



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106471685 B

(45)授权公告日 2019.07.09

(21)申请号 201580005274.2

专利权人 美国商务部

(22)申请日 2015.01.26

(72)发明人 凯丽·瓦哈拉 李江

(65)同一申请的已公布的文献号

斯科特·迪达姆斯 易煦 李韩锡

申请公布号 CN 106471685 A

(74)专利代理机构 北京安信方达知识产权代理有限公司 11262

(43)申请公布日 2017.03.01

代理人 张瑞 郑霞

(30)优先权数据

61/931,060 2014.01.24 US

61/982,749 2014.04.22 US

(51)Int.Cl.

H01S 3/091(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2016.07.21

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2015/012962 2015.01.26

(87)PCT国际申请的公布数据

W02015/163954 EN 2015.10.29

(56)对比文件

CN 1905294 A,2007.01.31,

CN 102013621 A,2011.04.13,

CN 101355227 A,2009.01.28,

CN 102013622 A,2011.04.13,

CN 106471685 A,2017.03.01,

US 7272160 B1,2007.09.18,

(73)专利权人 加州理工学院

审查员 郑子川

地址 美国加利福尼亚州

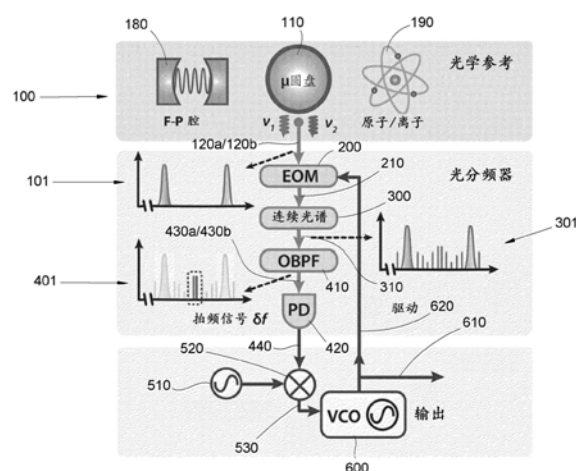
权利要求书2页 说明书23页 附图11页

(54)发明名称

双频光源

(57)摘要

一种双频光源,包括:(a)第一和第二泵浦激光光源,其被布置以生成在各自的第一和第二泵浦激光频率 $\nu_{\text{泵浦1}}$ 和 $\nu_{\text{泵浦2}}$ 处的光学泵浦功率;以及(b)光学谐振器,其由布里渊移频 ν_B 和自由光谱范围来表征,该自由光谱范围大体上等于布里渊移频的整数约数。第一和第二泵浦激光光源中的每一个被锁频至光学谐振器的相应的谐振光学模式。在各自的第一和第二输出频率 $\nu_1 = \nu_{\text{泵浦1}} - \nu_B$ 和 $\nu_2 = \nu_{\text{泵浦2}} - \nu_B$ 处的双频光学参考源的第一和第二光输出信号包括分别由第一和第二泵浦激光光源对光学谐振器的同时光学泵浦而生成的受激布里渊激光输出。输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约300GHz。



1. 一种双频光源,包括:

(a) 第一泵浦激光源和第二泵浦激光源,其被布置以生成在各自的第一泵浦激光频率 $\nu_{\text{泵浦1}}$ 和第二泵浦激光频率 $\nu_{\text{泵浦2}}$ 处的光学泵浦功率;和

(b) 光纤光学谐振器,其显示布里渊移频 ν_B 和自由光谱范围,所述自由光谱范围大体上等于所述布里渊移频的整数约数,

其中:

(c) 所述第一泵浦激光源和第二泵浦激光源中的每一个被锁频至所述光纤光学谐振器的相应的谐振光学模式;

(d) 所述双频光源的在各自的第一输出频率 $\nu_1 = \nu_{\text{泵浦1}} - \nu_B$ 和第二输出频率 $\nu_2 = \nu_{\text{泵浦2}} - \nu_B$ 处的第一光学输出信号和第二光学输出信号包括分别由所述第一泵浦激光源和第二泵浦激光源对所述光纤光学谐振器的同时光学泵浦而生成的受激布里渊激光输出;

(e) 输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约300GHz;以及

(f) 所述光纤光学谐振器包括大于或等于大约100米长的光纤。

2. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述光纤光学谐振器的所述自由光谱范围大体上等于所述光纤光学谐振器的所述布里渊移频。

3. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述光纤光学谐振器包括光纤法布里-珀罗光学谐振器。

4. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述光纤光学谐振器包括光纤回路光学谐振器。

5. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述光纤光学谐振器包括大于或等于大约200米长的光纤。

6. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述光纤光学谐振器包括大于或等于大约500米长的光纤。

7. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述光纤光学谐振器包括二氧化硅,并且所述光纤光学谐振器的所述布里渊移频大约为10.9GHz。

8. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约1THz。

9. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约10THz。

10. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约100THz。

11. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述第一输出频率 ν_1 和第二输出频率 ν_2 中的每个介于大约75THz和大约750THz之间。

12. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述第一输出频率 ν_1 和第二输出频率 ν_2 中的每个介于大约120THz和大约430THz之间。

13. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述第一输出频率 ν_1 和第二输出频率 ν_2 中的每个介于大约150THz和大约300THz之间。

14. 根据权利要求1所述的双频光源,其中,所述双频光源被稳定以便(i) 将所述输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 的波动保持在操作上可接受的光学带宽内,或(ii) 将在所述输出差频处的光学信号的相位噪声保持在操作上可接受的参考相位噪声级内。

15. 根据权利要求14所述的双频光源,其中,所述操作上可接受的带宽小于在大约1秒时标上的大约100Hz。

16. 根据权利要求14所述的双频光源,其中,所述操作上可接受的带宽小于在大约1秒时标上的大约1Hz。

17. 根据权利要求14所述的双频光源,其中,所述操作上可接受的参考相位噪声级大约是在100Hz偏频处的-40dBc/Hz和在10kHz偏频处的-80dBc/Hz。

18. 根据权利要求14所述的双频光源,其中,所述操作上可接受的参考相位噪声级大约是在100Hz处的-80dBc/Hz和在10kHz处的-125dBc/Hz。

19. 根据权利要求14所述的双频光源,其中,所述第一泵浦激光源和第二泵浦激光源中的每一个通过Pound-Drever-Hall机制被锁频至所述谐振器的相应的谐振光学模式。

20. 一种用于使用根据权利要求1-19中的任何一项所述的双频光源来生成第一光学输出信号和第二光学输出信号的方法,所述方法包括利用来自所述第一泵浦激光源和第二泵浦激光源的光学泵浦功率来同时泵浦所述光纤光学谐振器,其中:

(a) 所述第一泵浦激光源和第二泵浦激光源被布置以生成在各自的第一泵浦激光频率 $\nu_{\text{泵浦1}}$ 和第二泵浦激光频率 $\nu_{\text{泵浦2}}$ 处的光学泵浦功率;和

(b) 所述光纤光学谐振器显示布里渊移频 ν_B 和自由光谱范围,所述自由光谱范围大体上等于所述布里渊移频的整数约数;

(c) 所述第一泵浦激光源和第二泵浦激光源中的每一个被锁频至所述光纤光学谐振器的相应的谐振光学模式;

(d) 所述第一光学输出信号和第二光学输出信号分别处于第一输出频率 $\nu_1 = \nu_{\text{泵浦1}} - \nu_B$ 和第二输出频率 $\nu_2 = \nu_{\text{泵浦2}} - \nu_B$,且包括分别由所述第一泵浦激光源和第二泵浦激光源对所述光纤光学谐振器的同时光学泵浦而生成的受激布里渊激光输出;

(e) 输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约300GHz;以及

(f) 所述光纤光学谐振器包括大于或等于大约100米长的光纤。

21. 根据权利要求20所述的方法,还包括,使用光分频器通过分频因子N来分频所述输出差频。

22. 根据权利要求21所述的方法,其中,所述分频因子大于或等于大约10。

23. 根据权利要求21所述的方法,其中,所述分频因子大于或等于大约100。

24. 根据权利要求21所述的方法,其中,所述分频因子大于或等于大约1000。

双频光源

[0001] 相关申请的利益诉求

[0002] 本申请要求基于 (i) 2014 年 1 月 24 日以 Kerry Vahala、Scott Diddams、Jiang Li、Xu Yi 和 Hansuek Lee 的名义提交的题为“Cascaded Optical Divider and Microwave Synthesizer”的美国临时申请 No. 61/931,060, 和 (ii) 2014 年 4 月 22 日以 Jiang Li 和 Kerry Vahala 的名义提交的题为“Dual SBS Lasers as Frequency References for Stable Microwave Generation by Optical Frequency Division”的美国临时申请 No. 61/982,749 的优先权。两个所述临时申请在此如在本文中完全阐述一样通过引用的方式并入。本申请提交于 2015 年 1 月 26 日周一。

[0003] 关于联邦资助的研究的声明

[0004] 本发明在由美国空军授予的 FA9550-10-1-0284 下和由美国国家科学基金会授予的 PHY-1125565 下的政府支持完成。政府在本发明中具有一定的权利。

发明领域

[0005] 本发明的领域涉及生成双光频信号和双频光源。特别地,本文中描述的仪器和方法用于生成双光频信号,该双光频信号显示出增强的差频稳定性和减少的相位噪声。

[0006] 背景

[0007] 本文中公开或要求保护的主体可涉及以下公开的主题:

[0008] -L. Goldberg、H. F. Taylor、J. F. Weller 和 D. M. Bloom 于 1983 年在 Electron Lett. 19 第 491-493 页发表的“Microwave signal generation with injection locked laser diodes”;

[0009] -Pillet, G.、Morvan, L.、Brunel, M.、Bretenaker, F.、Dolfi, D.、Vallet, M.、Huignard, J.-P. 和 Le Floch, A. 于 2008 年在 J. Lightwave Technol. 26 第 2764-2773 页上发表的“Dual frequency laser at 1.5 μ m for optical distribution and generation of high-purity microwave signals”;

[0010] -Schneider, G. J.、Murakowski, J. A.、Schuetz, C. A.、Shi, S. 和 Prather, D. W. 于 2013 年在 Nat. Photon. 7 第 118-122 页上发表的“Radio frequency signal-generation system with over seven octaves of continuous tuning”;

[0011] -Li, J.、Lee, H. 和 Vahala, K. J. 于 2013 年在 Nat. Commun. 4 第 2097 页上发表的“Microwave synthesizer using an on-chip Brillouin oscillator”;

[0012] -Fortier, T. 等人于 2011 年在 Nat. Photon. 5 第 425-429 页上发表的“Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division”;

[0013] -H. Murata、A. Morimoto、T. Kobayashi 和 S. Yamamoto 于 2000 年在 IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 6 第 1325 页上发表的“Optical Pulse Generation by Electrooptic-Modulation Method and Its Application to Integrated Ultrashort Pulse Generators”;

[0014] -M. Fujiwara、J. Kani、H. Suzuki、K. Araya、M. Teshima 于 2001 年在 IEEE

Electron.Lett.37第967-968页上发表的“Flattened optical multicarrier generation of 12.5GHz spaced 256channels based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation”;

[0015] -A.J.Metcalf、V.Torres公司、D.E.Leaird和A.M.Weiner于2013年在IEEE Sel.Top.Quantum Electron.19,3500306上发表的“High-power broadly tunable electro-optic frequency comb generator”;

[0016] -A.Rolland、G.Loas、M.Brunel、L.Frein、M.Vallet和M.Alouini于2011年在Opt.Express 19,17944-17950上发表的“Non-linear optoelectronic phase-locked loop for stabilization of opto-millimeter waves:towards a narrow linewidth tunable THz source”;

[0017] -William C.Swann、Esther Baumann、Fabrizio R.Giorgetta和Nathan R.Newbury于2011年在Opt.Express19,24387-24395上发表的“Microwave generation with low residual phase noise from a femtosecond fiber laser with an intracavity electro-optic modulator”;

[0018] -Papp,S.B.、Beha,K.、DelHaye,P.、Quinlan,F.、Lee,H.、Vahala,K.J.、Diddams,S.A.于2013年在arXiv:1309.3525上发表的“A microresonator frequency comb optical clock”;

[0019] -C.B.Huang、S.G.Park、D.E.Leaird和A.M.Weiner于2008年在Opt.Express 16第2520-2527页上发表的“Nonlinearly broadened phase-modulated continuous-wave laser frequency combs characterized using DPSK decoding”;

[0020] -I.Morohashi、T.Sakamoto、H.Sotobayashi、T.Kawanishi和I.Hosako于2009年在Opt.Lett.34第2297-2299页上发表的,“Broadband wavelength-tunable ultrashort pulse source using a Mach-Zehnder modulator and dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber”;

[0021] -A.Ishizawa、T.Nishikawa、A.Mizutori、H.Takara、A.Takada、T.Sogawa和M.Koga于2013年在Opt.Express 21第29186-29194页上发表的“Phase-noise characteristics of a 25-GHz-spaced optical frequency comb based on a phase-and intensity-modulated laser”;

[0022] -S.Suzuki、K.Kashiwagi、Y.Tanaka、Y.Okuyama、T.Kotani、J.Nishikawa、H.Suto、M.Tamura和T.Kurokawa在非线性光学、OSA技术文摘:非线性光学会议(Nonlinear Optics, OSA Technical Digest:Nonlinear Optics Conference) (美国光学协会,2013)中发表的“12.5GHz Near-IR Frequency Comb Generation Using Optical Pulse Synthesizer for Extra-Solar Planet Finder”,论文NM3A.3;

[0023] -Young,B.、Cruz,F.、Itano,W.和Bergquist,J.于1999年在Phys.Rev.Lett.82第3799-3802页上发表的“Visible Lasers with Subhertz Linewidths”;

[0024] -T.Kessler、C.Hagemann、C.Grebing、T.Legero、U.Sterr、F.Riehle、M.J.Martin、L.Chen和J.Ye.于2012年在Nat.Photon.6第687-692页上发表的“A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal opticalcavity”;

[0025] -Lee,H.、Chen,T.、Li,J.、Yang,K.Y.、Jeon,S.、Painter,O.和Vahala,K.J.于2012

年在Nat.Photon.6第369-373页上发表的“Chemically etched ultrahigh-Q wedge resonator on a silicon chip”;

[0026] -Li,J.、Lee,H.、Chen,T.和Vahala,K.J.于2012年在Opt.Express 20的20170-20180上发表的“Characterization of a high coherence,brillou in microcavity laser on silicon”;

[0027] -J.Li、H.Lee、K.Y.Yang和K.J.Vahala于2012年在Opt.Exp.20的26337-26344上发表的“Sideband spectroscopy and dispersion measurement in microcavities”;

[0028] -Drever,R.、Hall,J.L.、Kowalski,F.、Hough,J.、Ford,G.、Munley,A.和Ward,H.于1983年在Appl.Phys.B 31第97-105页发表的“Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator”;

[0029] -Gross,M.C.、Callahan,P.T.、Clark,T.R.、Novak,D.、Waterhouse,R.B.和Dennis,M.L.于2010年在Opt.Express 18的13321-13330上发表的“Tunable millimeter-wave frequency synthesis up to 100GHz by dual-wavelength Brillouin fiber laser”;

[0030] -Callahan,P.T.、Gross,M.C.和Dennis,M.L.于2011年在IEEE J.Quantum Electron.47第1142-1150页上发表的“Frequency-independent phase noise in a dual-wavelength Brillouin fiber laser”;

[0031] -T.Sakamoto、T.Kawanishi和M.Izutsu于2007年在Opt.Lett.32第1515-1517页上发表的“Asymptotic formalism for ultraflat optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator”;

[0032] -Dudley,J.M.、Genty,G.、Coen,Stephane于2006年在Rev.Mod.Phys.78第1135-1184页上发表的“Supercontinuum generation in photonic crystal fiber”;

[0033] -Li,J.、Yi,X.、Lee,H.、Diddams,S.和Vahala,K.在Science 345第309-313上发表的“Electro-optical frequency division and stable microwave synthesis”;

[0034] -Geng,J.、Staines,S.和Jiang,S.于2008年在Opt.Lett.33第16-18页上发表的“Dual-frequency Brillouin fiber laser for optical generation of tunable low-noise radio frequency/microwave frequency”;

