN and AMBER, Trinity College Dublin, Dublin 2, Ireland)

Abstract: Self-reference Dissipative Kerr Solitons (DKSs) based on optical microring resonators have a wide range of applications, such as frequency synthesizers, coherent communication, astronomical spectrometer calibration, precision measurements, optical clocks, dual-comb spectroscopy, etc. The directly accessing octave-spanning DKS has been obtained in silicon nitride and lithium niobate microresonators. Here, a simple method that can directly access the octave-spanning DKS in an aluminum nitride (AlN) microring resonator via a single pump was proposed. The TE_{00} and TE_{10} modes act as the pump resonance and auxiliary resonance modes, respectively, which had the resonant frequencies close to each other, and the auxiliary mode on red detuning side could effectively balance the thermal drag effect during the formation of soliton. The pump wavelength was tuned slowly to access a stable soliton comb with a bandwidth of 1 100-2 300 nm and the maximum soliton existence

收稿日期:2022-05-06; 修订日期:2022-05-16

基金项目:国家自然科学基金 (61861136001); 爱尔兰科学基金 (17/NSFC/4918)

作者简介:涂慧钢,女,博士生,主要研究方向为氮化铝微腔光频梳和铌酸锂电光梳。

导师(通讯作者)简介:国伟华,男,教授,博士,主要研究方向为新型半导体光电子器件、光子集成器件。

通讯作者:刘佳,女,博士,主要研究方向为氮化铝微腔光频梳和铌酸锂电光梳。

range of 10.4 GHz (83 pm), which was the first time an octave-spanning Kerr soliton had been obtained on the AlN platform. The stable octave-spanning DKS with large soliton accessing window could be obtained in this scheme using a single pump, which was different from other schemes with additional complex controls means and equipments.

Key words: microring resonator; four-wave mixing; octave-spanning optical frequency comb; optical soliton

0 引言

基于克尔非线性效应的微腔光频梳 (OFCs) 由于具有片上易集成和损耗低等优点受到广泛关注^[1-4], 目前已经在多个材料平台中展示, 如氧化硅 (SiO₂)^[1]、氮化硅 (Si₃N₄)^[5]、硅 (Si)^[6]、氮化铝 (AlN)^[7]、铌酸锂 (LiNbO₃)^[8]、铝镓砷 (AlGaAs)^[9] 和氟化镁 (MgF₂)^[4] 等, 其中倍频程展宽的光频梳已经在二氧化硅^[10]、Si₃N₄^[11] 和 AlN^[7] 等平台中实现。

普通的光频梳噪声大不利于实际应用, 因此低噪声且梳齿相干性高的孤子光频梳获得了更多的关注。耗散克尔孤子 (DKSs) 光频梳有很多实际应用, 如光学时钟、相干通信、超快距离测量、双梳光谱分析和精密测量等^[12-14]。但在微谐振腔中获取孤子态会面临巨大的挑战, 这源于孤子产生过程中伴随的热不稳定现象。当从微腔谐振位置的蓝失谐侧正向扫描泵浦波长时, 随着泵浦波长失谐量逐渐增大, 腔内功率增大, 依次产生主频梳、次频梳和调制不稳定频梳 (Modulate Instable Comb, MI 梳)^[15], 泵浦处于谐振波长的蓝失谐侧。随着泵浦波长增大, 腔内功率增高, 温度上升, 谐振峰红移, 腔内处于热平衡状态。随着失谐量继续增加, 频梳向孤子梳过渡, 泵浦波长处于谐振波长的红失谐侧; 腔内功率降低, 温度下降, 谐振峰蓝移, 此时腔内处于热不稳定状态。因此, 获取孤子光频梳将面临巨大的挑战。如果采取一些措施使得腔内温度保持相对稳定时, MI 梳可以过渡为稳定的孤子状态, 而孤子存在的波长范围即为孤子台阶。倘若腔内温度不稳定将会迅速降至环境温度, 此时泵浦光将彻底失谐跳出谐振态。因此, 在微腔中获取孤子态需要稳定腔内的瞬时热效应, 保持腔内温度的相对稳定。

目前 DKS 已经在 Si₃N₄^[13,16-18]、AlN^[19-20] 等多个平台中得到了验证, 但倍频程 DKS 主要在 Si₃N₄ 中广泛实现^[14,21]。上述孤子的获取方案主要包括快速正向

