

光学学报

基于氟化镁微腔孤子光频梳的低相噪微波信号产生

戴健^{1,2*}, 李鑫敏^{1,2}, 刘安妮^{1,2}, 侯迎港^{1,2}, 徐坤^{1,2}

¹北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;

²北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 集成化和低相噪是微波信号源发展的必然趋势和实用化基础,高相干微腔孤子光频梳拍频为新型的集成低相噪微波信号产生提供了有效技术途径。基于高品质氟化镁晶体微盘腔实现了孤子锁模光频梳的稳定生成与相干拍频,最终得到频率为 15.38 GHz 的低相噪微波信号,其相位噪声水平达到 -120 dBc/Hz@10 kHz,表现出小型化和低相噪的应用优势,有望成为未来集成化高性能微波信号源发展的重要技术支撑。

关键词 信号处理; 氟化镁晶体微腔; 孤子光频梳; 微波信号产生; 低相噪; 集成化

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2007001

Low Phase Noise Microwave Signal Generation Based on Soliton Frequency Comb in MgF₂ Microresonator

Dai Jian^{1,2*}, Li Xinmin^{1,2}, Liu Anni^{1,2}, Hou Yinggang^{1,2}, Xu Kun^{1,2}

¹School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

²State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract Integration and low phase noise are the inevitable trend and practical basis for the development of microwave signal sources. The highly coherent soliton frequency combs in microresonators provide an effective technical approach for the generation of new integrated low-phase noise microwave signals. In this paper, the stable generation and coherent beat frequency of soliton mode-locked frequency comb are realized based on a high-quality magnesium fluoride crystal microdisk cavity. Finally, 15.38 GHz microwave signal with the phase noise of -120 dBc/Hz@10 kHz is obtained, which shows the application advantages of miniaturization and low phase noise. It will provide an important technical support for the development of integrated high-performance microwave signal sources in the future.

Key words signal processing; magnesium fluoride crystal microcavity; soliton frequency comb; microwave signal generation; low phase noise; integration

1 引言

高品质微波信号源是精密科学测量研究和现代电子信息系统的核心部件,其相位噪声性能直接决定了系统设备的灵敏度和可靠性,并且其集成化发展有助于推动弹载、机载和星载等小型平台的适用性,因此,低相噪可集成微波信号源对于我国基础科学发展、产业应用以及国防安全等方面具有重要的研究意义^[1]。

传统微波信号源主要包括石英晶振和介质振荡器

两种类型。石英晶振的输出信号频率较低^[2],需要通过倍频方式生成高频微波信号,微波信号的相位噪声性能将随着倍频比的增加而恶化。介质振荡器的品质因子随着输出频率的增加而降低,严重限制了高频段微波信号的相位噪声性能。因此,基于长光纤储能链路的低相噪光电振荡器技术^[3]应运而生,其输出微波信号的相位噪声性能与工作频段无关,是高频电子系统非常理想的信号发生装置。虽然作为高品质电磁储能介质的低损耗长距离光纤可以使光电振荡器获得超

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-04-12; 录用日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(61971065)、北京邮电大学博士生创新基金(CX2020225)

通信作者: *daijian@bupt.edu.cn

低的相位噪声,但同时也导致光电振荡器超模噪声严重和对环境振动敏感,并且难以满足小型化平台应用场景需求。

基于微腔孤子光频梳的低相噪微波信号产生技术为高性能微波/毫米波信号源带来了新的发展机遇,微腔孤子光频梳^[4]相干性强且梳齿间距相等,为集成低相噪微波/毫米波源提供了绝佳载体,经过相干拍频后即可直接产生低相噪微波/毫米波信号。2014年,Herr等^[5]在氟化镁晶体腔中实现孤子光频梳的产生,开启了微腔孤子光频梳研究的新篇章;2020年,Liu等^[6]基于大马士革微纳加工技术制备的氮化硅微环腔实现孤子光频梳和低相噪微波(X和K波段)信号产生,生成的10 GHz微波信号的相位噪声水平达到 -100 dBc/Hz@10 kHz;2021年,Bai等^[7]利用品质因子为 10^7 的二氧化硅微盘腔实现了布里渊孤子光频梳产生,生成的10 GHz微波信号的相位噪声水平达到 -130 dBc/Hz@10 kHz。