[0035] -Pan,S.和Yao,J.于2009年在Opt.Express 17第5414-5419页上发表的“A wavelength-switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for switchable microwave generation”;

[0036] -Taylor,J.、Datta,S.、Hati,A.、Nelson,C.、Quinlan,F.、Joshi,A.和Diddams,S.于2011年在IEEE Photonics Journal 3第140页上发表的“Characterization of Power-to-Phase Conversion in High-Speed P-I-N Photodiodes”;

[0037] -A.J.Seeds、K.J.Williams、J.于2006年发表于Lightwave Technol.24的第4628-4641页。

[0038] -J.Yao2009年发表于J.Lightwave Technol.27第314-335页;

[0039] -G.Carpintero等人于2012年发表于Opt.Lett.37第3657-3659页;

[0040] -U.L.Rohde的Microwave and Wireless Synthesizers:Theory and Design (Wiley,纽约,1997);

[0041] -E.N.Ivanov、S.A.Diddams、L.Hollberg于2005年发表于IEEE Trans.Ultrason.Ferroelectr.Freq.Control 52第1068-1074页;以及

[0042] -J.Li、H.Lee、K.J.Vahala于2014年发表于Opt.Lett.39第287-290页。

[0043] 以上列出的每个参考资料如在本文中完全阐述的通过引用被纳入。

[0044] 概述

[0045] 双频光源包括:(a)第一和第二泵浦激光源,其被布置为在各自的第一和第二泵浦激光频率 $\nu_{\text{泵浦1}}$ 和 $\nu_{\text{泵浦2}}$ 处生成光泵浦功率;以及(b)光学谐振器,其以布里渊(Brillouin)移频 ν_B 和自由光谱范围为特征,该自由光谱范围大体上等于布里渊移频的整数约数。第一和第二泵浦激光源中的每一个被锁频至光学谐振器的相应的谐振光学模式。在各自的第一和第二输出频率 $\nu_1 = \nu_{\text{泵浦1}} - \nu_B$ 和 $\nu_2 = \nu_{\text{泵浦2}} - \nu_B$ 处的双频光学参考源的第一和第二光输出信号包括分别由第一和第二泵浦激光源对光学谐振器的同时光泵浦生成的受激布里渊激光输出。输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约300GHz。

[0046] 使用双频光源,用于生成第一和第二光输出信号的方法包括利用来自第一和第二泵浦激光源的光泵浦功率同时泵浦光学谐振器。

[0047] 当参考在附图中图示和在以下书面描述或所附权利要求中公开的示例实施方案时,关于微波频率源和双频光源的对象和优点以及用于它们用途的方法可能变得明显。

[0048] 该概述被提供来引入下面在详细描述中进一步描述的以简化形式的一系列概念。该概述并不旨在识别所要求保护的的主题的关键特征或本质特征,其也不旨在用于帮助确定所要求保护的的主题的范围。

[0049] 附图简述

[0050] 图1示意性地图示了发明的微波频率源。

[0051] 图2示意性地图示了发明的电光分频器,该分频器在锁相环布置中耦合至压控振荡器。

[0052] 图3是包括多边带光信号的受激光谱。

[0053] 图4对比了发明的光分频器和传统的电子分频器。

[0054] 图5A-5E是发明的微波频率源的测量的光谱和噪声的图示。

[0055] 图6A-6C是发明的微波频率源的测量的光谱的图示。

[0056] 图7示意性地图示了发明的双频光源。

[0057] 图8示意性地图示了另一个本发明的双频光源。

[0058] 图9A和图9B是发明的双频光源的测量光谱的图示。

[0059] 描绘的实施方案仅示意性地显示:所有特征可能不以全部细节或以适当的比例显示,为了清晰起见某些特征或结构相对于其他可能被扩大,并且附图不应视为按比例绘制。显示的实施方案仅是示例:它们不应被解释为限制本公开或所附权利要求的范围。

[0060] 实施方案的详细描述

[0061] 微波和射频振荡器广泛用于通信、遥感、导航、雷达、科学测量、计算机、时钟、时间标准以及其他领域中。它们提供了能够通常可控调谐的单一电频率。它们的性能特征在于包括功率输出、频率调谐范围和频率稳定性的各种度量标准。这些度量标准的最后一项,频率稳定性,对大多数应用是至关重要的,并且振荡器的成本直接与其提供的频率稳定性的水平有关。最高性能的振荡器已经通常基于电子振荡器,该电子振荡器采用高Q值介质谐振

器以产生高度稳定的频率。两个高度相干的激光信号的光检测是用于生成稳定的射频或微波频率信号的另一公知的方法;在光检测器(即,光电检测器)上且在光检测器的检测频率带宽内具有频差的两个光信号在光信号的光学差频处从光检测器中产生电输出信号,也称为拍音或拍频。在过去几年间开发的新方法采用了革命性的全光的接近使用被称为频率梳分光器(或简称“分光器”)的设备的微波合成方法。分光器接收在数百THz处振荡的高度相干的光信号作为输入。这通常是已经通过光学参考腔稳定的激光信号。这种非常高的输入频率使用光分频器被下分频(divided down)至在射频或微波频率范围(数百MHz或数百GHz)内的比率。该分频伴随有在相对于初始光信号的最终信号中的相位噪声的显著的降低,从而赋予无线电/微波信号显著的(和创纪录的)稳定性。频率梳分光器采用了特定的模式锁定激光器以实现该降低。

[0062] 本文中公开的是新的、发明的仪器和方法,用于实现由电子振荡器提供的微波频率信号的光分频和稳定操作,该电子振荡器具有频率控制输入(有时称为压控振荡器或VCO)。该新方法连同证明方法的可行性的初步测量一起在本文中被描述。在本发明的方法中,由激光器提供的两个参考光信号是稳频的,使得激光器的相对频率(即,它们的差频)尽可能稳定(或可行地实现对给定的用途或应用所必要的性能,即,在操作上可接受的参考带宽内相对稳定)。然后使用由VCO驱动的级联的相位调制器对激光信号进行相位调制。在光谱中,这产生了在由调制频率分隔开的初始激光频率上的边带光谱。相位调制光信号可使用强度调制器、色散补偿器、光放大器(如果需要或希望)以及非线性光学介质在光谱上展宽,以进一步增加在边带频率光谱中的边带数量。希望的是,激光器的频率间隔尽实际可能地大(对于给定的用途或应用),以提供VCO的最大实际可能的稳定性。然而,频率间隔不能超过通过相位调制级联(和非线性光展宽,如果采用的话)生成的边带的范围。两个最里面的边带(见图3)必须在频率上足够接近,使得在它们之间的拍频可使用光电二极管来检测。如以下进一步描述的,光电二极管信号包含由VCO产生的相位信息并且被用于稳定VCO。本发明的方法已经能够生成高度稳定的微波频率信号,该信号具有远低于在10kHz和100kHz的偏频处的高性能电子振荡器的相位噪声水平。本发明方法的性能可通过进一步增加两个参考光信号的频率间隔而被显著地改进。在本文公开的示例中,这些参考光信号通过单一高Q值圆盘谐振器的双泵浦来提供,以在两个不同波长处产生受激布里渊振荡。如以下进一步讨论的,频率间隔受限于在相同腔内有效地泵浦分开线的能力。可采用其他双光频率参考源,例如,包括锁频至单一参考谐振器腔的不同模式的两个激光器的参考源。

[0063] 相比于传统的频率梳分光器,在本文公开的发明的方法尚未达到相同的创记录的频率稳定性。但是,以上描述的在脉冲展宽方法中的改进应导致除这些已经证明的之外的性能改进,由于相位噪声通过分频比的平方被降低并且较大差频导致较大分频比。另外,为了抵消当前性能局限性,本发明的方法不需要锁模频率梳生成器,该频率梳生成器是复杂且昂贵的设备。相反,本发明的方法采用了相对简单并且成本较低的光学组件,大部分的光学组件在商业上是可获得的。另外,在许多示例中,参考频率(即,两个光源的差频)取决于在单一谐振器内的两个谐振的相对稳定性。在原则上,这是更强的参考,由于在系统中的技术噪声(即,由在设备中的不稳定性产生,与在系统的物理性质中固有的量子噪声相反)为两个谐振所共有并且在很大程度上抵消了差频。相比之下,传统分频方法依赖于绝对参考频率,该绝对参考频率更强烈地受到技术噪声影响。本文中公开的本发明的光分频器的操

作原理也是不同的,在于重复频率(即,边带间距)由电子VCO设置,这与光腔相反。因此,调谐输出信号的微波频率是可能的,这借助于传统的频率梳分光器是不容易实现的。另外,传统的频率梳分光器的方法依赖于具有高带宽的光的一系列的高峰值功率脉冲的光学检测。光电检测过程的线性已经显示出其对于使用本方法达到频率稳定性是至关重要的,并且极大地限制了可能采用的光学检测器的类型。相比之下,本发明可采用较低带宽的光学检测器或具有宽松的线性要求的检测器。

[0064] 用于实现关于高性能微波频率信号生成的光频分频的本文中公开的发明的仪器和方法采用了级联的相位调制,该相位调制包括直接相位调制,并且也包括自相位调制(如果需要或希望实现比单独使用直接相位调制可实现的更大的分频比)。相比于由锁模激光器产生的光谱线梳,级联的相位调制器不具有固有的重复频率,这是由于不存在光腔。虽然这可赋予级联生成的边带梳以任意选择的线间距频率,但是其也意味着,光分频必须用不同于借助传统频率梳所使用的方式来完成。

[0065] 图1-3图示了发明的方法,其中具有足够好的(即,操作上可接受的)相对频率稳定性的两个激光线为微波频率源提供两个光学参考信号120a/120b(以光谱101为特征)。图1是系统的高层框图;图2还包括系统某些元件的细节;图3是关于发明方法的光学信号的频谱的示意表示。在一些示例(以下描述)中,两个激光线120a/120b由在单一高Q值微腔110或光纤环形腔110'(FLC)中的伴随布里渊振荡产生,该微腔110或光纤环形腔110'由两个相应的、独立的泵浦激光器130a/130b(图7和8,以下进一步描述)泵浦。可选地,两个激光线120a/120b也可通过将两个激光器频率锁定至单一的共有参考腔180的不同光学模式或通过频率锁定至不同的原子跃迁190而由双模激光器产生。两个参考激光线进入电光分频器(即,电光边带生成器),在该电光分频器中它们通过在由压控电子振荡器600(VCO)设置的频率 f_M 处的一对调制器220进行相位调制。由相位调制器220产生的边带频谱301可在光纤350中通过脉冲形成和自相位调制被进一步展宽。因而形成的多边带光信号从每个激光线120a/120b延伸并且产生一对边带光信号430a/430b(通常在差频跨度的中点附近;见光谱401)。边带光信号430a/430b被光学过滤并且使用光电二极管420检测。如以下所讨论的,由两个检测的边带信号430a/430b生成的拍音信号包含光分频因子 (N_1+N_2) 放大的VCO 600的相位噪声,边带的数量需要到达边带信号430a/430b。因此,拍音为VCO 600的锁相环控制提供了合适的误差信号。

[0066] 对发明的微波频率源与采用频率参考10和VCO 30的更传统的微波频率源进行对比是有趣的。在传统方法(见图4)中,VCO 30在系统中提供了最高频率。它通过电子分频器20以及与诸如石英振荡器的较低频率参考振荡器10的相位比较来稳定。相比之下,本文中公开发明的电光分频器通过颠倒在频域中的参考和VCO的位置来运行。具体来说,参考100由激光线的相对频率间隔提供;使该频率间隔大于VCO 600的频率许多倍(在本实施方案中,这通常是使用光学检测器的非可检测比率)。此外,参考频率被下分频至VCO频率(在发明的源中),与将VCO频率下分频至参考频率不同(如在传统源中)。通过这样的颠倒,本发明的设备得益于(i)光学振荡器的稳定性,其现在通常超过微波振荡器的稳定性,和(ii)光分频的功率以将稳定性传递至微波领域。另外,因为本发明的分频器从电子VCO 600中得到其比率,因此其是连续可调谐的。特别地,频率输出由电子VCO的调谐范围和参考激光线的频率间隔来设置,并且不由腔重复率固定。

[0067] 使用频率间隔而不是绝对频率以得到用于微波生成的参考已经使用传统锁模激光频率梳得以证明。在这些类型的设备中,频率梳光分频器通过在参考腔的两个频率处锁定梳来实施。如在其他传统分光器中,在参考腔模式的频率间隔的情况下,梳的检测提供了下分频的信号。这个两点锁定方法先前也已经通过使用两个原子线和频率微梳来实施。

[0068] 图3图示了由本发明的分频器提供的相位噪声降低的起源。在生成的边带光信号中的累积的相位噪声成分从两个激光源被跟踪至生成可检测的拍音的所检测的边带的相位差。检测的拍音与参考振荡信号进行比较。通过调整VCO 600的相位以抵消相位差, $\Delta\phi$, 产生的VCO波动被降低至以下值: $\phi_M^2 = (\phi_1 - \phi_2)^2 / (N_1 + N_2)^2$; 在这个方法中消除了两个激光源的相位噪声中的相关性(例如,由共模技术噪声产生)。VCO 600的相对相位噪声的极限下限由通过分频因子的平方降低(即,通过 $(N_1 + N_2)^2$ 的因子降低)的激光线的光学相位噪声给定。显然,为了降低电子VCO 600的相位噪声,激光频率间隔(即,差频)应尽可能地大(或对于给定的用途或应用尽实际可能的大,即,在操作上可接受)。在本发明系统的优选实施方案中,差频的这个大小由双泵浦布里渊激光器的跨度确定。

[0069] 双光频参考源的示例更详细地显示在图7中。光学参考激光信号120a/120b由在单一硅基二氧化硅高Q值圆盘谐振器110内共同发射激光的布里渊激光线提供。各个布里渊激光线的相干特性是优秀的,并且布里渊激光线的相对频率稳定性通过在共有谐振器内共同发射激光而增强。在本发明的微波频率源中,布里渊激光线通过需要双泵浦配置的足够大的差频分开。在该示例中,二氧化硅圆盘谐振器110被设计并且以大约10.890GHz的自由光谱范围(FSR)来制造,该自由光谱范围(FSR)大体上与在1550nm的泵浦波长处的二氧化硅中的布里渊移频匹配。显示出不同的布里渊移频的其他需要的、希望的或合适的材料可被采用。每个泵浦激光器130a/130b(在相应波长 λ_1 和 λ_2 处发出)被使用Pound-Drever-Hall (PDH)技术被锁频至圆盘谐振器110的相应的不同的谐振光学模式,通过循环器114被耦合到圆盘谐振器110中,并且在各自的光学参考频率 ν_1 和 ν_2 处在向后传播的方向上激发其自身相应的布里渊激光。对于每个泵浦激光器130a/130b,PDH技术通过采用各自的光学带通滤波器132a/132b、光电探测器134a/134b和反馈/伺服机制136a/136b来实施;对每个泵浦波长的控制能够经由直接激光控制(正如泵浦激光器130a)或经由激光输出的频移(正如泵浦激光器130b的输出的声光移位)。在两个SBS激光器之间的频率间隔(即,差频 $\nu_2 - \nu_1$)通过调谐泵浦激光器130a/130b能够容易地被调谐,以在具有不同方位角模阶数的谐振器模式处进行泵浦。图8显示了类似的示例,其中圆盘谐振器110已经由光纤回路光学谐振器110'(即,光纤回路腔或FLC)取代。

[0070] 在单一的、共有的FLC中对基于光纤的SBS激光器的双泵浦先前已被用于通过光学信号的传统光学检测生成稳定的微波频率信号,其中两个泵浦激光波长是在需要的微波频率处由电光相位调制生成的单一连续波(CW)激光的边带。在先前的布置中,两个SBS激光频率出于必要性在频率上足够接近,使得它们的差频(即,拍音)能够使用光学检测器直接检测。相比之下,在本发明的布置中,SBS激光频率 ν_2 和 ν_1 在更大的频率间隔处分开(例如,在各种实验中的109、198、327和1612GHz,通过在由使用独立调谐的CW激光器的10、18、30和148腔FSR分开的圆盘谐振器光学模式上双泵浦)。这些增加的频率间隔通过增加分频因子由光学分频增加了相位噪声的降低;因此希望的是,使频率间隔(即,差频 $\nu_2 - \nu_1$)尽可能或尽实际