或反向的泵浦波长扫描^[14-15]、泵浦调制产生边带^[18]、快速控制谐振腔温度^[17]和功率“夹断”(Power Kicking)^[16]等。这些方法都会额外引入复杂的控制手段和设备, 增加了系统成本。为了通过简单的方式解决微腔中功率的不稳定变化, 提出并设计了一种双模微谐振腔, 其含有两个偏振相同且频率相近的谐振模式 (即 TE₀₀ 模式和 TE₁₀ 模式), 利用高阶模辅助稳定腔内温度, 从而实现孤子态的访问^[22]。

1 设计方案及仿真计算

获取稳定的孤子态需要腔内达到热稳定, 下面主要介绍通过相邻红失谐侧的辅助模式来稳定腔内温度变化, 从而实现孤子态的方案。当微腔内的 TE₀₀ 和 TE₁₀ 模式紧邻, 并且 TE₁₀ 在 TE₀₀ 红失谐侧, 扫描泵浦波长先后经过这两个模式, 微腔内模式的功率分布将发生变化。在泵浦波长即将跳出 TE₀₀ 模式的谐振时, TE₀₀ 模式将分裂为 C 共振和 S 共振, 其中 C 共振与孤子不同位, 移回冷腔时的位置, 而 S 共振与孤子同位。此时耦合进 TE₀₀ 模式的总功率降低, 伴随着腔内温度的降低, 位于 TE₀₀ 模式红失谐侧的 TE₁₀ 模式谐振峰蓝移, 因此耦合进入 TE₁₀ 模式的功率升高, 补偿了孤子态形成过程中腔内功率的大幅度降低, 使得孤子态得以稳定存在。

为了实现通过辅助模式获取孤子的方案, 仿真设计了微环腔的结构参数。首先利用有限元法 (COMSOL) 计算了厚度为 1.2 μm、半径为 60 μm 的 AlN 微环谐振腔的模式分布和有效折射率。仿真得到的不同环宽尺寸对应的 TE₀₀ 模式的总体色散 D_{int} 曲线如图 1(a) 所示, 环宽变化范围为 1.9~3.1 μm, 步长 0.2 μm, 这些环宽下 D_{int} 的值都大于 0。为了保证光谱的展宽, D_{int} 大于 0 的范围需要尽可能的宽, 且其值不能太大, 否则会抑制频谱的展宽, 因此环宽为 2.1~2.3 μm 之间时最满足色散设计要求。