得益于氟化镁微腔品质因子高(10^9 量级)、体积小(直径mm量级)、热光系数小和机械稳定性高等特点,氟化镁孤子光频梳具有阈值低、结构紧凑、噪声极限低和抗振动等优势,基于氟化镁微腔孤子光频梳的低相噪微波信号产生技术有望促进未来集成化、低功耗和低相噪微波/毫米波信号源的发展,在弹载、机载和星载等小型移动平台上将表现出独特技术优势和广阔应用潜力。我国目前基于氟化镁微腔孤子光频梳的实践产生及其在低相噪微波信号产生领域的应用研究尚处于空白阶段^[8-10]。

本文基于高品质氟化镁晶体微腔孤子光频梳拍频最终成功实现了15.38 GHz微波信号的产生,信号相位噪声水平达到 -120 dBc/Hz@10 kHz,这也为基于相干孤子光频梳拍频技术实现集成低相噪微波信号源提供了重要技术和实践积累。

2 原理模型

基于氟化镁微腔孤子光频梳的低相噪微波信号产生是新颖的集成光生微波技术途径,主要包括相干微腔孤子光频梳的产生与拍频过程,原理如图1所示,图中 f_{signal} 表示拍频生成的微波信号的频率, f_{rep} 表示孤子光频梳的重复频率。氟化镁微腔孤子光频梳的梳线之间保持高度相干的相位关系和间距相等的频率间隔(重复频率可覆盖几GHz至几十GHz范围),通过高速光电探测器拍频便可实现频率与光梳重复频率相同的低相噪微波信号的生成。

氟化镁微腔孤子光频梳为低相噪可集成微波信号源提供了关键基础。微腔孤子光频梳产生动力学过程主要受到泵浦功率、频率失谐以及微腔本征参数(损耗、色散和三阶克尔非线性系数)等因素^[11-12]的共同作用。因此,氟化镁微腔光频梳的演化过程可以通过LLE(Lugiato-Lefever Equation)^[13]方程从时域角度描述为

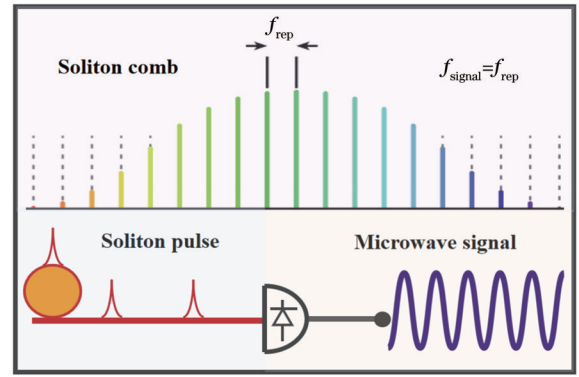


图1 基于氟化镁微腔孤子光频梳的低相噪微波信号产生原理
Fig. 1 Principle of low phase noise microwave signal generation based on soliton frequency comb in MgF₂ microresonator

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

式中: t_R 为光场沿氟化镁微腔传播一圈的时间; α 和 θ 分别为氟化镁微腔的整体损耗和耦合系数; l_c 为氟化镁微腔的周长; δ_0 为泵浦频率与冷腔谐振模式之间的失谐量; β_k 和 γ 分别为氟化镁微腔的第 k 阶色散系数和克尔非线性系数; E_{in} 代表泵浦光场; τ 为腔内光场包络函数的角位置; $E(t, \tau)$ 为氟化镁腔内光场的包络。

基于LLE方程设置合理参数,其中激光泵浦功率 $P_{\text{in}} = |E_{\text{in}}|^2 = 200$ mW,光场在氟化镁微腔中传播一周的时间 $t_R = 65$ fs,氟化镁微腔的整体损耗系数和耦合系数满足 $\alpha = \theta = 1.75 \times 10^{-5}$,氟化镁微腔周长 $l_c = 14$ mm,氟化镁微腔二阶色散系数和克尔非线性系数分别为 $\beta_2 = -13$ ps²·km⁻¹和 $\gamma = 10^{-4}$ W⁻¹·m⁻¹。改变泵浦频率与腔模谐振频率之间的失谐量 δ_0 ,在泵浦频率由蓝失谐侧逐渐扫描靠近谐振模式并最终跨越腔模而进入红失谐侧的过程中,氟化镁微腔克尔光频梳依次经历了调制不稳定性光频梳^[14](包括主梳、次梳、混沌梳)到孤子锁模光频梳的演化,如图2(a)所示,其中I、II和III图分别表示氟化镁微腔主梳、次梳和混沌梳状态的光谱,IV和V图分别表示氟化镁微腔多孤子光频梳和单孤子光频梳状态的光谱。