可能的大。这样大的频率间隔通常如此大使得不可能光学地检测到差频(即,拍音),因为该频率间隔大大超过了光学检测器的检测带宽。在迄今为止构建的实施方案中,1612GHz的最大间隔由在邻近所采用的铒掺杂的光纤放大器的增益带宽的1537nm的SBS泵浦激光器中的一个限制;其他泵浦源可被采用以实现光学参考信号120a/120b的更大的光谱间隔。图5A中示出了在这些光谱间隔中的一些处的双SBS线的测量的光谱。值得注意的是,两个SBS激光信号120a/120b不仅共享单一的、共有的基于芯片的圆盘谐振器110,而且也共享贯穿随后的光/电转换的相同的光纤路径,从而抑制路径长度改变的影响。

[0071] 在图7和图8的示例中,光学参考信号120a/120b使用循环器114耦合至光学分频器部分。为了生成多带光学信号310,采用边带生成器200,该边带生成器200包括具有相对低的 $V_{\pi} \sim 3.9V$ (在12GHz处)的两个相位调制器220/230,该相位调制器220/230是级联的并且借助相应的RF移相器224/234进行相位同步(图1和图2)。相位调制器220/230在32.5dBm和30.7dBm驱动,相当于高达大约 6π ($\approx \pi V_{\text{驱动}}/V_{\pi}$)的总相位调制幅度,其也近似等于由调制器220/230产生的边带数量的一半。相位调制器220/230的驱动信号(即,边带生成器的输入电信号)是在频率 f_M 处的VCO 600的输出电信号的一部分620(用作边带生成器的输入光学信号)。在一个示例中,高达大约30个电光调制(EOM)的边带(即, N_1+N_2 高达大约30)可仅使用边带生成器的第一部分200(即,仅使用用于生成边带信号310的相位调制器220/230;图2中的路径I)生成,导致高达大约327GHz的差频 $\nu_2-\nu_1$ 和高达大约30的因子的光分频。显示初始SBS激光线(18FSR频率间隔)和产生的相位调制边带二者的测量的光谱在图5B中显示。利用通过30分频,微波频率信号610的相位噪声通过频率 f_M 的反馈稳定性,相对于光学参考信号120a/120b的差频的相位噪声,将通过大约900的因子降低(以下进一步描述)。在图2中显示的示例中采用了两个相位调制器;然而,如果其提供足够大的调制以产生足够多的边带,则可采用单一相位调制器。

[0072] 为了进一步增加边带光谱宽度,可使用附加的相位调制器,或可使用提供更大相位调制幅度的相位调制器。可选地或另外地,所谓的连续光谱生成(例如,如在以上并入的Huang等人于2008年发表的、Morohashi等人于2009年发表的、Ishizawa等人于2013发表的以及Suzuki等人于2013年发表的出版物中所描述的)可通过采用边带生成器的第二部分300而被采用(图2中的路径II)。该部分包括强度调制器320(由VCO信号620的一部分在频率 f_M 处驱动并且使用移相器324进行同步)、色散补偿器330、光学放大器340以及非线性光学介质350。在典型的示例中,强度调制器320可包括电光马赫曾德(Mach-Zehnder)干涉仪,色散补偿器330可包括合适长度的合适的色散光纤(例如,色散位移光纤或包括色散位移光栅的光纤),光学放大器340可包括铒掺杂的光纤放大器(EDFA),以及非线性光学介质350可包括合适长度的高度非线性光纤(HNLF)。可采用其他在功能上相等的组件,例如,电吸收调制器。在该示例中,与相位调制器220/230级联的连续光谱生成可生成足够多的边带,以使两个参考光学信号120a/120b在光谱上能够比单独使用相位调制器的通常可能的间隔更远处分开;在该示例中,可生成高达圆盘谐振器110的148FSR的差频 $\nu_2-\nu_1$ (即,除了在该示例中,高达大约1.6THz; N_1+N_2 高达148;如以上所述,通过EDFA的增益带宽来限制)。利用通过148的分频,微波频率信号610的相位噪声通过频率 f_M 的反馈稳定性,相对于光学参考信号120a/120b的相位噪声,将通过大约超过20,000的因子降低(以下进一步描述)。通过使用更大的差频能够实现甚至更大的相位噪声的降低。

[0073] 两个传送的光学边带430a/430b(在各自的频率 $v_1+N_1f_M$ 和 $v_2-N_2f_M$ 处,通过通常 $\ll f_M$ 的 δf 分开)通过光学带通滤波器410传送并且使用放大的光学检测器420(在该示例中为125MHz带宽)进行检测。那些传送的边带信号的线性重叠导致在产生在光学检测器420上入射的信号,其在拍音频率 $f_{拍}=(v_2-N_2f_M)-(v_1+N_1f_M)$ 处产生光学检测器的电信号。参考振荡器510在频率 f_R 处生成参考振荡器电信号(在该示例中石英振荡器运行在大约10MHz处;可采用任何合适的参考振荡器;已经采用了从大约1MHz到大约500MHz的频率 f_R)。由参考振荡器510带来的相位噪声也通过整体分频而降低,并且在没有表现出对由光学分频过程可实现的相位噪声降低的任何限制。电路520比较光电二极管和参考电信号的相位,并且生成误差信号(以任何需要的、希望的或合适的方式),该误差信号然后由电路520进行环路滤波(以任何需要的、希望的或合适的方式)。环路滤波的误差信号用作VCO电输入信号530,该电输入信号530用于将VCO 600锁相至频率的 $v_2-v_1 \pm f_R$ 的分谐波(即,整数约数)。在示例中,VCO包括使用外部FM调制输入模式操作的微波生成器;可采用VCO的任何合适类型或实施。

[0074] 为了建立布里渊激光器的相位噪声级(相位噪声参考电平),图5C中最上面的曲线给出了通过在快速光检测器(50GHz带宽)上的图7的示例双SBS激光器的输出的光学检测所产生的拍音的单一边带(SSB)相位噪声(L_ϕ)。为了该测量,双SBS激光信号在分离的三个FSR处泵浦,导致在32.7GHz处的拍音,该拍音可使用光学检测器检测并且可通过电相位噪声分析器分析。相位噪声级已经被显示以利用SBS激光器频率的频率调谐来保持近似恒定,并且因此即使当它们被调谐至在本发明的分频过程中使用的非常大(即,非可检测)的频率间隔时也提供激光器的参考相位噪声的测量。对于高于100Hz的偏频(例如,在图5C中的水平轴),噪声谱由肖洛-汤斯(Schawlow-Townes)噪声进行限制,而在低于100Hz偏频处存在技术性噪声分量。在当前实验中,该光谱提供了参考噪声级(频差的不变量),该参考噪声级通过光分频因子 N_1+N_2 平方地降低。为了测试光分频器,通过将回路滤波的误差信号530馈送到VCO控制/调谐输入端中,如在图1-3中所示的将VCO 600锁定至光分频参考。图5C中的较低的两个曲线是当相对于双SBS线120a/120b的初始频率间隔在光学上通过30次分频(第二最低曲线)和148次(最低曲线)分频时,在10.89GHz处的VCO 600相应的测量的相位噪声谱。随着分频比的增加相位噪声的降低通过数据清楚地显示出来。输出信号610的频率在这些测量中通过使用可调谐泵浦激光源130a/130b来调整布里渊激光线的频率间隔而保持在10.89GHz处。另外,在大约900kHz(使用图2中的路径I实现的分频比30)和300kHz(使用图2中的路径II实现的分频比148)处的相位噪声谱中的特征是在锁相环控制电路中的伺服碰撞(servo bumps)。那些频率由伺服回路延迟确定,该伺服回路延迟包括VCO 600的光和电路路径长度以及调谐响应。

[0075] 为了图示在锁相情况下的VCO相位噪声的性能方面中的改进,图5C中虚曲线是自由运行VCO 600的相位噪声谱。当327GHz的布里渊光学差频以因子30分频时(图2中的路径I;仅相位调制器220/230),观察到相对于初始自由运行VCO 600的对于在1kHz和100kHz之间偏频的大约20dB的相位噪声降低,并且对于10.98GHz的载波,实现了在10kHz偏频处的-112dBc/Hz的相位噪声级和在100kHz偏频处的-127dBc/Hz的相位噪声级。当通过因子148分频1.61THz的布里渊光学信号差频(图2中的路径II;相位调制器加上连续光谱生成)时,对于10.89GHz载波实现的相位噪声级为在1kHz偏频处的-104dBc/Hz、在10kHz偏频处的-121dBc/Hz以及在100kHz偏频处的-119dBc/Hz。对于148的分频比在100kHz偏移处的相位噪

声的上升是因为该偏移临近在300kHz (伺服带宽) 处的伺服峰值。图5D显示了在10.89GHz处的VCO输出610的测量的光谱(在电频谱分析仪上的20kHz跨度和30Hz分辨率的带宽设置)。最上面的曲线是自由运行VCO光谱,而以降序排列的其他光谱是分别从196、327GHz和1.61THz的相应的SBS频率间隔下分频18、30和148次时的锁相VCO600的光谱。图5E通过给出相对于1、3、4、10、18、30和148的分频比所绘制的在1kHz、10kHz和100kHz的偏频处的测量的相位噪声总结了这些结果。虚线给出了 $1/(N_1+N_2)^2$ 拟合并且与测量值良好地吻合。相比之下,上面的水平虚线是Agilent MXG微波合成器的相位噪声(载波11GHz,偏移100kHz,Agilent在线数据表,文献编号5989-7572EN),以及较低的水平虚线是高性能Agilent PSG微波合成器的相位噪声(载波11GHz,偏移100kHz,Agilent在线数据表,文献编号5989-0698EN,选项UNX)。

[0076] 在到目前为止显示的示例中,微波频率 f_M 已经固定;然而,该频率可通过改变分频比来调整。特别地,通过改变对于双SBS线的固定间隔 v_2-v_1 的分频比 N_1+N_2 和VCO频率 f_M ,对不同载波频率(例如, $f_M=(v_1-v_2 \pm f_R)/(N_1+N_2)$)的锁相频率合成是可能的。例如在图6A中,边带频率对于两个不同的分频比26和30在中点处几乎重叠。唯一要求的是,差频 v_2-v_1 近似等于希望的输出/调制频率 f_M 的整数倍。图6B显示了锁相12.566GHz输出信号610的测量的噪声谱,而图6C显示了在9.075GHz处的输出信号610的测量的噪声谱。此外,初始参考频率间隔 v_2-v_1 也可被调谐。采用具有变化的FSR的多个参考腔110或180使宽范围的输出频率能够使用单一分频器生成。

[0077] 参考图1和图2,微波频率源被布置用于生成在输出频率 f_M 处的输出电信号,并且该微波频率源包括:(a) 双光频参考源100;(b) 电光边带生成器200/300;(c) 光学带通滤波器410;(d) 光学检测器420;(e) 参考振荡器510;(f) 电路520;以及(g) 压控电子振荡器600。双光频参考源100被布置以便生成(i) 在第一光学参考频率 v_1 处的第一光学参考信号120a和(ii) 在第二光学参考频率 $v_2 > v_1$ 处的第二光学参考信号120b。第一和第二光学参考信号120a/120b的光谱101的示例在图1的插图中示意性地表示。电光边带生成器200/300被布置以便(i) 接收第一和第二光学参考信号120a/120b以及在频率 f_M 处的边带生成器输入电信号,和(ii) 由此生成在 $v_1 \pm n_1 f_M$ 和 $v_2 \pm n_2 f_M$ 形式的各自的边带光学频率处的多边带光学信号210/310,其中 n_1 和 n_2 是整数。多边带光学信号310的光谱301的示例在图1的插图且也在图3的插图中示意性地表示。光学带通滤波器410被布置以便传送多边带光学信号210/310的子集,其包括在频率 $v_1+N_1 f_M$ 处的边带光学信号430a和在频率 $v_2-N_2 f_M$ 处的边带光学信号430b(通过通常 $<< f_M$ 的 δ_f 分开)。传送的边带光学信号430a/430b的光谱401的示例在图1的插图且也在图3的插图中示意性地表示。光学检测器420被布置以便(i) 接收传送的边带光学信号430a/430b和(ii) 生成在拍频 $f_{拍}=(v_2-N_2 f_M)-(v_1+N_1 f_M)$ 处的光学检测电信号440。

[0078] 参考振荡器510被布置以便生成在参考振荡器频率 f_R 处的参考振荡器电信号。电路520被布置以便(i) 接收光学检测器电信号440和参考振荡器电信号,(ii) 从而使用电路520的比较器部分生成取决于光学检测器和参考振荡器电信号的相对相位的电误差信号,以及(iii) 使用电路520的回路滤波器部分处理电误差信号。压控电子振荡器600被布置以便(i) 接收回路滤波的电误差信号530作为VCO输入电信号和(ii) 在频率 f_M 处生成VCO输出电信号,其中VCO输出电信号的第一部分620由电光边带生成器200/300接收作为边带生成器输入电信号,并且VCO输出电信号的第二部分610形成微波频率源的输出电信号。由电光

边带生成器200/300接收VC0输出电信号的第一部分620作为边带生成器输入电信号导致电路520和压控振荡器600耦合到负反馈布置中以便起锁相环(PLL)的作用。电路520的回路滤波器部分和比较器可以以任何需要的、希望的或合适的方式实施。

[0079] 用于在输出频率 f_M 处生成微波频率输出电信号610的方法包括:(a)使用双光频参考源100生成第一和第二光学参考信号120a/120b;(b)使用电光边带生成器200/300生成多边带光学信号210/310;(c)使用光学带通滤波器420传送边带光学信号430a/430b;(d)使用光学检测器420生成光学检测器电信号440;(e)使用参考振荡器510生成参考振荡器电信号;(f)使用电路520生成回路滤波的电误差信号530;以及(g)使用压控电子振荡器600生成VC0输出电信号610/620。由电光边带生成器200/300接收VC0输出电信号的第一部分620作为边带生成器输入电信号产生电路520和压控振荡器600耦合在负反馈布置中以便起锁相环的作用。

[0080] 输出频率 f_M 可位于电磁光谱的所谓微波部分内的任何地方,例如,在大约0.3GHz和大约300GHz之间。在一些示例中,输出频率 f_M 在大约1GHz和大约100GHz之间。

[0081] 如在图3中示意性图示的,电光边带生成器200/300用于通过因子 N_1+N_2 将差频 v_2-v_1 分频,产生一对边带光学信号430a/430b(在各自频率 $v_1+N_1f_M$ 和 $v_2-N_2f_M$ 处),该一对边带光学信号430a/430b在光谱上彼此足够接近以使二者均落入光学带通滤波器410的通带内。因此,电光边带生成器200/300可称为电光分频器(EOFD)。通过因子 N_1+N_2 对差频 v_2-v_1 分频(利用将电光边带生成器200/300和压控振荡器600锁相而耦合的)导致微波频率源的输出电信号610的相位噪声相对于双光频参考源100的相位噪声通过大约为 $(N_1+N_2)^2$ 的因子而降低。

[0082] 因此有利的是增加分频比以降低所生成的微波-频率电信号的相位噪声。实现较高分频比的一个方式是增加参考差频 v_2-v_1 。在一些示例中,参考差频 v_2-v_1 大于大约100GHz。在这些示例中的一些中,参考差频 v_2-v_1 大于大约1THz、大于10THz或大于100THz。根据需要的、希望的或合适的光源,或者当合适的光源被开发或变为可用的时,可采用还更大的参考差频。

[0083] 根据参考差频 v_2-v_1 和希望的输出频率 f_M ,可采用任何合适的分频比 N_1+N_2 。在一些示例中,分频比 N_1+N_2 大于或等于10、大于或等于50、大于或等于100或者大于或等于1000。如以上所述,更大的分频比提供更大的相位噪声降低。

[0084] 参考光学信号120a/120b可在任何需要的、希望的或合适的光学频率处被提供。在一些示例中,第一和第二光学参考频率 v_1 和 v_2 的每个在大约75THz和大约750THz之间(即,波长介于大约400nm和大约4 μ m之间)、介于大约120THz和大约430THz之间(即,波长介于在大约700nm和大约2.5 μ m之间),或介于大约150THz和大约300THz之间(即,介于大约1 μ m和大约2 μ m之间)。后面的两个范围由于在这些波长区域中的光纤和/或固态源的现成可用性可以是便利的。可采用其他波长。