为了实现 TE₀₀ 和 TE₁₀ 模式紧邻, 仿真计算了不

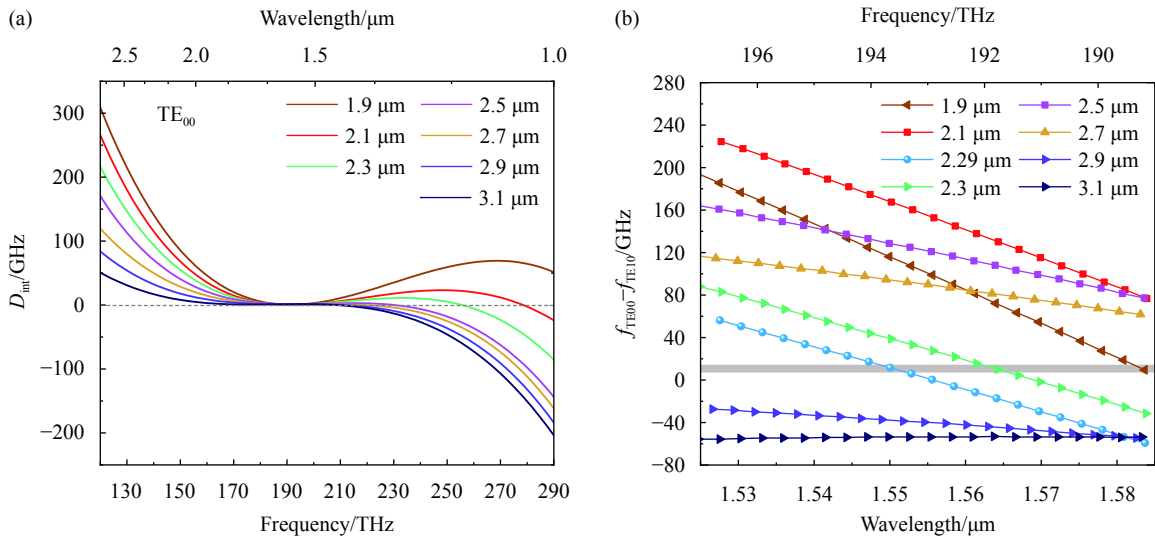


图 1 (a) 不同环宽尺寸时 TE₀₀ 模式的整体色散 D_{mt} ; (b) 不同环宽尺寸时 TE₁₀ 模式与 TE₀₀ 模式的谐振频率之差

Fig.1 (a) D_{mt} of TE₀₀ mode with different ring widths; (b) Difference between the resonant frequency of TE₀₀ and TE₁₀ with different ring widths

同环宽时 TE₀₀ 与 TE₁₀ 模式的谐振频率之差, 结果如图 1(b) 所示, 由图可得, 环宽为 2.29 μm 时两个模式在 1550 nm 处相距最近。

由上述仿真计算与分析可得, 有满足设计方案的结构, 确定目标微环的厚度为 1.2 μm, 半径为 60 μm, 环宽为 2.29 μm。

2 器件的工艺制作与低功率测试

2.1 器件的制作

获取倍频程 DKS, 除了设计合理的结构参数, 还要优化器件的制作工艺, 提高微环的品质因子 Q , 降低产生梳齿的阈值功率, 从而能在更低的泵浦功率下

获得宽带 DKS。

这里采用低成本、易于大面积制作的紫外光刻定义图形, 通过三层掩膜逐步将图形转移到 AlN 波导层, 实现了高品质 AlN 微环的制备^[23]。图 2(a) 为微环整体结构的扫描电镜图, 可以清晰地看到微环与波导之间的耦合间隙, 说明光刻和刻蚀工艺可以达到要求; 图 2(b) 为波导和微环耦合位置的俯视电镜图, 微环和波导的侧壁都有倾角, 为后期仿真计算时的理论结构提供了实验依据; 图 2(c) 为器件倾斜 30° 后波导侧壁的电镜图, 侧壁光滑, 可以预测微环腔的品质因子较高, 有利于实现倍频程 DKS。

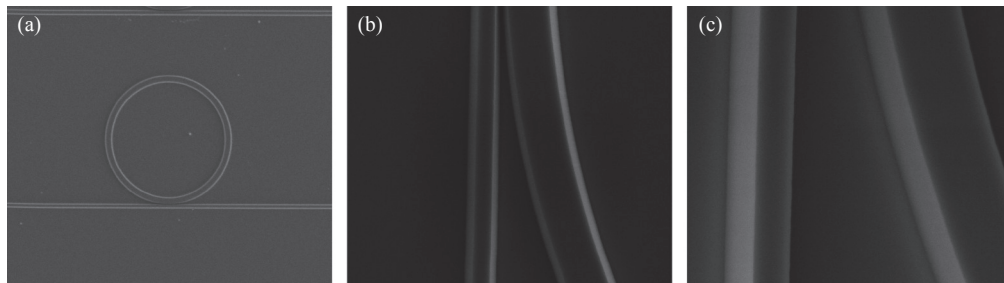


图 2 (a) 微环整体结构的扫描电镜图; (b) 波导和微环耦合位置的俯视电镜图; (c) 倾斜 30° 后波导侧壁的扫描电镜图

Fig.2 (a) Scanning electron microscopy(SEM) of the overall structure of the microring; (b) SEM of the coupled positions of the waveguide and microring; (c) SEM of the sidewall of the waveguide tilted 30°

2.2 低功率测试

图 3(a) 为微环腔在低功率下测试得到的透射谱

(输入功率为 20 μW), 其中橙线代表 TE₀₀ 模式, 蓝线代表 TE₁₀ 模式, 两个模式的自由光谱范围 (FSR) 分别

为 374 GHz 和 366 GHz。可以看出,两个模式在 1550 nm 附近相隔最近,TE₀₀ 模式和 TE₁₀ 模式的谐振波长分别为 1550.582 nm 和 1550.617 nm,高阶模的谐振波长在基模的红失谐侧,两者仅差 35 pm,与理论设计吻合。图 3(b) 为两个模式在 1550 nm 附近的透射峰放大图,其中圆点为测试数据点,实线为拟合曲