氟化镁微腔孤子锁模光频梳的产生不仅依赖于克尔非线性与反常色散、参量增益与微腔损耗的双重平衡条件[图2(b)],还需要克服泵浦光频率进入红失谐区域时腔内光功率骤降造成的热不稳定问题^[5]。因此,泵浦光频率的调谐时间需要短于氟化镁晶体微腔的热响应时间(约为 $1 \mu\text{s} \sim 0.1$ ms),以保证氟化镁微腔温度接近平衡状态时泵浦光频率能够有效调谐至孤子台阶对应的失谐量处。产生的氟化镁微腔孤子光频梳在系统无任何主动外部反馈的条件下可以保持稳定运行,这主要归功于孤子光频梳的双稳态机制^[11]

[图 2(c)], 腔内平均功率的失谐变化主要由有效蓝失谐的孤子分量控制, 当失谐量继续增加时, 孤子分量将出现更大的非线性相移, 保持了泵浦激光与腔模等效

失谐量的相对稳定, 最终使得氟化镁微腔孤子光频梳保持稳定运行状态。

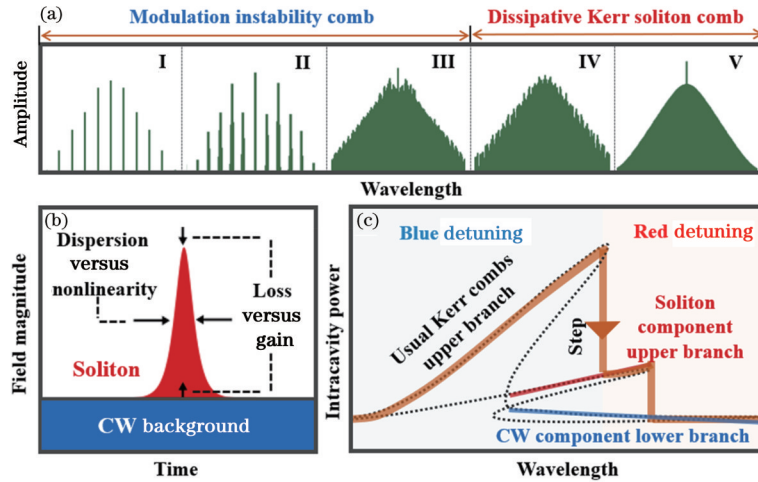


图 2 氟化镁微腔光频梳光谱演化以及孤子的产生条件和稳定机制。(a)光谱演化图;(b)孤子产生条件;(c)孤子双稳态机制
Fig. 2 Spectral evolution of optical frequency comb and soliton generation conditions and stabilization mechanism in MgF_2 microresonator. (a) Spectral evolution; (b) generation conditions of soliton; (c) bistable mechanism of soliton

在氟化镁微腔孤子光频梳产生的基础上, 相干梳拍频为低相噪微波信号生成提供了转换“桥梁”。在氟化镁微腔调制不稳定性光频梳的演化过程中^[14]: 主梳梳齿虽然有着较强的相干性和规则的时域脉冲[图 3(a)中 I 图], 但主梳梳齿的频率间隔通常超出光电探测器的响应带宽, 导致无法拍频得到微波信号[图 3(b)中 I 图]; 子梳梳齿的延展和偏移导致时域脉冲逐渐杂乱[图 3(a)中 II 图], 在光电探测器的有效响应带宽内检测到多个射频频率的拍频信号[图 3(b)中 II 图]; 混沌梳形成时无规则的时域脉冲表明混沌梳梳齿间噪声极大[图 3(a)中 III 图], 在射频域观测到多频宽带的拍频信号[图 3(b)中 III 图]。因此, 氟化镁微腔调制不稳定性光频梳不适用于低相噪微波信号的产生。