[0085] 在一些示例中,参考振荡器频率和拍频可介于大约1MHz和大约500MHz之间、介于大约5MHz和大约100MHz之间或介于大约10MHz和大约50MHz之间。在一些示例中,参考振荡器510包括晶体振荡器,例如,石英振荡器。在一些其他的示例中,参考振荡器510包括电子振荡器,例如,频率合成振荡器。可采用任何合适的稳定参考振荡器,该振荡器提供了在给定的用途或应用中的微波频率源的足够稳定(即,在操作上可接受)的性能。

[0086] 在一些示例中,双光频参考源100是稳定的,以便将参考差频 v_2-v_1 的波动保持在操

作上可接受的光学参考带宽内(即,激光器的相对频率稳定性)。在一些示例中,在操作上可接受的参考带宽(作为特征在于给定的时间间隔的带宽给定)在大约1秒时标上小于大约100Hz,或在大约1秒时标上小于大约1Hz。在一些示例中,在操作上可接受的参考带宽(作为在相对于光学载波频率的给定偏频处的光学相位噪声给定)是在100Hz偏频处的大约-40dBc/Hz,以及在10kHz偏频处的大约-80dBc/Hz,或者在100Hz偏频处的大约-80dBc/Hz,或在10kHz的偏频处的大约-125dBc/Hz。通常,激光源的相对稳定性的改进水平将直接转化为在微波频率输出信号的整体频率稳定性中的改进。根据需要的、希望的或合适的光源,或者当合适的光源被开发或变为可用的时,可采用还更稳定的参考。

[0087] 如以上所述,在一些示例中,双光频参考源100包括第一和第二泵浦激光源130a/130b以及光学谐振器110(圆盘谐振器;图7)或110'(光纤回路谐振器;图8)。光学谐振器110/110'的自由光谱范围(FSR)大体上等于光学谐振器的布里渊移频的整数约数。在一些示例中,光学谐振器包括二氧化硅并且光学谐振器的布里渊移频大约为10.9GHz;可采用显示出不同布里渊移频的其他需要的、希望的或合适的材料。第一和第二泵浦激光源120a/120b中的每一个被锁频至光学谐振器110/110'的相应的谐振光学模式。第一和第二光学参考信号120a/120b包括分别通过第一和第二泵浦激光源130a/130b同时对光学谐振器的光学泵浦而生成的受激的布里渊激光(SBL)输出。在一些示例中,光学谐振器110/110'的自由光谱范围大体上等于光学谐振器的布里渊移频。在一些示例中,光学谐振器包括环形光学谐振器,诸如圆盘谐振器110(如图7中)。在其他示例中,光学谐振器包括光纤谐振器,诸如光纤回路光学谐振器110'(如图8中)或线性法布里-珀罗型(Fabry-Perot-type)光纤谐振器(其可包括,例如,在泵浦频率或SBL频率处的光纤布拉格光栅)。在一些示例中,第一和第二泵浦激光源中的每一个通过Pound-Drever-Hall机制被锁频至谐振器110/110'的相应的谐振光学模式;可采用任何合适的机制,例如, **Hänsch-Couillaud** 机制。

[0088] 替代用作双泵浦受激布里渊激光器(SBL)的光学谐振器,在一些其他的示例中,双光频参考源100包括双模激光源。在另一些其他的示例中,双光频参考源100包括第一和第二参考激光源,其每个被锁频至共有光学参考腔180(图1)的相应的不同的谐振光学模式。在另一些其他的示例中,双光频参考源100包括第一和第二参考激光源,其每个被锁频至相应的不同的原子跃迁190(图1)。可采用任何其他合适的稳定的双光频参考源,该参考源提供需要的、希望的或合适的(即,在操作上可接受的)参考频率和差频稳定性。

[0089] 如以上所述,在一些示例中,电光边带生成器包括仅两个或更多个电光相位调制器220/230(图2的路径I),每个调制器220/230由在频率 f_M 处的边带生成器输入电信号的相应部分来驱动。两个或更多个相位调制器220/230(其形成边带生成器的部分200)以串联布置,以便顺序地传送第一和第二光学参考信号120a/120b,以便生成在 $v_1 \pm n_1 f_M$ 和 $v_2 \pm n_2 f_M$ 形式的相应的边带光学频率处的多光学边带信号310,其中 n_1 和 n_2 是整数。使用两个相位调制器220/230,多对边带光学信号被生成,且 n_1+n_2 范围为从2到至少30。

[0090] 在其他示例中,连续光谱生成的传统技术被包括在电光边带生成器的部分300中(图2的路径II),其包括两个或更多个电光相位调制器220/230、强度调制器320、色散补偿器330、光学放大器340和非线性光学介质350。两个或更多个电光相位调制器220/230中的每个由源自VCO输出信号620且利用移频器224/234同步的、在频率 f_M 处的边带生成器输入电信号的相应部分驱动。强度调制器由源自VCO输出信号620且利用移相器324同步的、在频

率 f_M 处的边带生成器输入电信号的另一部分驱动。相位调制器220/230、强度调制器320、色散补偿器330、光学放大器340和非线性光学介质350以串联布置,以便顺序地传送第一和第二光学参考信号,以便生成多光学边带信号310。这些信号位于在 $\nu_1 \pm n_1 f_M$ 和 $\nu_2 \pm n_2 f_M$ 形式的相应频率处,其中 n_1 和 n_2 是整数, $n_1 + n_2$ 从2变化到至少100或更大。可采用调制器、色散补偿器、放大器和非线性介质的任何需要的、希望的或合适的组合。在一些示例中,强度调制器包括电光马赫曾德干涉仪,色散补偿器330可包括合适长度的合适的色散光纤(例如,色散位移的光纤或包括色散位移光栅的光纤),光学放大器340可包括铒掺杂的光纤放大器(EDFA),以及非线性光学介质350可包括合适长度的高度非线性光纤(HNLF)。可采用其他在功能上相等的组件,例如,电吸收调制器。当用于生成大相位幅度调制的合适的技术被开发或变为可用的时,以更少或甚至单一相位调制器代替以上的功能可能变为可能。

[0091] 如已经论述的,光分频(OFD)目前能够生成具有创纪录的相位噪声的超稳定微波频率信号。OFD的关键组成部分是稳定的光频参考(OFR)。光学参考可以是两种类型:绝对频率参考或差频参考。后一类型参考非常适合于具有在本文中描述的光分频器的应用。在图7和图8中示意性图示的本发明的双频光源现在将更详细地讨论。双频光源100基于THz带宽的双模受激布里渊激光器(SBL)。当频率参考被设置为利用光学检测器可直接检测的差频(例如,几十GHz,或许100GHz)时,双模SBL差频参考的相位噪声测量为在1kHz偏移处是-105dBc/Hz。这已经是优秀的相位噪声级,代表超过先前布里渊激光器的15dB改进。作为频率参考,希望的是将该差频增加至非常高(即,不可直接检测)的值,该值大于大约300GHz到大约1THz、大约5THz、大约10THz、大约100TH或甚至超过100THz。在差频中这样的增加可由于管理在基础的布里渊激光器中的噪声的物理现象所阐述的相位噪声中的少量或没有降级来完成。双模SBL差频的相位噪声通过两个激光器的基本的肖洛-汤斯噪声来确定,其相对于它们之间的频率间隔是近似不变的。使用光分频,这样大的差频(使用光学检测器不可检测)值可被下分频至传统可检测的频率(例如,10多Hz)。众所周知,差频的相位噪声通过分频比的平方在下分频信号中降低。假设给定了由本发明的双频源生成的差频的已经低的相位噪声,则分频引起的相位噪声降低被预期能够实现在微波频率处的创纪录的低相位噪声。本发明的差频参考可使用标准光纤组件生成并且需要少量或不需要昂贵的硬件。因此,其应当可被容易地转移至许多不同的用途和应用中。

[0092] 对于使用OFD方法的微波频率信号生成的关键构成是稳定的光频参考和光分频器。本发明的电光分频器在以上公开。用在各种OFD方法中的传统的、稳定的光频参考包括具有亚赫兹(sub-Hertz)稳定性的腔稳定激光器,或具有通过锁频至单一共有的参考光学腔180(图1)的异常相对频率稳定性的两个激光器。这样的两个方法需要良好隔离的、高精度的法布里-珀罗参考光学腔,该光学腔通常非常庞大和精密。另一方面,各种类型的双模激光器已经用于通过在快速光学检测器上的双模激光器(也称作双波长激光器)的光学检测且检测激光信号的拍频来生成具有良好质量的微波信号。例如,由在单一光纤回路腔中的两个激光器泵浦的双模受激布里渊激光器已经用于通过光学检测生成从10多MHz到100GHz的微波。然而,在这些方法中,微波频率信号通过在光学检测器上的激光器的双光学模式的拍击而直接生成,因此生成的微波频率信号受光学检测器的带宽(或许高达100GHz)限制。此外,微波频率信号的相位噪声等于两个激光模式的相对频率稳定性的相位噪声。

[0093] 在本发明的双频光源100中,我们将在光学上检测的双模激光器的传统角色(带宽

高达100GHz)转换至稳定的光学参考,且具有介于大约300GHz至大约100THz或甚至更高的之间的范围内的大得多的频率间隔。然后,由本发明的双模受激布里渊激光器(SBL)产生的参考差频可使用光分频器(诸如以上描述的本发明的电光分频器,或传统的锁模激光频率梳)被下分频至微波频率。生成的微波频率信号的相位噪声也通过 $20\log_{10}N$ dB从双模SBL之间的相对稳定性的相位噪声中分频,其中N是分频因子。在光学上分频的微波频率信号的相位噪声可相对于双频光频参考的相位噪声大大地降低,如以上所述其自身具有低相位噪声。光分频对于微波生成是相对新的方法。频率参考(基于绝对或基于差值的两者)通常已经使用无源法布里-珀罗谐振器,该谐振器是庞大和精密的设备。

[0094] 如以上已经描述的以及在图7和图8中显示的,本发明的双频光源100包括第一和第二泵浦光源130a/130b以及光学谐振器110(圆盘谐振器;图7)或110'(光纤回路谐振器;图8)。第一和第二泵浦光源被布置为在各自的第一和第二泵浦激光频率 $\nu_{\text{泵浦1}}$ 和 $\nu_{\text{泵浦2}}$ (相应于各自的第一和第二泵浦波长 $\lambda_{\text{泵浦1}}$ 和 $\lambda_{\text{泵浦2}}$)处生成光学泵浦功率。光学泵浦功率使用循环器114被路由到光学谐振器110/110'中;可采用其他合适的布置,例如分束器。光学谐振器110/110'特征在于布里渊移频 ν_B 和大体上等于布里渊移频的整数约数的自由光谱范围(FSR)。第一和第二泵浦光源130a/130b中的每一个被锁频至光学谐振器110/110'的相应的谐振光学模式;可采用任何需要的、希望的或合适的锁频技术或机制。在各自的第一和第二输出频率 $\nu_1 = \nu_{\text{泵浦1}} - \nu_B$ 和 $\nu_2 = \nu_{\text{泵浦2}} - \nu_B$ 处的双频光学参考源100的第一和第二光学输出信号120a/120b包括分别由第一和第二泵浦光源120a/120b通过对光学谐振器110/110'的同时光学泵浦生成的受激布里渊激光输出。输出信号120a/120b使用循环器114从双频源100路由出来;可采用其他合适的布置,例如,分束器或光纤耦合器。双频光源100被布置和操作,使得输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约300GHz。在一些示例中,输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约1THz;在一些示例中,输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约5THz;在一些示例中,输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约10THz;在那些示例中的一些中,输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约100THz。因为频率 ν_1 和 ν_2 在相同的腔内生成,所以在它们各自的波动中存在高度的相关性,使得差频 $\nu_2 - \nu_1$ 非常稳定。此外,可采用其他谐振器几何形状(例如,线性谐振器),以用于生成双SBL参考线。

[0095] 用于生成第一和第二光学输出信号120a/120b的方法包括利用来自第一和第二泵浦光源130a/130b的光学泵浦功率来同时泵浦光学谐振器110/110'。

[0096] 在本发明的双频光源的一些示例中,光学谐振器110/110'的自由光谱范围(FSR)大体上等于光学谐振器的布里渊移频。在一些示例中,光学谐振器包括二氧化硅并且光学谐振器的布里渊移频大约为10.9GHz;可采用显示出不同的布里渊移频的其他需要的、希望的或合适的材料。

[0097] 参考光学信号120a/120b可被提供在任何需要的、希望的或合适的光学频率处。在一些示例中,第一和第二光学参考频率 ν_1 和 ν_2 的每个介于大约75THz和大约750THz之间(即,波长介于大约400nm和大约4 μm 之间)、介于大约120THz和大约430THz之间(即,波长介于大约700nm和大约2.5 μm 之间)、或介于大约150THz和大约300THz之间(即,介于大约1 μm 和大约2 μm 之间)。后两个范围由于在这些波长区域中的光纤和/或固态源的现成可用性可以是便利的。可采用其他波长。

[0098] 在一些示例中,双光频参考源100是稳定的,以便将参考差频 $\nu_2 - \nu_1$ 的波动保持在操作上可接受的光学参考带宽内(即,激光器的相对频率稳定性)。在一些示例中,在操作上可

接受的参考带宽(作为在给定的时间间隔上表征的带宽而给定)在大约1秒的时标上小于大约100Hz或在大约1秒的时标上小于大约1Hz。在一些示例中,在操作上可接受的参考带宽(作为在相对于光学载波频率的给定偏频处的光学相位噪声而给定)在100Hz偏频处是大约-40dBc/Hz以及在10kHz偏频处是大约-80dBc/Hz,或者在100Hz偏频处是大约-80dBc/Hz且在10kHz的偏频处是大约-125dBc/Hz。通常,激光源的相对稳定性的改进水平将直接转化为在微波频率输出信号的整体频率稳定性中的改进。根据需要的、希望的或合适的光源,或者当合适的光源被开发或变为可用的时,可采用还更稳定的参考。

[0099] 在一些示例中,第一和第二泵浦激光源中的每一个通过Pound-Drever-Hall机制被锁频至谐振器110/110'的相应的谐振光学模式;可采用任何合适的机械,例如,Hänsch-Couillaud 机制。在图7的示例中,每个泵浦激光器130a/130b(在相应的波长 λ_1 和 λ_2 处发出)使用Pound-Drever-Hall (PDH) 技术被锁频至圆盘谐振器110的相应的不同的谐振光学模式,通过循环器114被耦合到圆盘谐振器110中,并且在各自的光学参考频率 ν_1 和 ν_2 处,在反向传播的方向上激发其自身相应的布里渊激光器。PDH技术通过采用各自的光学带通滤波器132a/132b、光电检测器134a/134b以及反馈/伺服机制136a/136b为每个泵浦激光器130a/130b实施;每个泵浦波长的控制可经由直接激光控制(正如泵浦激光器130a)或经由激光输出的频移(正如泵浦激光器130b的输出的声光移位)。在两个SBS激光器之间的频率间隔(即,差频 $\nu_2-\nu_1$)通过调谐泵浦激光器130a/130b可被容易地调整,以在具有不同方位角模阶数的谐振器模式处泵浦。图8显示了类似的示例,其中圆盘谐振器110已经由光纤回路光学谐振器110'(即,光纤回路腔或FLC)代替,并且其中两个泵浦激光器130a/130b受到它们各自波长的直接控制。

[0100] 光纤回路光学谐振器110'的使用使得能够使用容易获得的光纤组件,该光纤组件已经为电信相关的应用进行开发,并且在与圆盘谐振器110进行比较的频率参考自身中也能够实现在显著较低的相位噪声(较低高达40dB)方面的性能优势。该改进被认为是起因于两个原因。首先,与圆盘谐振器(往返长度大约为10mm到100mm)比较,光纤回路腔具有大得多的往返长度(大约为100m到500m)。因此,由光纤回路腔的随机温度波动引起的频率波动相对于圆盘谐振器被大大地降低。其次,光纤回路腔的较长腔长度导致与圆盘谐振器相比的相对较长的腔内光子存储时间。较长的光子存储时间依次导致激光器的相对较低的基本肖洛-汤斯频率噪声。