线。通过拟合可以得到 TE₀₀ 和 TE₁₀ 模式的加载品质因子 Q_{load} 分别为 4.8×10^5 和 2.8×10^5 ,考虑到稍微过耦合的情况,提取两者的本征品质因子 Q_{int} 分别为 1.6×10^6 和 7.5×10^5 。所制作的尺寸相同的器件中都可以观测到相似的行为,表明该设计在制造中很容易复现。

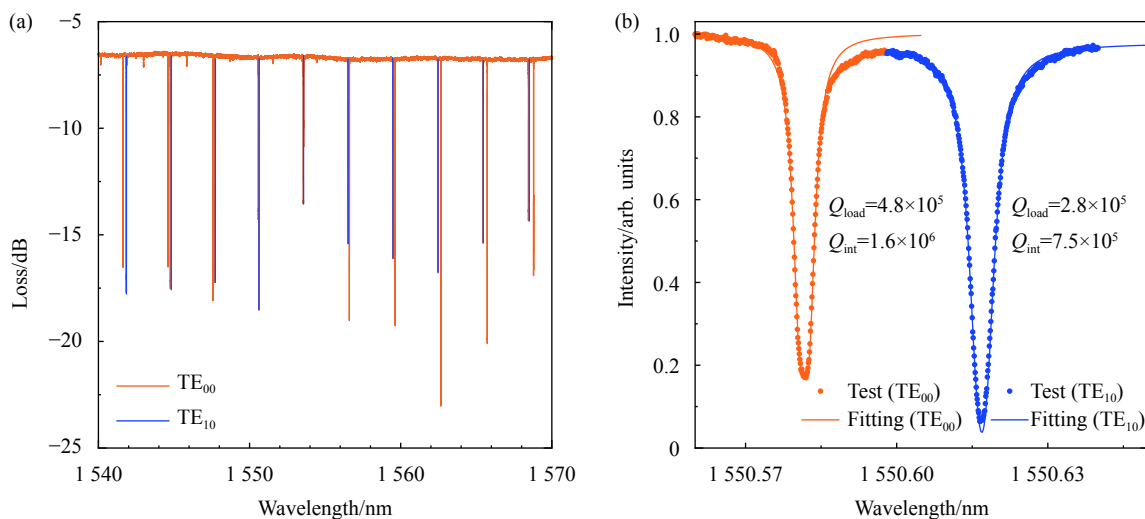


图 3 (a) TE₀₀ 和 TE₁₀ 在波长 1540~1570 nm 的透射谱; (b) 两个紧邻模式在 1550 nm 附近的透射谱放大图

Fig.3 (a) Transmission spectrum of the TE₀₀ and TE₁₀ in the wavelength range from 1540 nm to 1570 nm; (b) Zoomed-in region of the two close resonances near 1550 nm

3 倍频程 DKS 的测试

逐渐加大泵浦功率,测试了微环在不同输入功率下 1550 nm 附近的泵浦传输曲线,设置可调谐激光器的波长扫描范围为 1550.55~1550.95 nm,扫描速度为 1 nm/s。图 4 为测试获得的泵浦功率为 20~430 mW 时 TE₀₀ 模式和 TE₁₀ 模式在 1550 nm 附近的透射谱。泵浦功率在 20~330 mW 时,透射峰由低功率的洛伦兹形变成三角形,如图中虚线部分曲线所示,并且随着功率的增大吸收峰越来越宽,透射峰为两个模式谐振峰的简单叠加。当泵浦功率为 340 mW 时,在两个模式之间会出现一个小台阶,即为孤子台阶,宽度约为 80 pm,此时 TE₁₀ 模式已经开始辅助平衡腔热。随着功率继续增大,孤子台阶的宽度逐渐减小(图中三角形阴影部分即为每个功率下的孤子台阶范围),孤子台阶宽度变化率约为 -11 pm/10 mW。当泵浦功率为 420 mW 时,孤子台阶消失。可见,对于特定间隔的泵浦和辅助模式,需要采用合适的泵浦功率才能实