与调制不稳定性光频梳不同, 氟化镁微腔孤子光频梳工作在相干锁模状态, 拍频信号具有纯净的射频频谱, 非常适用于低相噪微波信号产生。氟化镁微腔孤子光频梳在时域上表现为由连续泵浦光在微腔中转化成的锁模光脉冲序列, 时域脉冲个数对应腔内孤子个数[图 3(a)中 IV 图所示 6 孤子时域脉冲对应图 2(a)中 IV 图所示的 6 孤子状态, 图 3(a)中 V 图所示单孤子时域脉冲对应图 2(a)中 V 图所示的单孤子状态], 并且时域脉冲周期与微腔自由光谱范围互为倒数。将氟化镁微腔孤子锁模光频梳经过相干拍频转换至射频域后能够得到低相噪微波信号, 射频信号功率随着腔内孤子个数的减少而降低[图 3(b)中 IV 和 V 图所示], 并且射频信号频率与孤子光频梳相邻梳齿间的频差相等。

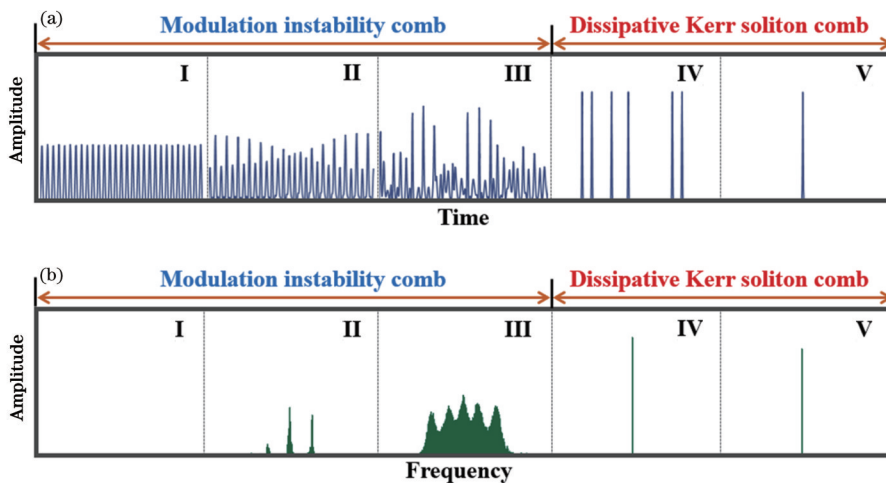


图 3 氟化镁微腔光频梳光谱演化过程对应的时域和射频域演化。(a)时域演化;(b)射频域演化
Fig. 3 Time and radio frequency (RF) domain evolutions corresponding to spectral evolution of MgF_2 microresonator. (a) Time domain evolution; (b) RF frequency domain evolution

根据上述分析,锁模状态的氟化镁微腔孤子光频梳经过相干拍频后即可直接生成低相噪微波信号,输出微波信号具有射频频谱纯净、频率与梳齿间隔相等以及长时间稳定运行等优势。因此,基于氟化镁微腔孤子锁模光频梳的低相噪微波信号产生技术有望成为未来小型化低相噪微波/毫米波信号源发展的新兴选择。

3 实验结果

基于氟化镁微腔孤子光频梳的低相噪微波信号产生实验装置如图 4 所示,主要包括氟化镁微腔孤子光频梳产生与拍频两部分模块。首先,函数发生器 (Keysight, 33500B series) 控制可调谐激光器 (New Focus, TLB-6700) 的调频速率和范围,输出泵浦光功率经过掺铒光纤放大器放大至 250 mW,后端级联光

学带通滤波器 (中心波长为 1550 nm) 有效抑制了光放大器的自发辐射噪声,利用低损耗 (<0.2 dB) 锥形光纤将放大后的泵浦光耦合进入高品质氟化镁晶体微腔中,泵浦光频率通过快速调频方法从腔模蓝失谐侧调谐至红失谐区域进而生成氟化镁微腔孤子光频梳;其次,氟化镁微腔孤子光频梳利用窄带带阻滤波器将泵浦光功率抑制 20 dB 后馈入高速光电探测器 (Discovery, DSC40S) 中,经过相干拍频后,射频频谱分析仪能够测量得到拍频微波信号的频谱特性和相位噪声性能;最后,氟化镁微腔输出端部分光功率还馈入光谱分析仪和示波器等相关监测设备中,光谱分析仪和示波器分别用于观测氟化镁微腔克尔光频梳的光谱演化特性和腔内功率状态 (包括氟化镁晶体微腔热三角和孤子台阶)。