[0101] 虽然使用光纤的双泵浦布里渊激光器先前已经被展示了(如以上所述),但它们已经被操作为具有通常小于大约100GHz的频率间隔的微波源,而不是作为具有大于大约300GHz、大约1THz、大约5THz、大约10THz、大约100THz或甚至更高的频率间隔的差频参考。对于发明者的知识,并没有工作证明在大于大约300GHz的不同频率处的双泵浦的双布里渊激光线操作;事实上,这样大的频率间隔将使先前的双布里渊激光器不适于其预期的目的。在以上公开的光分频技术的开发之前,已经没有生成这样远地隔开的双参考频率的需求。也已经没有意图表征或理解考虑到利这种应用的双布里渊激光器的操作。

[0102] 图7(使用圆盘谐振器110)和图8(使用光纤回路谐振器)中示出了利用稳定微波生成的光学分频的用于使用双模SBL作为光学差频参考的详细布局。参考图8,两个泵浦激光源130a/130b(可独立调谐的CW激光器)使用标准Pound-Drever-Hall锁定技术被锁频至布里渊有源光纤回路腔110'(FLC),该Pound-Drever-Hall锁定技术采用光学带通滤波器

132a/132b、光电检测器134a/134b和反馈/伺服机制136a/136b。一旦在光纤回路腔110'中的持续循环的泵浦功率达到阈值,则每个泵浦激光器130a/130b激发其自身的受激布里渊激光。两个SBL之间的频率间隔可通过调谐在两个泵浦激光器130a/130b之间的频率间隔而从10多MHz被调谐至100THz或更高。对于光频分频,两个SBL之间的频率间隔可大约为几个THz。例如,使用一个1550nm的泵浦激光器,两个SBL的频率间隔可设置为1THz(将第二泵浦激光器调谐至1542nm)、设置为10THz(将第二泵浦激光器调谐至1473nm),或设置为100THz(将第二泵浦激光器调谐至1022nm)。然后,在持续共同振荡的双模SBL输出之间的差频被用作在分频过程中的稳定光频参考(如图3)。可采用任何合适的分频器,在一些示例中包括在以上描述的电光分频器。在一些其他的示例中,OFD基于传统的锁模光学频率梳(OFD),其中OFD的两个梳线被锁频至两个SBL,使得OFD的重复率给出稳定的分频的微波输出。然而,本发明的电光分频器实施简单,并且已经被观察以放松高带宽光电检测的线性约束,该线性约束对于基于锁模OFD的光分频已经提出了巨大的挑战。

[0103] 已经构建了一系列的FLC,其由90/10熔融耦合器以及45米(FSR 4.4MHz)、200米(FSR 1 MHz)和500米(FSR 400 kHz)的不同腔往返路径长度构成;可采用任何其他需要的、希望的或合适的光纤回路腔长度,例如,大于或等于大约40米长、大于或等于大约100米长、大于或等于大约200米长或者大于或等于大约500米长。较长的光纤回路谐振器相对于较短的光纤回路谐振器通常表现出更少的频率和相位噪声,所有其他方面是一样的。这些FLC的测量的光学精度大约为40(主要由耦合器损耗限制),并且用于SBS振荡的泵浦阈值大约为几百毫瓦。当在SBL阈值以上时,每个泵浦激光器(在1550nm波长区域处)的泵浦功率增加,直到到达一个点($\sim 1\text{mW}$),使得在一阶斯托克斯(Stokes)频率处发射激光开始激发谐振器中的二阶斯托克斯波。图9B显示了具有1.61THz(12.5nm)频率间隔的双模SBL差频参考的测量的光谱,其通过双泵浦在1537.2nm和1549.6nm处FLC而获得。已经观察到的是,在二阶斯托克斯线的振荡的开始显示出将一阶斯托克斯线的腔内功率钳位。双模SBL的相对频率稳定性的基本限制由布里渊激光器的肖洛-汤斯频率噪声(S_v)确定,其已经被观察到一旦功率钳位则随谐振光学模式的体积成反比地改变。较长的光纤回路腔具有较大的有效模体积,并且因此在由二阶斯托克斯振荡的开始引起的功率钳位后具有降低的肖洛-汤斯噪声。

[0104] 为了表征双模SBL的相对频率稳定性的相位噪声(即,差频 $\nu_2-\nu_1$ 的稳定性),双SBL的频率间隔被调谐至使用快速光电二极管将被直接检测且电子化处理的足够低的频率(这基本上是统一分频的情况)。检测的拍音被设置在20GHz处,并且使用相位噪声分析器(Rohde Schwarz,型号FSUP26)来测量其相位噪声。来自不同FLC的SBL拍音的测量的单边带(SSB)相位噪声谱显示在图9A中(45m FLC:顶部实曲线;200m FLC:中部实曲线;500m FLC:底部实曲线)。所有测量的相位噪声谱显示了在从几Hz至超过100kHz的宽范围的偏频上的肖洛-汤斯-噪声-限制的相位噪声($1/f^2$ 的依赖关系)。SBL的共模技术性噪声大体上抵消了根据光学检测的拍音信号。因此,在双模SBL中的相对频率稳定性的相位噪声由基本的肖洛-汤斯噪声限制并且随着两个共同振荡SBL之间的频率间隔是不变的。因此,利用被调谐至更大差频的双模SBL,由于光分频过程引起相位噪声中显著降低。在光学上分频的微波频率信号(f_M)得益于通过分频比的平方的光学相位噪声的降低, $N \equiv (\nu_2-\nu_1)/f_M$ 。例如, $N=100$ 的分频因子将导致相位噪声降低的10,000的因子(或 $20\log 10N=40\text{dB}$)。

[0105] 此外,双模SBL的差频的测量的单边带(SSB)相位噪声(不具有任何光分频)与先前

的结果比较已经得到了改进。如图9A所示,双模SBL拍音的测量的相位噪声(载波:20GHz,偏频:1kHz)为-95dBc/Hz (45m FLC)、-101dBc/Hz (200m FLC)以及-105dBc/Hz (500m FLC)。相比于具有大约18mm的往返路径长度的圆盘谐振器的大约-83dBc/Hz,500米FLC显示出在10kHz偏频处的大约-125dBc/Hz。观察到的是,相位噪声随着FLC长度的增加而大致上线性降低,与在腔模体积上的SBL的肖洛-汤斯噪声的已知反比关系具有良好一致性。我们也测量了20GHz拍音的阿伦(Allan)偏差(ADEV)。对于0.2s到1s的选通时间,测量的分数ADEV为 1×10^{-11} 的数量级。相比之下,一些之前的研究显示,对5-20GHz拍音测量的-90dBc/Hz的相位噪声在1kHz频偏下,其基于从20米的FLC生成的双模SBL的直接光学检测。其他研究显示对于148Mhz拍音的阿伦偏差;对于0.2s至1s的选通时间,观察到 1×10^{-7} 的量级的分数ADEV。对于本发明者的知识,在此报告的结果是FLC中增加的长度导致SBL的降低的肖洛-汤斯噪声的第一证明,其用于在微波光子学中的低相位噪声微波生成,包括基于直接拍音生成的微波源和基于光分频的微波源二者。

[0106] 最后,基于来自双模SBL差频参考(基于200m FLC)的OFD的在光学上分频的微波信号的预测相位噪声也在图9A中绘制。顶部、中部和底部的虚曲线分别对应于N=33、100和330的分频比。在光学上分频的微波信号的载波频率固定在10GHz处。因此,这些分频比对应于分别被设置为330GHz、1THz、和3.3THz的双模SBL频率间隔。

[0107] 图9A中的预测相位噪声级代表创纪录的低级。此外,基于SBL差频参考的振荡器不需要昂贵的硬件,其也不需要运行在真空或低温条件下。因此,该技术可容易地部署在各种应用中,如雷达、通信和导航系统。

[0108] 除前面的示例之外,下面的示例也落入本公开或所附权利要求的范围内:

[0109] 示例1。一种微波频率源,用于生成在输出频率 f_M 处的输出电信号,该微波频率源包括:(a)双光频参考源,其被布置以便生成(i)在第一光学参考频率 ν_1 处的第一光学参考信号和(ii)在第二光学参考频率 $\nu_2 > \nu_1$ 处的第二光学参考信号;(b)电光边带生成器,其被布置以便(i)接收第一和第二光学参考信号以及在频率 f_M 处的边带生成器输入电信号以及(ii)因而在形式 $\nu_1 \pm n_1 f_M$ 和 $\nu_2 \pm n_2 f_M$ 的各自的边带光学频率处的多边带光学信号,其中 n_1 和 n_2 是整数;(c)光学带通滤波器,其被布置以便传送多边带光学信号的子集,包括在频率 $\nu_1 + N_1 f_M$ 处的边带光学信号以及在频率 $\nu_2 - N_2 f_M$ 处的边带光学信号,其中 N_1 和 N_2 是整数;(d)光学检测器,其被布置以便(i)接收传送的边带光学信号,以及(ii)生成在拍频 $f_{拍} = (\nu_2 - N_2 f_M) - (\nu_1 + N_1 f_M)$ 处的光学检测器电信号;(e)参考振荡器,其被布置以便生成在参考振荡器频 f_R 处的参考振荡器电信号;(f)电路,其被布置以便(i)接收光学检测器电信号和参考振荡器电信号,(ii)因而使用电路的比较器部分生成电误差信号,该信号取决于光学检测器和参考振荡器的电信号的相对相位,和(iii)使用电路的回路滤波器部分处理电误差信号;以及(g)压控电子振荡器,其被布置以便(i)接收回路滤波的电误差信号作为VCO输入电信号和(ii)生成在频率 f_M 处的VCO输出电信号,其中VCO输出电信号的第一部分通过电光边带生成器接收作为边带生成器输入电信号,并且VCO输出电信号的第二部分形成微波频率源的输出电信号,(h)其中VCO输出电信号的第一部分作为边带生成器输入电信号由电光边带发生器的接收,导致电路和压控振荡器耦合在负反馈布置中,以便起锁相环的作用。

[0110] 示例2。根据示例1的微波频率源,其中,微波频率源的输出电信号的相位噪声相对于在双光频参考源的参考差频 $\nu_2 - \nu_1$ 处的参考差频信号的相位噪声通过大约为 $(N_1 + N_2)^2$ 的因

子降低。

[0111] 示例3。根据示例1或示例2中任意一个的微波频率源,其中,输出频率 f_M 介于大约0.3GHz和大约300GHz之间。

[0112] 示例4。根据示例1或示例2中任意一个的微波频率源,其中,输出频率 f_M 介于大约1GHz和大约100GHz之间。

[0113] 示例5。根据示例1-4中任意一个的微波频率源,其中,参考振荡器频率和拍频介于大约1MHz和大约500MHz之间。

[0114] 示例6。根据示例1-4中任意一个的微波频率源,其中,参考振荡器频率和拍频介于大约5MHz和大约100MHz之间。

[0115] 示例7。根据示例1-4中任意一个的微波频率源,其中,参考振荡器频率和拍频介于大约10MHz和大约50MHz之间。

[0116] 示例8。根据示例1-7中任意一个的微波频率源,其中,参考振荡器包括晶体振荡器,例如,石英振荡器。

[0117] 示例9。根据示例1-7中任意一个的微波频率源,其中,参考振荡器包括电子振荡器,例如,频率合成振荡器。

[0118] 示例10。根据示例1-9中任意一个的微波频率源,其中,参考差频 v_2-v_1 大于大约100GHz。

[0119] 示例11。根据示例1-9中任意一个的微波频率源,其中,参考差频 v_2-v_1 大于大约1THz。

[0120] 示例12。根据示例1-9中任意一个的微波频率源,其中,参考差频 v_2-v_1 大于大约10THz。

[0121] 示例13。根据示例1-9中任意一个的微波频率源,其中,参考差频 v_2-v_1 大于大约100THz。

[0122] 示例14。根据示例1-13中任意一个的微波频率源,其中, N_1+N_2 大于或等于10。

[0123] 示例15。根据示例1-13中任意一个的微波频率源,其中, N_1+N_2 大于或等于50。

[0124] 示例16。根据示例1-13中任意一个的微波频率源,其中, N_1+N_2 大于或等于100。

[0125] 示例17。根据示例1-13中任意一个的微波频率源,其中, N_1+N_2 大于或等于1000。

[0126] 示例18。根据示例1-17中任意一个的微波频率源,其中,第一和第二光学参考频率 v_1 和 v_2 中的每个介于大约75THz和大约750THz之间。

[0127] 示例19。根据示例1-17中任意一个的微波频率源,其中,第一和第二光学参考频率 v_1 和 v_2 中的每个介于大约120THz和大约430THz之间。

[0128] 示例20。根据示例1-17中任意一个的微波频率源,其中,第一和第二光学参考频率 v_1 和 v_2 中的每个介于大约150THz和大约300THz之间。

[0129] 示例21。根据示例1-20中任意一个的微波频率源,其中,双光频参考源被稳定以便(i)将参考差频 v_2-v_1 的波动保持在操作上可接受的光学参考带宽内,或(ii)将参考频差信号的相位噪声保持在操作上可接受的参考相位噪声级内。

[0130] 示例22。根据示例21的微波频率源,其中,在操作上可接受的参考带宽小于在大约1秒时标上的大约100Hz。

[0131] 示例23。根据示例21的微波频率源,其中,在操作上可接受的参考带宽小于在大约

1秒时标上的大约1Hz。

[0132] 示例24。根据示例21的微波频率源,其中,在操作上可接受的参考相位噪声级是在100Hz偏频处的大约-40dBc/Hz和在10kHz偏频处的大约-80dBc/Hz。

[0133] 示例25。根据示例21的微波频率源,其中,在操作上可接受的参考相位噪声级是在100Hz偏频处的大约-80dBc/Hz和在10kHz偏频处的大约-125dBc/Hz。

[0134] 示例26。根据示例1-25中任意一个的微波频率源,其中,(i) 双光频参考源包括第一和第二泵浦激光源和光学谐振器,(ii) 光学谐振器的自由光谱范围大体上等于光学谐振器的布里渊移频的整数约数,(iii) 第一和第二泵浦激光源中的每一个被锁频至光学谐振器的相应的谐振光学模式,以及(iv) 第一和第二光学参考信号包括分别由第一和第二泵浦激光源对光学谐振器的同时光学泵浦所生成的受激布里渊激光输出。

[0135] 示例27。根据示例26的微波频率源,其中,光学谐振器的自由光谱范围大体上等于光学谐振器的布里渊移频。

[0136] 示例28。根据示例26或27中任意一个的微波频率源,其中,光学谐振器包括二氧化硅,并且光学谐振器的布里渊移频大约为10.9GHz。

[0137] 示例29。根据示例26-28中任意一个的微波频率源,其中,光学谐振器包括环形光学谐振器。

[0138] 示例30。根据示例29的微波频率源,其中,环形光学谐振器包括圆盘光学谐振器。

[0139] 示例31。根据示例26-28中任意一个的微波频率源,其中,光学谐振器包括光纤光学谐振器。

[0140] 示例32。根据示例31的微波频率源,其中,光纤光学谐振器包括法布里-珀罗光纤光学谐振器。

[0141] 示例33。根据示例31的微波频率源,其中,光纤光学谐振器包括光纤回路光学谐振器。

[0142] 示例34。根据示例26-33中任意一个的微波频率源,其中,第一和第二泵浦激光源中的每一个通过Pound-Drever-Hall机制被锁频至光学谐振器的相应的谐振光学模式。

[0143] 示例35。根据示例1-25中任意一个的微波频率源,其中,双光频参考源包括双模激光源。

[0144] 示例36。根据示例1-25中任意一个的微波频率源,其中,双光频参考源包括第一和第二参考激光源,其中第一和第二激光源中的每个被锁频至共同的光学参考腔的相应的不同的谐振光学模式。

[0145] 示例37。根据示例1-25中任意一个的微波频率源,其中,双光频参考源包括第一和第二参考激光源,其中第一和第二激光源中的每个被锁频至相应的不同的原子跃迁。

[0146] 示例38。根据示例1-37中任意一个的微波频率源,其中,(i) 电光边带生成器包括每一个均由在频率 f_M 处的边带生成器输入电信号的相应部分驱动的一个或多个电光相位调制器,并且(ii) 一个或多个相位调制器被布置以便传送第一和第二光学参考信号,以生成多光学边带信号。