现孤子状态。

选择泵浦功率为 350 mW,从 TE₀₀ 谐振峰的蓝失谐侧开始正向扫描泵浦波长,随着失谐量的增加,谐振腔中的光谱呈现五种状态演化过程,如图 5(a) 所示。

首先观察到主梳(光谱 i),此时腔内功率不高。当继续增大泵浦波长时,频谱向调制不稳定 MI 梳(光谱 ii)变化,频率范围为 140~260 THz,并且在 255 THz 处观察到类似色散波(Dispersion Wave, DW)的凸起部分。梳齿边缘包络不光滑,此时梳齿的噪声较大且不稳定,频梳也没有实现倍频程展宽。图 5(b) 为泵浦传输曲线示意图,其中 TE₀₀ 模式谐振区域,包括光谱 i 和光谱 ii 所在的孤子台阶蓝失谐侧和孤子台阶。随着泵浦波长逐渐靠近 TE₀₀ 模式谐振波长,耦合进入腔内的功率增多,所以泵浦传输功率随着泵浦波长的增大而逐渐减小。继续增大泵浦波长,频谱由 MI 梳向孤子梳(光谱 iii,光谱 iv)变化。孤子 1 和孤子 2 的频率范围为 130~273 THz (1100~2300 nm),实现了倍频程的 DKS,并且由于孤子诱导的切伦科夫辐射,在

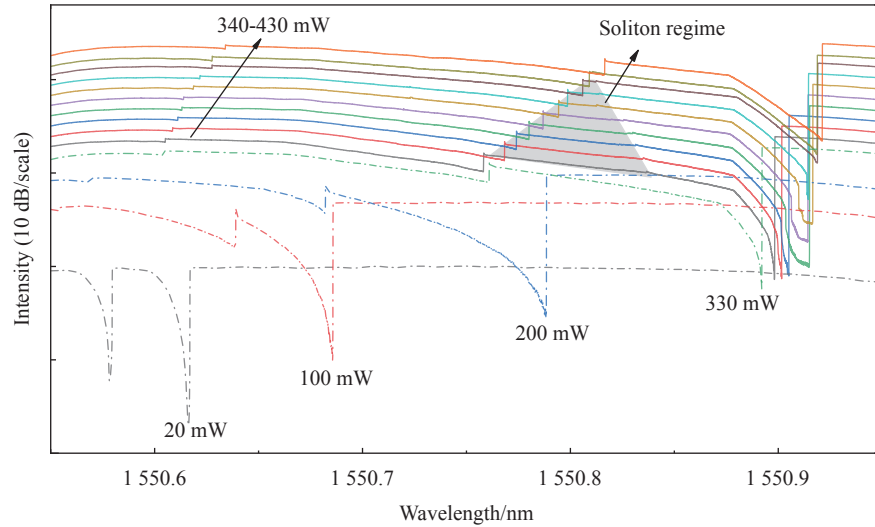


图 4 不同功率下 (20~430 mW)TE₀₀ 模式和 TE₁₀ 模式在 1550 nm 附近的透射谱

Fig.4 Transmission spectrum of TE₀₀ and TE₁₀ near 1550 nm at different powers (20-430 mW)