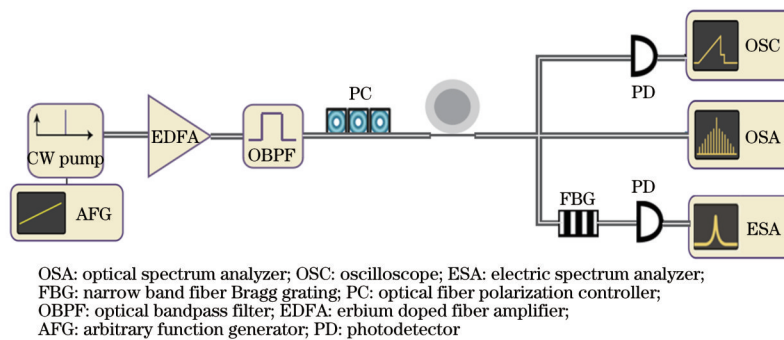


图 4 基于氟化镁微腔孤子光频梳的低相噪微波信号产生实验方案图

Fig. 4 Experimental scheme of low phase noise microwave signal generation based on soliton optical frequency comb in MgF_2 microresonator

本文使用课题组自制的超高品质氟化镁晶体回音壁微盘腔实现相干孤子锁模光频梳和低相噪微波信号产生。氟化镁晶体回音壁微盘腔形貌如图 5 (a) 所示,腔体赤道直径约为 4.5 mm,相应的微腔自由频谱范围约为 15.38 GHz。因此,氟化镁微腔孤子光频梳的重复频率与相干拍频微波信号的频率均为 15.38 GHz,微小的腔体尺寸也为集成低相噪微波信号源提供了重要支撑。氟化镁回音壁微盘腔利用超精密抛光技术加工制成,具有极低的散射损耗和极高

的品质因子,通过光域衰荡法^[15]测得氟化镁微盘腔 Q 值高达 10^9 量级,腔内能量衰荡波形测量结果如图 5 (b) 所示。氟化镁晶体微腔内输入功率在超高品质储能作用下得到谐振增强,极大降低了孤子锁模光频梳产生所需的功率阈值^[11-12]。此外,氟化镁晶体微盘腔较大的模式体积和极小的热光系数也保证了拍频微波信号优异的噪声性能^[16]。因此,基于氟化镁微腔孤子光频梳的微波信号源具有小型化、低功耗和低相噪的应用优势。

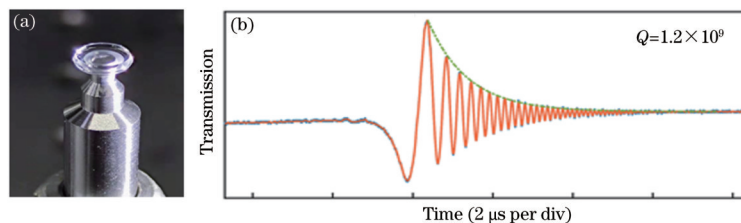


图 5 氟化镁微盘腔形貌和 Q 值表征。(a) 氟化镁微盘腔形貌图;(b) 衰荡波形和 Q 值测量结果

Fig. 5 Morphology and Q value of MgF_2 microresonator. (a) MgF_2 microresonator morphology; (b) ring-down waveform and Q measurement

在微腔热效应导致的腔模偏移以及自相位调制和交叉相位调制^[12]导致的克尔非线性相移的共同作用下,氟化镁晶体微盘腔的透射谱明显展宽,呈现出热三角状态和孤子台阶特征,如图 6 (a) 所示。函数发生器

输出斜坡信号的斜率和始末电压值能够分别控制泵浦光的扫频速率和调频范围,通过设置合适的调谐参数 (本文使用 25 GHz/s 调谐速率和 10 MHz 调频范围) 可以使泵浦光频率跨越氟化镁微盘腔腔模且稳定于孤子

台阶范围内,如图 6(b)所示。此时,光谱分析仪测量的氟化镁微腔孤子光频梳光谱如图 6(c)所示,氟化镁微腔孤子光频梳的光谱范围超过 60 nm,具有平滑的光谱包络和等距的梳齿间隔,插图部分为 1550 nm 中心波长处 10 nm 波长范围内氟化镁微腔孤子光频梳的