[0147] 示例39。根据示例1-37中任意一个的微波频率源,其中,(i) 电光边带生成器包括每一个均由在频率 f_M 处的边带生成器输入电信号的相应部分驱动的两个或更多个电光相位调制器,并且(ii) 两个或更多个相位调制器以串联布置,以便顺序地传送第一和第二光

学参考信号,以生成多光学边带信号。

[0148] 示例40。根据示例38或示例39中任意一个的微波频率源,其中,多对边带光学信号被生成且 n_1+n_2 范围为从2达到至少30。

[0149] 示例41。根据示例38或示例39中任意一个的微波频率源,其中,多对边带光学信号被生成且 n_1+n_2 范围为从2达到至少100。

[0150] 示例42。根据示例1-41中任意一个的微波频率源,其中,(i) 电光边带生成器包括每个均由在频率 f_M 处的边带生成器输入电信号的相应部分驱动的一个或多个电光相位调制器、由在频率 f_M 处的边带生成器输入电信号的相应部分驱动的强度调制器、色散补偿器、光学放大器以及非线性光学介质,并且(ii) 该一个或多个相位调制器、强度调制器、色散补偿器、光学放大器以及非线性光学介质以串联布置,以便顺序地传送第一和第二光学参考信号,以生成多光学边带信号。

[0151] 示例43。根据示例38-42中任意一个的微波频率源,其中,多对边带光学信号被生成且 n_1+n_2 范围为从2达到至少100。

[0152] 示例44。根据示例38-42中任意一个的微波频率源,其中,多对边带光学信号被生成且 n_1+n_2 范围为从2变化到至少10000。

[0153] 示例45。根据示例42-44中任意一个的微波频率源,其中,(i) 强度调制器包括电光马赫曾德调制器,(ii) 色散补偿器包括合适的色散光纤,(iii) 光学放大器包括掺杂的光纤放大器,以及(iv) 非线性光学介质包括非线性光纤。

[0154] 示例46。一种使用示例1-45中任何一个的微波频率源来生成在输出频率 f_M 处的微波频率输出电信号的方法,该方法包括:(a) 使用双光频参考源,生成(i) 在第一光学参考频率 ν_1 处的第一光学参考信号和(ii) 在第二光学参考频率 $\nu_2 > \nu_1$ 处的第二光学参考信号;(b) 使用电光边带生成器,(i) 接收第一和第二光学参考信号和在频率 f_M 处的边带生成器输入电信号和(ii) 由此生成在形式 $\nu_1 \pm n_1 f_M$ 和 $\nu_2 \pm n_2 f_M$ 的各自的边带光学频率处的多边带光学信号,其中 n_1 和 n_2 是整数;(c) 使用光学带通滤波器,传送多边带光学信号的子集,包括在频率 $\nu_1 + N_1 f_M$ 处的边带光学信号和在频率 $\nu_2 - N_2 f_M$ 处的边带光学信号,其中 N_1 和 N_2 是整数;(d) 使用光学检测器,(i) 接收传送的边带光学信号和(ii) 生成在拍频 $f_{\text{拍}} = (\nu_2 - N_2 f_M) - (\nu_1 + N_1 f_M)$ 处的光学检测器电信号;(e) 使用参考振荡器,生成在参考振荡器频率 f_R 处的参考振荡器电信号;(f) 使用电路,(i) 接收光学检测器电信号和参考振荡器电信号,(ii) 使用电路的比较器部分从光学检测器电信号和参考振荡器电信号生成电误差信号,该电误差信号取决于光学检测器和参考振荡器电信号的相对相位,和(iii) 使用电路的回路滤波器部分处理电误差信号;以及(g) 使用压控电子振荡器,(i) 接收回路滤波的电误差信号作为VCO输入电信号和(ii) 生成在频率 f_M 处的VCO输出电信号,其中VCO输出电信号的第一部分作为边带生成器输入电信号由电光边带生成器接收,并且VCO输出电信号的第二部分形成微波频率输出电信号,(h) 其中VCO输出电信号的第一部分作为边带生成器输入电信号由电光边带生成器接收,导致电路和压控振荡器耦合在负反馈布置中,以便起锁相环的作用。

[0155] 示例47。一种双频光源,包括:(a) 第一和第二泵浦激光源,其被布置以生成在各自的第一和第二泵浦激光频率 $\nu_{\text{泵浦1}}$ 和 $\nu_{\text{泵浦2}}$ 处的光泵浦功率;以及(b) 光学谐振器,其通过布里渊移频 ν_B 和自由光谱范围来表征,该自由光谱范围大体上等于布里渊移频的整数约数,其中(c) 第一和第二泵浦激光源中的每一个被锁频至光学谐振器的相应的谐振光学模式;(d)

在各自的第一和第二输出频率 $\nu_1 = \nu_{\text{泵浦1}} - \nu_B$ 和 $\nu_2 = \nu_{\text{泵浦2}} - \nu_B$ 处的双频光学参考源的第一和第二光学输出信号包括分别由第一和第二泵浦激光源通过对光学谐振器的同时光学泵浦所生成的受激布里渊激光输出;以及(e)输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约300GHz。

[0156] 示例48。根据示例47的双频光源,其中,光学谐振器的自由光谱范围大体上等于光学谐振器的布里渊移频。

[0157] 示例49。根据示例47或示例48中任意一个的双频光源,其中,光学谐振器包括环形光学谐振器。

[0158] 示例50。根据示例49的双频光源,其中,环形光学谐振器包括圆盘光学谐振器。

[0159] 示例51。根据示例47或示例48中任意一个的双频光源,其中,光学谐振器包括光纤光学谐振器。

[0160] 示例52。根据示例51的双频光源,其中,光纤光学谐振器包括光纤法布里-珀罗光学谐振器。

[0161] 示例53。根据示例51的双频光源,其中,光纤光学谐振器包括光纤回路光学谐振器。

[0162] 示例54。根据示例51-53中任意一个的双频光源,其中,光纤光学谐振器包括大于或等于大约40米长的光纤。

[0163] 示例55。根据示例51-53中任意一个的双频光源,其中,光纤光学谐振器包括大于或等于大约100米长的光纤。

[0164] 示例56。根据示例51-53中任意一个的双频光源,其中,光纤光学谐振器包括大于或等于大约200米长的光纤。

[0165] 示例57。根据示例51-53中任意一个的双频光源,其中,光纤光学谐振器包括大于或等于大约500米长的光纤。

[0166] 示例58。根据示例47-57中任意一个的双频光源,其中,光学谐振器包括二氧化硅,并且光学谐振器的布里渊移频大约为10.9GHz。

[0167] 示例59。根据示例47-58中任意一个的双频光源,其中,输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约1THz。

[0168] 示例60。根据示例47-58中任意一个的双频光源,其中,输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约10THz。

[0169] 示例61。根据示例47-58中任意一个的双频光源,其中,输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约100THz。

[0170] 示例62。根据示例47-61中任意一个的双频光源,其中,第一和第二光学参考频率 ν_1 和 ν_2 中的每个介于大约75THz和大约750THz之间。

[0171] 示例63。根据示例47-61中任意一个的双频光源,其中,第一和第二光学参考频率 ν_1 和 ν_2 中的每个介于大约120THz和大约430THz之间。

[0172] 示例64。根据示例47-61中任意一个的双频光源,其中,第一和第二光学参考频率 ν_1 和 ν_2 中的每个介于大约150THz和大约300THz之间。

[0173] 示例65。根据示例47-64中任意一个的双频光源,其中,双频光源被稳定以便(i)将输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 的波动保持在操作上可接受的光学带宽内,或(ii)将输出差频处的光学信号的相位噪声保持在操作上可接受的参考相位噪声级内。

[0174] 示例66。根据示例65的双频光源,其中,在操作上可接受的带宽小于在大约1秒时标上的大约100Hz。

[0175] 示例67。根据示例65的双频光源,其中,在操作上可接受的带宽小于在大约1秒时标上的大约1Hz。

[0176] 示例68。根据示例65的双频光源,其中,在操作上可接受的参考相位噪声级是在100Hz偏频处的大约-40dBc/Hz和在10kHz偏频处的大约-80dBc/Hz。

[0177] 示例69。根据示例65的双频光源,其中,在操作上可接受的参考相位噪声级是在100Hz偏频处的大约-80dBc/Hz和在10kHz偏频处的大约-125dBc/Hz。

[0178] 示例70。根据示例65-69中任意一个的双频光源,其中,第一和第二泵浦光源中的每一个通过Pound-Drever-Hall机制被锁频至谐振器的相应的谐振光学模式。

[0179] 示例71。一种方法,用于使用示例47-70中任意一个生成第一和第二光学输出信号,该方法包括利用来自第一和第二泵浦光源的光学泵浦功率同时泵浦光学谐振器,其中:(a)第一和第二泵浦光源被布置以生成在各自的第一和第二泵浦激光频率 $\nu_{\text{泵浦1}}$ 和 $\nu_{\text{泵浦2}}$ 处的光学泵浦功率;(b)光学谐振器通过布里渊移频 ν_B 和自由光谱范围来表征,该自由光谱范围大体上等于布里渊移频的整数约数;(c)第一和第二泵浦光源中的每一个被锁频至光学谐振器的相应的谐振光学模式;(d)第一和第二光学输出信号在各自的第一和第二输出频率 $\nu_1 = \nu_{\text{泵浦1}} - \nu_B$ 和 $\nu_2 = \nu_{\text{泵浦2}} - \nu_B$ 处,并且包括分别由第一和第二泵浦光源对光学谐振器的同时光学泵浦生成的受激布里渊激光输出;以及(e)输出差频 $\nu_2 - \nu_1$ 大于大约300GHz。

[0180] 示例72。根据示例71的方法,还包括,使用光分频器通过分频因子N来分频输出差频。

[0181] 示例73。根据示例72的方法,其中,分频因子大于或等于大约10。

[0182] 示例74。根据示例72的方法,其中,分频因子大于或等于大约100。

[0183] 示例75。根据示例72的方法,其中,分频因子大于或等于大约1000。

[0184] 示例76。根据示例1-45中任意一个的微波频率源,其中,双光频参考源包括示例47-70中任意一个的双频光源。

[0185] 示例77。根据示例46的方法,其中,双光频参考源包括示例47-70中任意一个的双频光源。

[0186] 示例78。根据示例77的方法,还包括执行示例71-75中任意一个的方法。

[0187] 意图是所公开的示例实施方案和方法的等效形式应落在本公开或所附权利要求的范围内。意图是所公开的示例实施方案和方法及其等效形式可被更改,同时保持在本公开或所附权利要求的范围内。

[0188] 在前面的详细描述中,出于精简本公开的目的,在一些示例实施方案中各种特征可以被组合在一起。本公开的方法不被解读为反映以下意图:任何所要求保护的实施方案都需要比在相应的权利要求中明确记载的更多的特征。相反,如所附权利要求所反映的,发明的主题可能存在于少于所公开的单个示例实施方案的所有特征中。因此,所附权利要求在此被并入详细描述中,其中每一项权利要求其自身可作为所公开的单独的实施方案。然而,本公开还可以被理解为隐含地公开了具有一个或多个所公开或要求保护的出现在本公开或所附权利要求中的特征的任何恰当的组合(即,不矛盾或不互相排斥的特征的组合)的任何实施方案,包括可能在本文中未被明确地公开的那些组合。此外,出于公开的目的,

所附的从属权利要求中的每一个应解释为犹如以多种从属形式撰写并且从属于并不会不一致的所有前述权利要求。还应注意到,所附权利要求的范围不必包括本文公开的主题的全部。

[0189] 出于本公开和所附权利要求的目的,连词“或”被解释为包含地(例如,“狗或猫”将被解释为“狗、或猫、或两者”;例如,“狗、猫或鼠”将被解释“狗、或猫、或鼠、或任意两个、或全部三个”),除非:(i) 另外明确指出,例如,通过使用“...或...”、“中的仅一个”或类似的语言;或(ii) 列出的可选项中的两个或更多个在特定语境中是互斥的,在这种情况下“或”将仅包含涉及非互斥的可选项的那些组合。出于本公开和所附权利要求的目的,词语“包含”、“包括”、“具有”以及其变形无论它们在何处出现,都应被解释为开放式术语,具有犹如在其中的每个实例之后附加的短语“至少”时所具有相同含义,除非另有明确的声明。

[0190] 在所附权利要求中,如果期望在装置权利要求中调用35USC§112(f)的规定,那么词语“装置(means)”将出现在该装置权利要求中。如果期望在方法权利要求中调用该规定,则语句“用于.....的步骤”将出现在该方法权利要求中。相反地,如果词语“装置”或“用于.....的步骤”没有出现在权利要求中,那么在该权利要求中将不意图调用35USC§112款(f)的规定。

[0191] 如果任何一个或多个公开在本文中通过引用并入且这些并入的公开的一部分或全部与本公开相冲突,或与本公开的范围不同,那么对于冲突的程度,更广泛的公开或更广泛的术语限定以本公开为准。如果这些并入的公开部分地或全部与另一个相冲突,那么对于冲突的程度以日期较晚的公开为准。

[0192] 根据需要的摘要是为了便于在专利文献内搜索特定的主题。然而,摘要并不旨在暗示其中记载的任何元素、特征或限制都必须包括在任何特定的权利要求中。每一项权利要求所包含的主题的范围将只由该权利要求的记载决定。