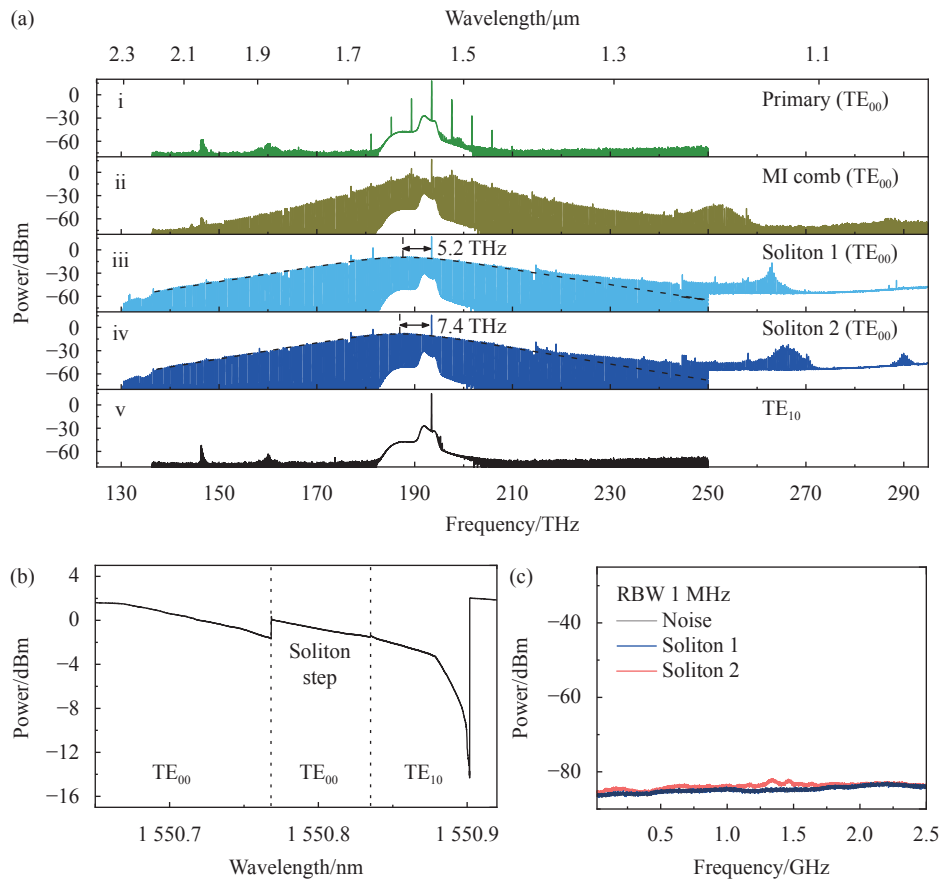


图 5 泵浦功率为 350 mW 时, (a) 通过增加泵浦波长得到从 i 到 v 的频谱演化过程图; (b) 泵浦传输功率示意图; (c) 两个孤子态梳和 MI 态梳的拍频噪声测量结果, 以及 PD 的本底噪声

Fig.5 When the pump power is 350 mW, (a) the spectral evolution process from i to v is obtained by increasing the pump wavelength; (b) Schematic of the power of pump transmission; (c) Measurements of the beat frequency noise of the two soliton combs and the MI state comb, and the background noise of PD

264 THz 处观察到 DW, 使孤子梳扩宽到正常色散区。

孤子 1 和孤子 2 的梳齿包络非常光滑, 测量上述的 MI 态梳和两个孤子态梳的拍频噪声, 并与 PD 的本底噪声作对比, 结果如图 5(c) 所示。黑线为 PD 的本底噪声, 蓝线和红线分别为孤子 1 和孤子 2 与 MI 梳的拍频噪声, 由图可得孤子 1 和孤子 2 的噪声强度在宽带范围内都低至 PD 的本底噪声水平, 因此证明了低噪声 DKS 的产生。对梳齿包络按照 sech^2 函数拟合, 孤子 1 的 3 dB 带宽为 15.2 THz, 包含 40 根梳齿, 孤子 2 的 3 dB 带宽为 12.3 THz, 包含 33 根梳齿。由于腔内发生拉曼自频移效应^[24] 导致孤子 1 和孤子 2 的中心频率相对于泵浦频率都发生了偏移, 偏移量分别为 5.2 THz 和 7.4 THz。孤子 1 和孤子 2 都处于图 5(b) 中 TE_{00} 模式谐振的孤子台阶区, 孤子台阶范围为 67 pm。当继续增大泵浦波长时, 微环谐振腔跳出 TE_{00} 谐振进入 TE_{10} 谐振 (光谱 v), 由前面的低功率测试可得: TE_{10} 模式的 Q 值相较于基模低很多, 因此在光谱 v 中只能看到微弱的四波混频边带, 这也减小了高阶模与基模之间的竞争, 更有利于 DKS 的产生。

4 结 论

提出了一种基于 AIN 微环谐振腔的倍频程 DKS, 通过相邻红失谐侧的高阶横模来辅助基横模, 补偿微腔内功率变化并稳定腔内热效应, 从而实现单一泵浦稳定访问倍频程 DKS。通过设计反常色散和两个谐振模式相邻的结构来实现 DKS 的稳定访问。同时, 采用低成本、易于大面积制作的紫外光刻定义图形, 通过三层掩膜逐步将图形转移到 AIN 波导层, 实现了高品质 AIN 微环的制备。在单泵浦的连续波长扫描入射下测试获得 130~273 THz (1 100~2 300 nm) 宽的倍频程 DKS, 其最长孤子台阶为 83 pm。接下来需要进一步优化器件的设计与制作工艺以提高微环的品质因子 Q , 降低损耗, 并为光频梳的表征和应用做铺垫工作。

参考文献:

[1] Del'Haye P, Schliesser A, Arcizet O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator [J]. *Nature*, 2007, 450(7173): 1214-1217.