梳齿细节,梳齿间隔约为 15.38 GHz。在实验过程中,通过提高输入泵浦光功率能够扩展氟化镁微腔孤子台阶的长度,泵浦光频率将更有效地稳定于孤子存在的范围,进而保证氟化镁微腔孤子光频梳的可靠产生与稳定存在。

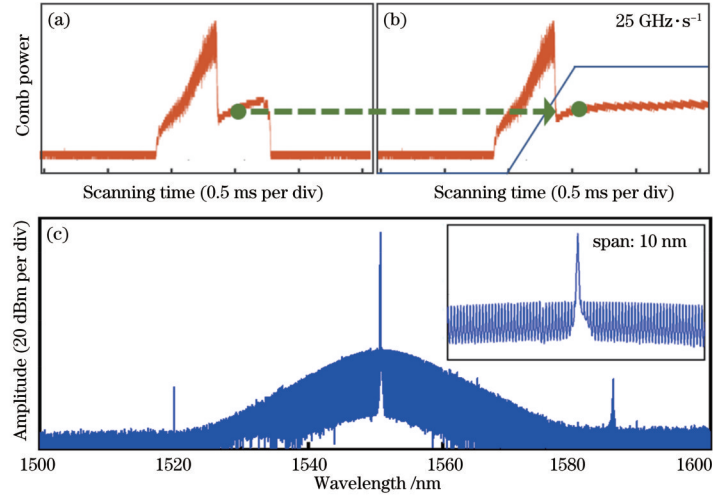


图 6 氟化镁微腔孤子台阶及对应的扫频参数和孤子频梳光谱。(a) 孤子台阶;(b) 泵浦激光扫频速度和扫频范围;(c) 100 nm 和 10 nm 范围内孤子光谱测量结果

Fig. 6 Soliton steps, sweep parameters, and soliton comb of MgF_2 microresonator. (a) Soliton steps; (b) sweep speed and sweep range of pump laser; (c) measured results of soliton comb in 100 nm and 10 nm ranges

氟化镁微腔孤子光频梳的演化过程还可以通过射频频谱分析仪借助拍频信号频谱特征进行持续观测。如图 7 所示:在氟化镁微腔孤子锁模光频梳生成之前,拍频信号射频频域表现为低功率高噪声和多频宽带特

征;当氟化镁微腔孤子锁模光频梳产生后,拍频信号射频频域表现为 15.38 GHz 点频和高功率低噪声特性,并且可以长时间保持稳定运行状态。

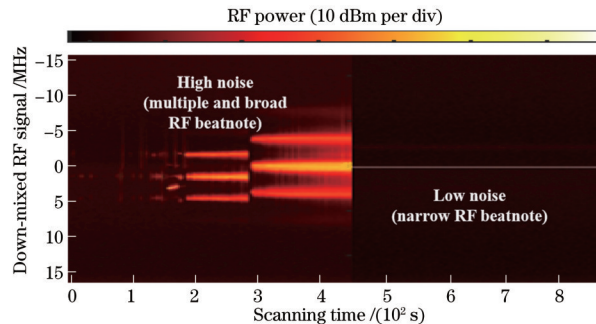


图 7 射频频谱演化图

Fig. 7 Evolution in RF frequency domain

最终,图 6(c)所示的氟化镁晶体微腔孤子光频梳经过相干拍频后生成频谱纯净的 15.38 GHz 微波信号,射频频谱如图 8(a)所示。由于氟化镁晶体回音壁微腔的模式体积较大且热光系数极小,基于氟化镁晶体微腔孤子光频梳产生的微波信号具有纯净的射频频谱和优异的相位噪声性能,最终生成的 15.38 GHz 微波信号的相位噪声性能分别达到 $-120 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$ 和 $-132 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ MHz}$ (自由运行状态下),如图 8(b)所示。氟化镁微腔孤子光频梳具有优异的相干特性和纯净的射频频谱,拍频信号的频率与微腔自由光谱范围、孤子脉冲重复频率以及锁模光频梳梳