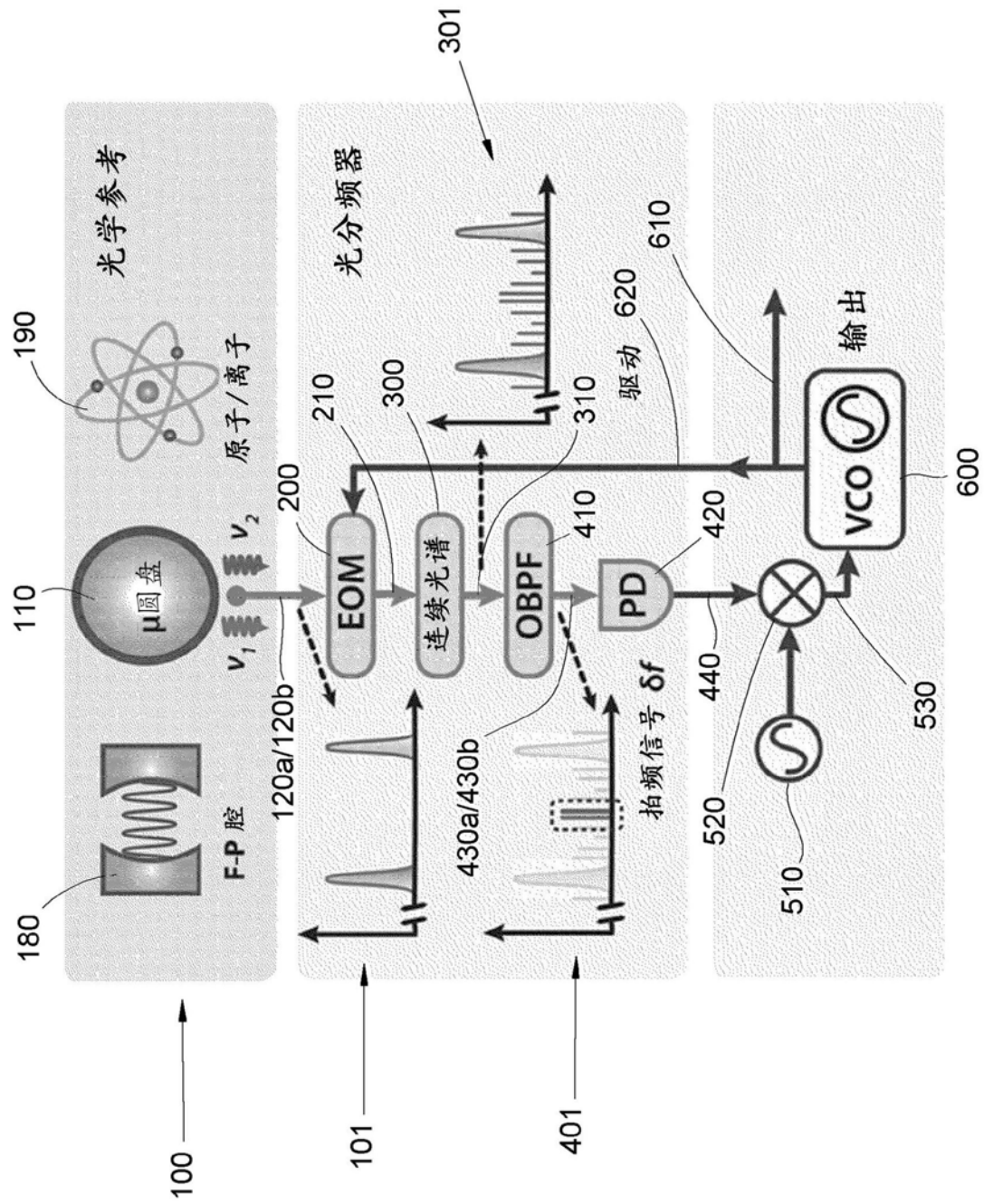


图1

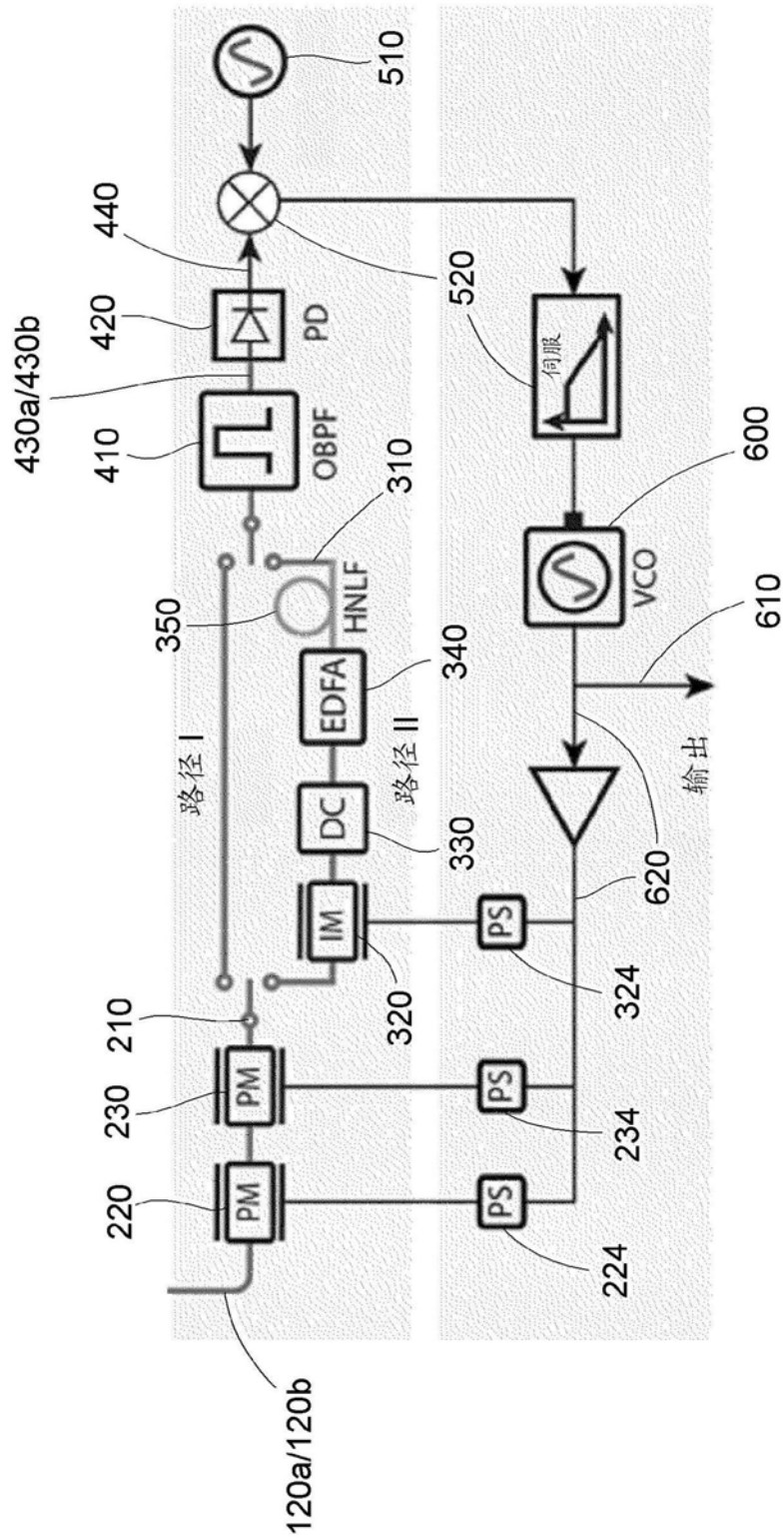


图2

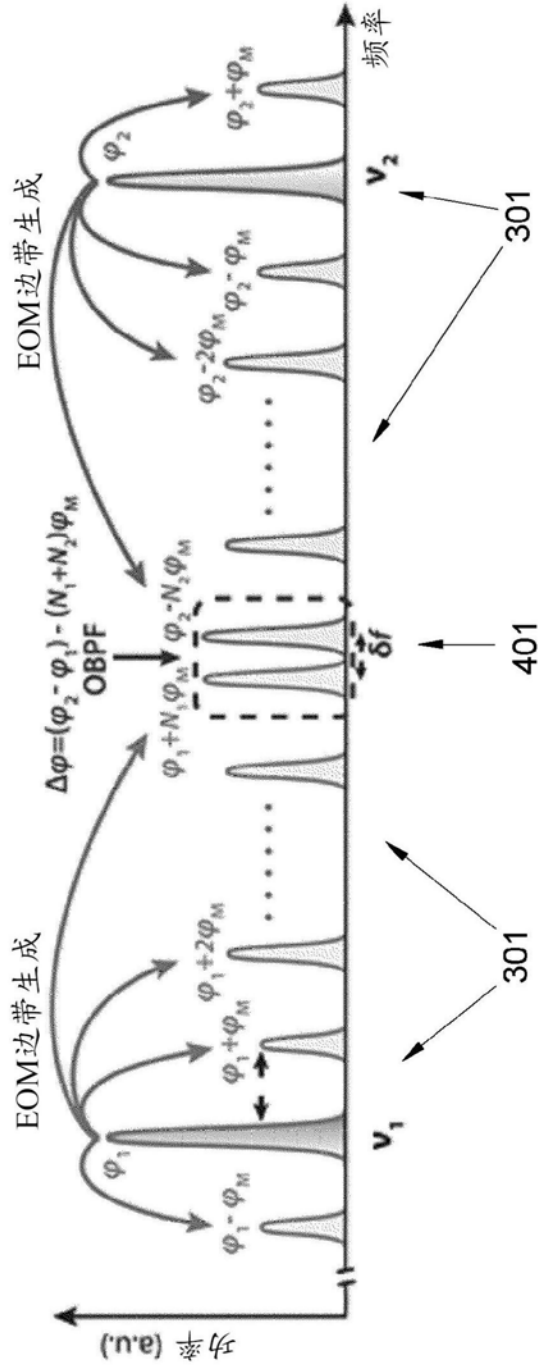


图3

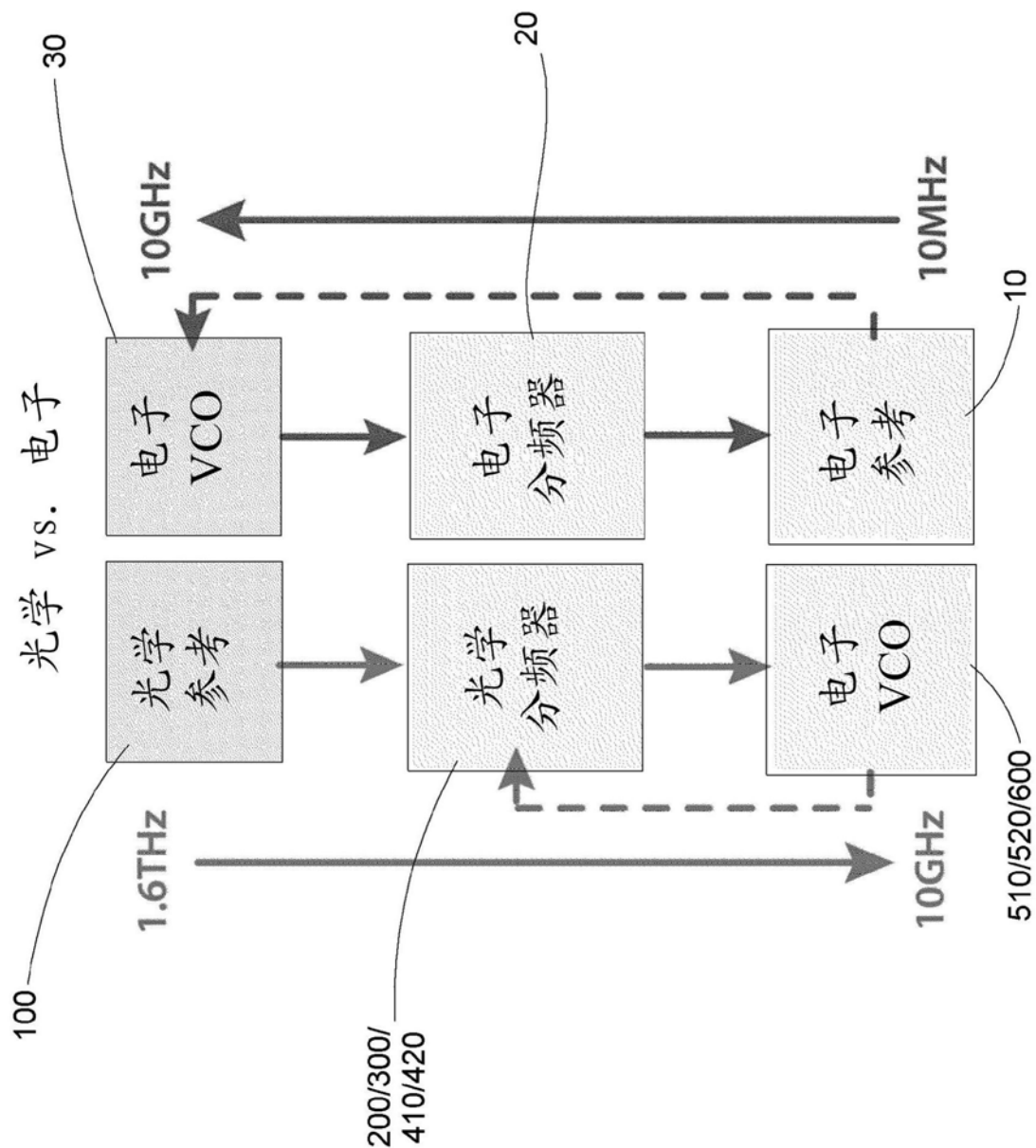


图4

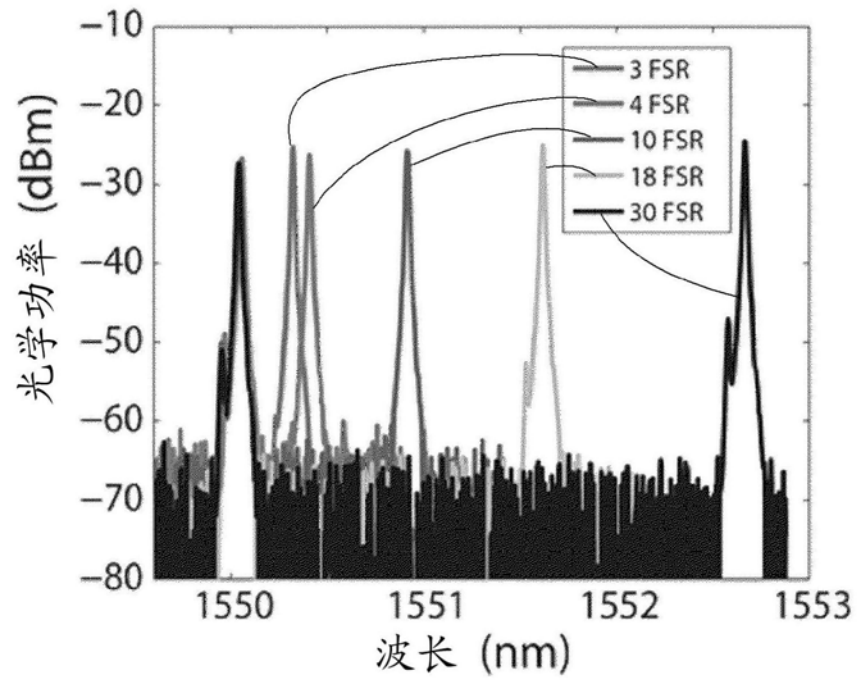


图5A

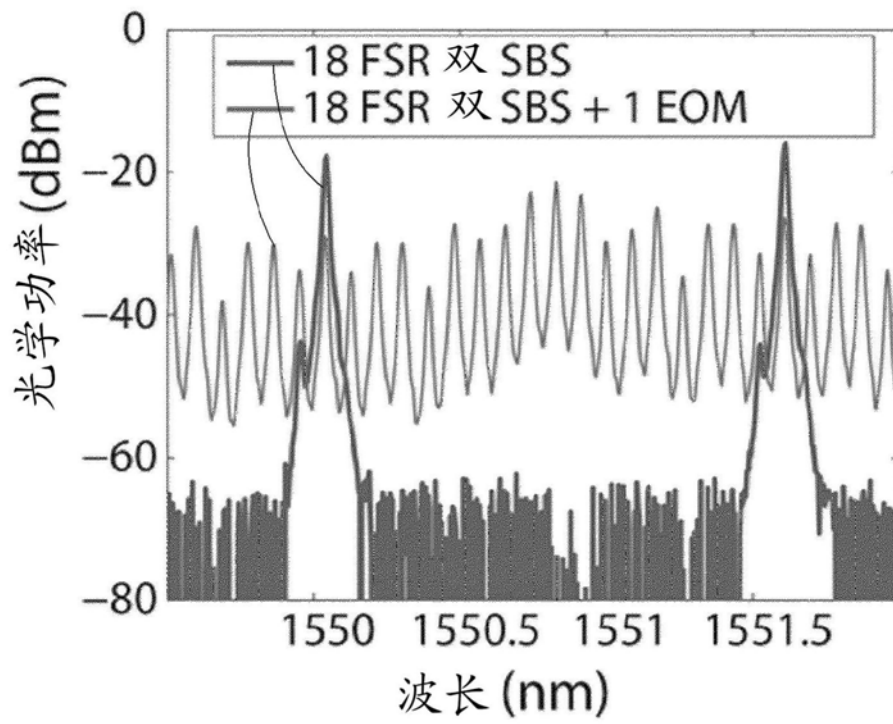


图5B

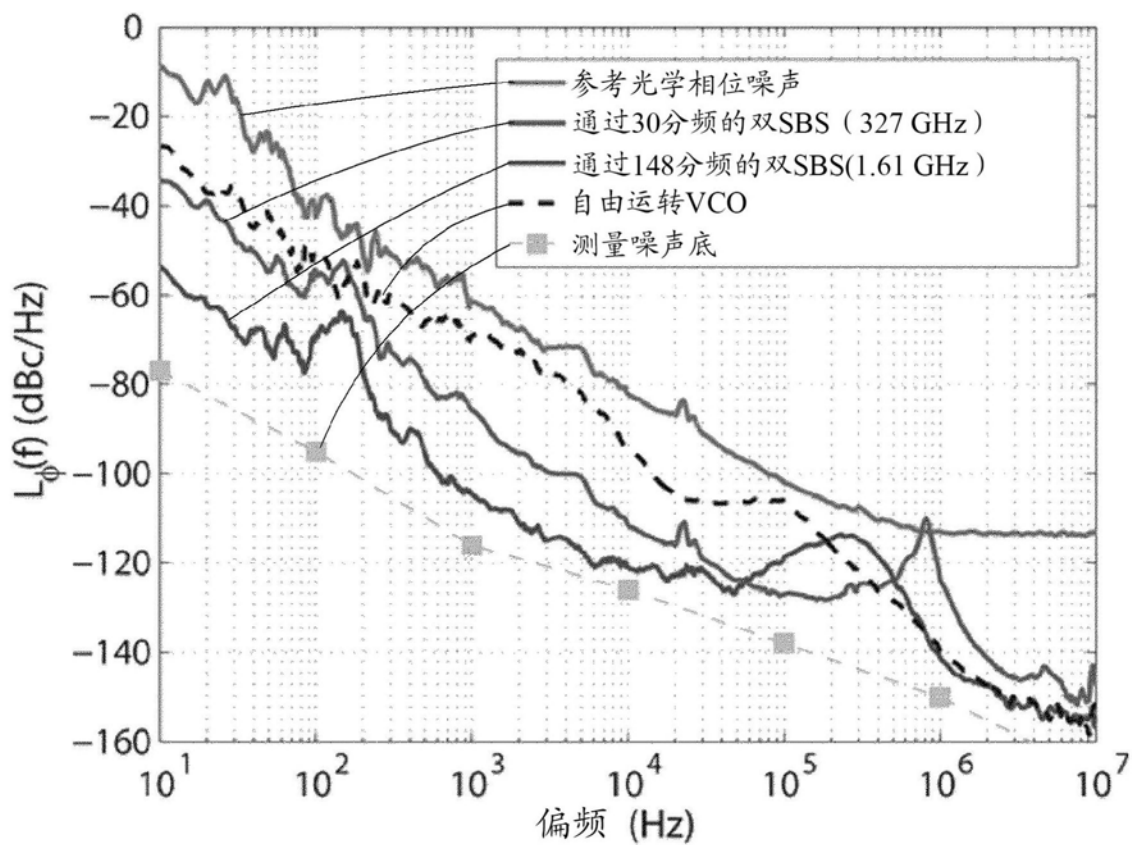