[2] Gaeta A L, Lipson M, Kippenberg T J, et al. Photonic-chip-based frequency combs [J]. *Nature Photon*, 2019, 13: 158-169.

[3] Kovach A, Chen D Y, He J H, et al. Emerging material systems for integrated optical Kerr frequency combs [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(1): 135-222.

[4] Wang M Y, Fan L K, Wu L F, et al. Research on Kerr optical frequency comb generation based on MgF_2 crystalline microresonator with ultra-high- Q factor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210481. (in Chinese)

[5] Xue X X, Xu Y, Wang P H, et al. Normal-dispersion microcombs enabled by controllable mode interactions [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(4): L23-L28.

[6] Yu M J, Okawachi Y, Griffith A G, et al. Modelocked mid-infrared frequency combs in a silicon microresonator [J]. *Optica*, 2016, 3(8): 854-860.

[7] Weng H Z, Liu J, Afridi A A, et al. Octave-spanning Kerr frequency comb generation with stimulated Raman scattering in an AIN microresonator [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3): 540-543.

[8] Wang C, Zhang M, Yu M J, et al. Monolithic lithium niobate photonic circuits for Kerr frequency comb generation and modulation [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 978.

[9] Chang L, Xie W Q, Shu H W, et al. Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1313.

[10] Chen H J, Ji Q X, Wang H M, et al. Chaos-assisted two-octave-spanning microcombs [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2336.

[11] Moille G, Li Q, Briles T C, et al. Broadband resonator-waveguide coupling for efficient extraction of octave spanning microcombs [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(19): 4737-4740.

[12] Kuse N, Tetsumoto T, Navickaite G, et al. Continuous scanning of a dissipative Kerr microresonator soliton comb for broadband, high resolution spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 927-930.

[13] Haojing Chen, Yunfeng Xiao. Applications of integrated microresonator-based optical frequency combs in precision measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210560. (in Chinese)

[14] Pfeiffer M H P, Herkommer C, Liu J Q, et al. Octave-spanning dissipative Kerr soliton frequency combs in Si_3N_4 microresonators [J]. *Optica*, 2017, 4(7): 684-691.

[15] Li Q, Briles T C, Westly D A, et al. Stably accessing octave-spanning microresonator frequency combs in the soliton regime [J]. *Optica*, 2017, 4(2): 193-203.

[16] Brasch V, Geiselmann M, Herr T, et al. Photonic chip-based

- optical frequency comb using soliton Cherenkov radiation [J]. *Science*, 2015, 351(6271): 357-360.
- [17] Joshi C, Jang J K, Luke K, et al. Thermally controlled comb generation and soliton modelocking in microresonators [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2565-2568.
- [18] Wan S, Niu R, Wang Z Y, et al. Frequency stabilization and tuning of breathing solitons in Si_3N_4 microresonators [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(8): 1342-1349.
- [19] Weng H Z, Afridi A A, Liu J, et al. Near-octave-spanning breathing soliton crystal in an AlN microresonator [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(14): 3436-3439.
- [20] Liu X W, Gong Z, Bruch A W, et al. Aluminum nitride nanophotonics for beyond-octave soliton microcomb generation and self-referencing [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-7.
- [21] Weng H Z, Afridi A A, Li J, et al. Dual-mode microresonators as straightforward access to octave-spanning dissipative Kerr solitons [J]. *arXiv*, 2022: 2202.09786.
- [22] Weng H Z, Liu J, Afridi A A, et al. Directly accessing octave spanning dissipative Kerr soliton frequency combs in an AlN microresonator [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1351-1357.
- [23] Liu J, Weng H Z, Afridi A A, et al. Photolithography allows high- Q AlN microresonators for near octave-spanning frequency comb and harmonic generation [J]. *Optics Express*, 2020, 28(13): 395013.
- [24] Yi X, Yang Q F, Yang K Y, et al. Theory and measurement of the soliton self-frequency shift and efficiency in optical microcavities [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3419-3422.