齿间距均相等,因此,氟化镁晶体微腔孤子光频梳技术为集成低相噪微波/毫米波信号源的发展提供了重要的技术途径。

4 结 论

氟化镁微腔孤子光频梳具有光谱包络平滑和射频频谱纯净等特性,在微波信号产生技术领域呈现出小型化、低功耗和低相噪等优势。本文基于高品质氟化镁晶体微腔孤子光频梳拍频实现了频率为 15.38 GHz 的低相噪微波信号产生,10 kHz 频偏处信号相位噪声水平达到 -120 dBc/Hz 。因此,基于氟化镁微腔孤子

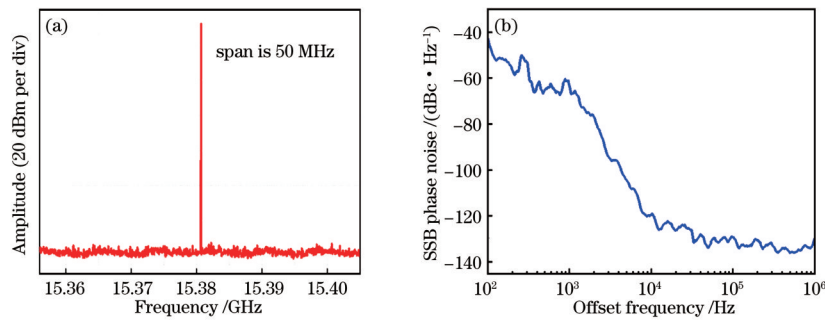


图8 15.38 GHz微波信号的射频频谱与相位噪声测量结果。(a)射频频谱;(b)相位噪声

Fig. 8 RF spectrum and phase noise of 15.38 GHz microwave signal. (a) RF spectrum; (b) phase noise

光频梳的低相噪微波信号产生技术将有助于进一步推动微波信号源的集成化与实用化发展,在测控、雷达、通信、导航、电子对抗和天文等领域具有极其广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Marpaung D, Roeloffzen C, Heideman R, et al. Integrated microwave photonics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(4): 506-538.
- [2] Peter M, Strandberg M W P. Phase stabilization of microwave oscillators[J]. *Proceedings of the IRE*, 1955, 43(7): 869-873.
- [3] Yao X S, Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, 13(8): 1725-1735.
- [4] Diddams S A, Vahala K, Udem T. Optical frequency combs: coherently uniting the electromagnetic spectrum [J]. *Science*, 2020, 369(6501): eaay3676.
- [5] Herr T, Brasch V, Jost J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(2): 145-152.
- [6] Liu J Q, 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.
- [7] Bai Y, Zhang M H, Shi Q, et al. Brillouin-Kerr soliton frequency combs in an optical microresonator[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(6): 063901.
- [8] 沈远, 孟令俊, 王梦宇, 等. 氟化镁楔形微腔色散调控及孤子产生数值分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0323001.
Shen Y, Meng L J, Wang M Y, et al. Dispersion engineering of magnesium fluoride wedge resonator and numerical analysis for soliton generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0323001.
- [9] 张新亮, 赵延菁. 微腔光频梳研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823014.
Zhang X L, Zhao Y J. Research progress of microresonator-based optical frequency combs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823014.
- [10] 王梦宇, 范乐康, 吴凌峰, 等. 基于超高Q值氟化镁晶体微腔的克尔光频梳产生研究[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(11): 20210481.
Wang M Y, Fan L K, Wu L F, et al. Research on Kerr optical frequency comb generation based on MgF₂ crystalline microresonator with ultra-high-Q factor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210481.
- [11] Yi X, Yang Q F, Yang K Y, et al. Soliton frequency comb at microwave rates in a high-Q silica microresonator [J]. *Optica*, 2015, 2(12): 1078-1085.
- [12] Kippenberg T J, Spillane S M, Vahala K J. Kerr-nonlinear optical parametric oscillation in an ultrahigh-Q toroid microcavity[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(8): 083904.
- [13] 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.
- [14] Herr T, Hartinger K, Riemensberger J, et al. Universal formation dynamics and noise of Kerr-frequency combs in microresonators[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 480-487.
- [15] Lecaplain C, Javerzac-Galy C, Gorodetsky M L, et al. Mid-infrared ultra-high-Q resonators based on fluoride crystalline materials[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13383.
- [16] Matsko A B, Maleki L. On timing jitter of mode locked Kerr frequency combs[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28862-28876.