图5C

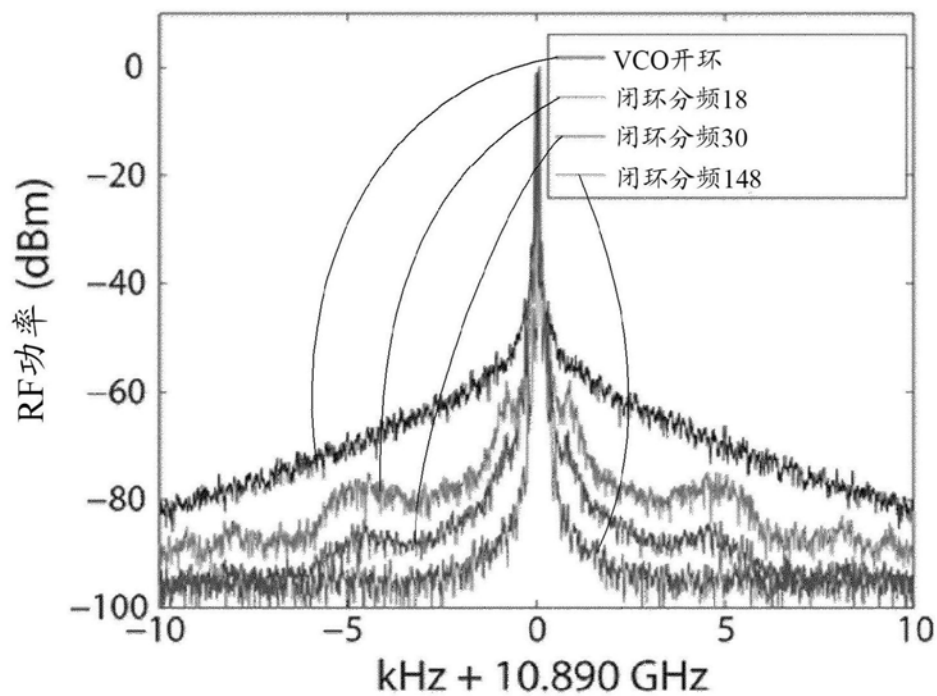


图5D

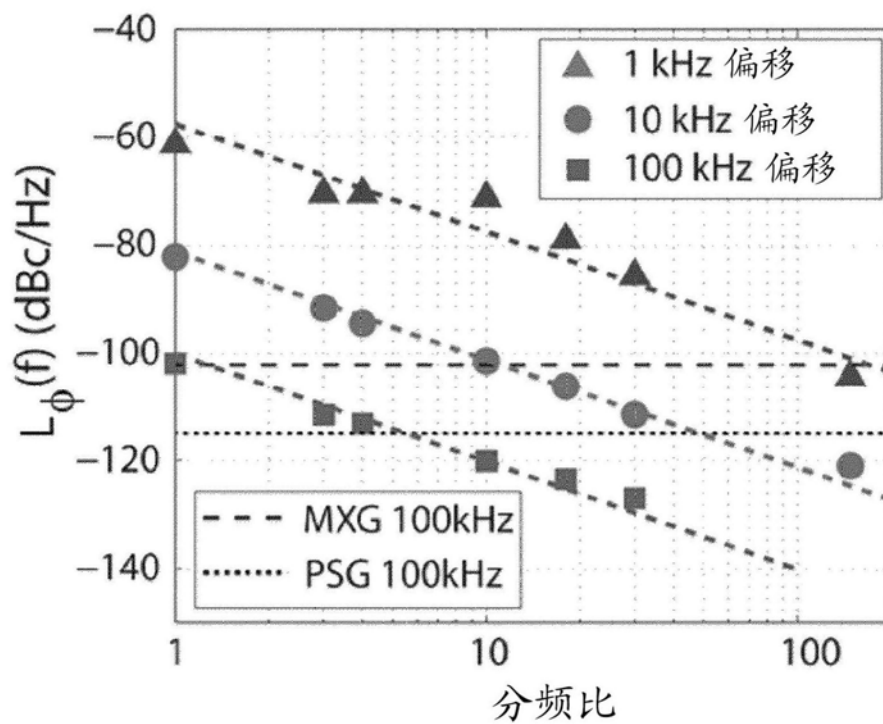


图5E

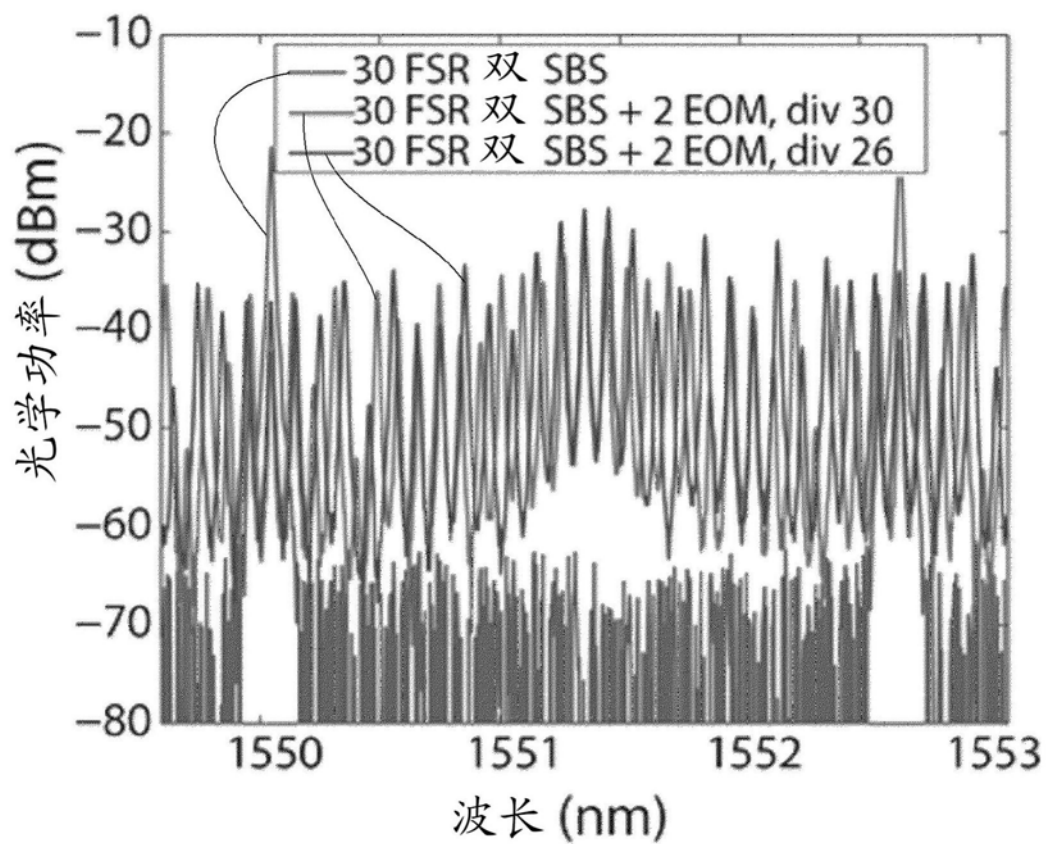


图6A

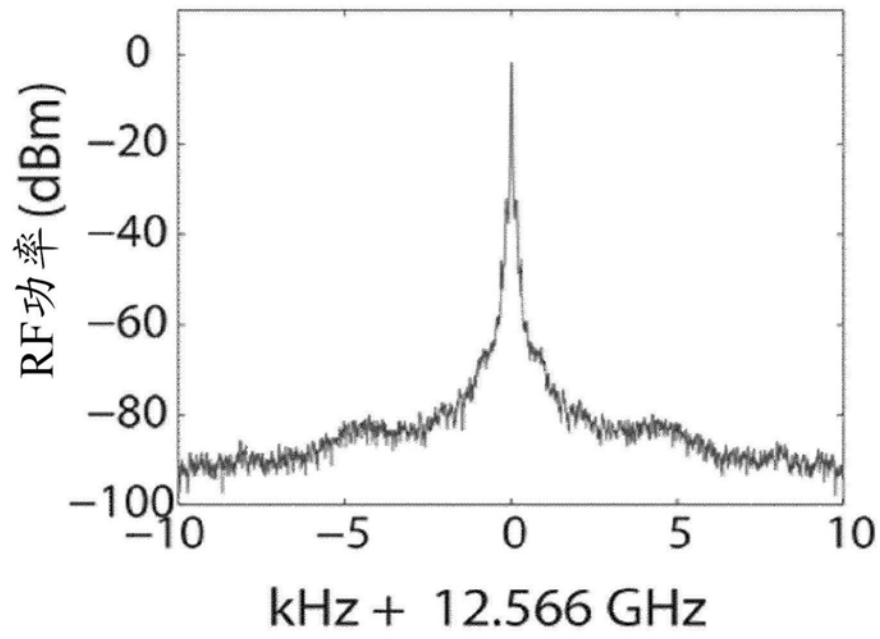


图6B

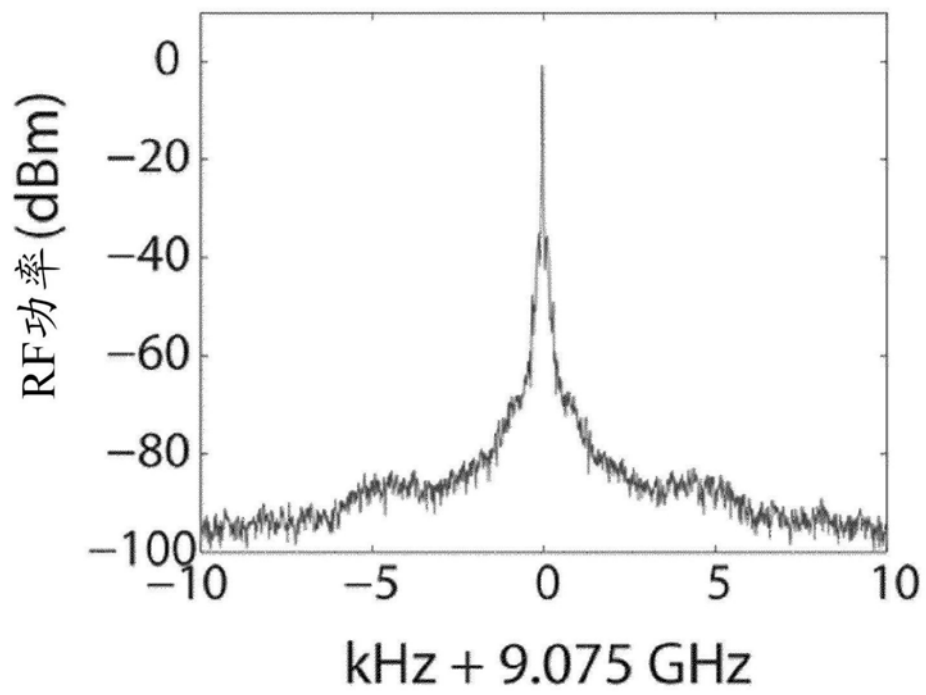


图6C

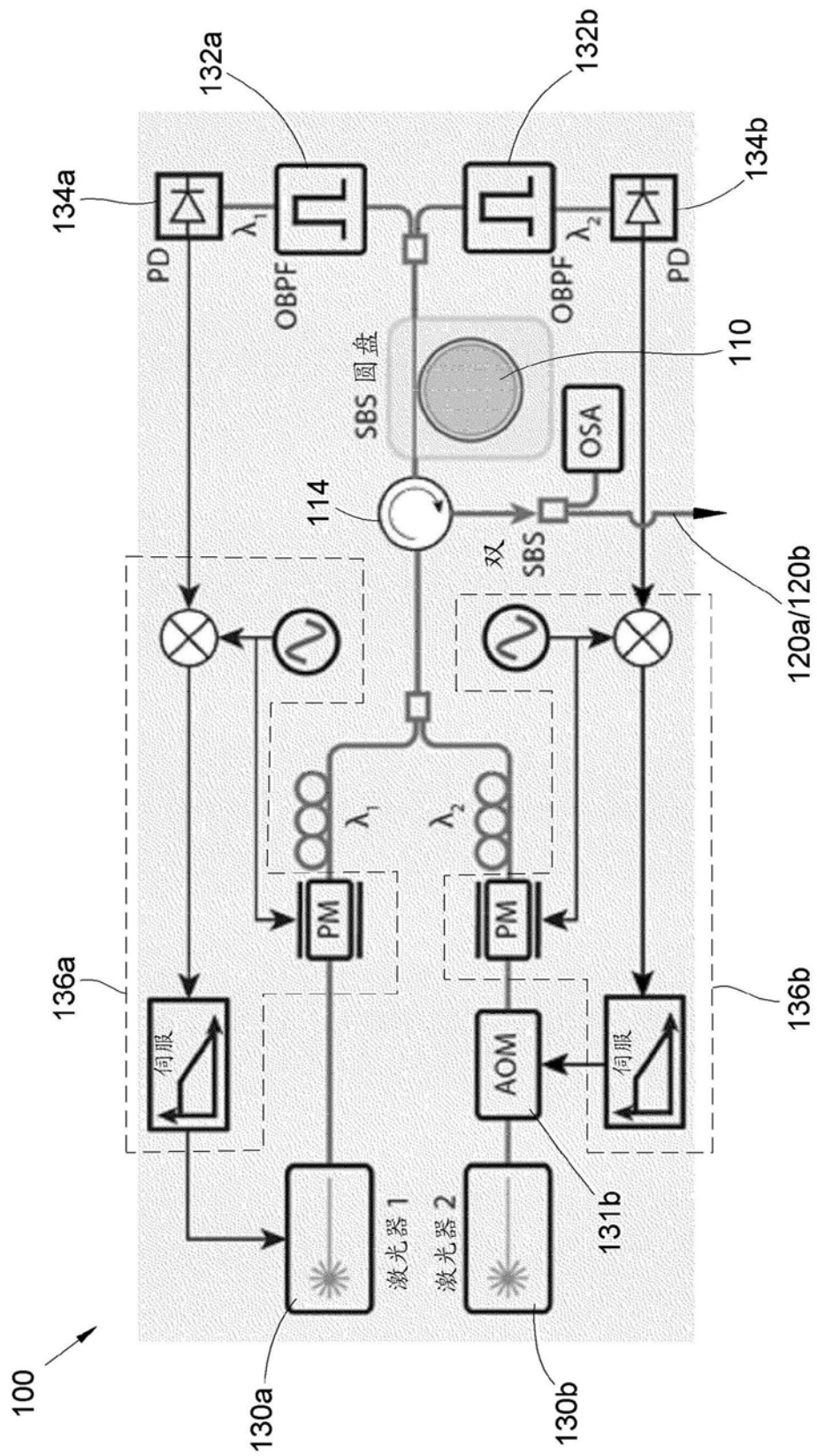


图7

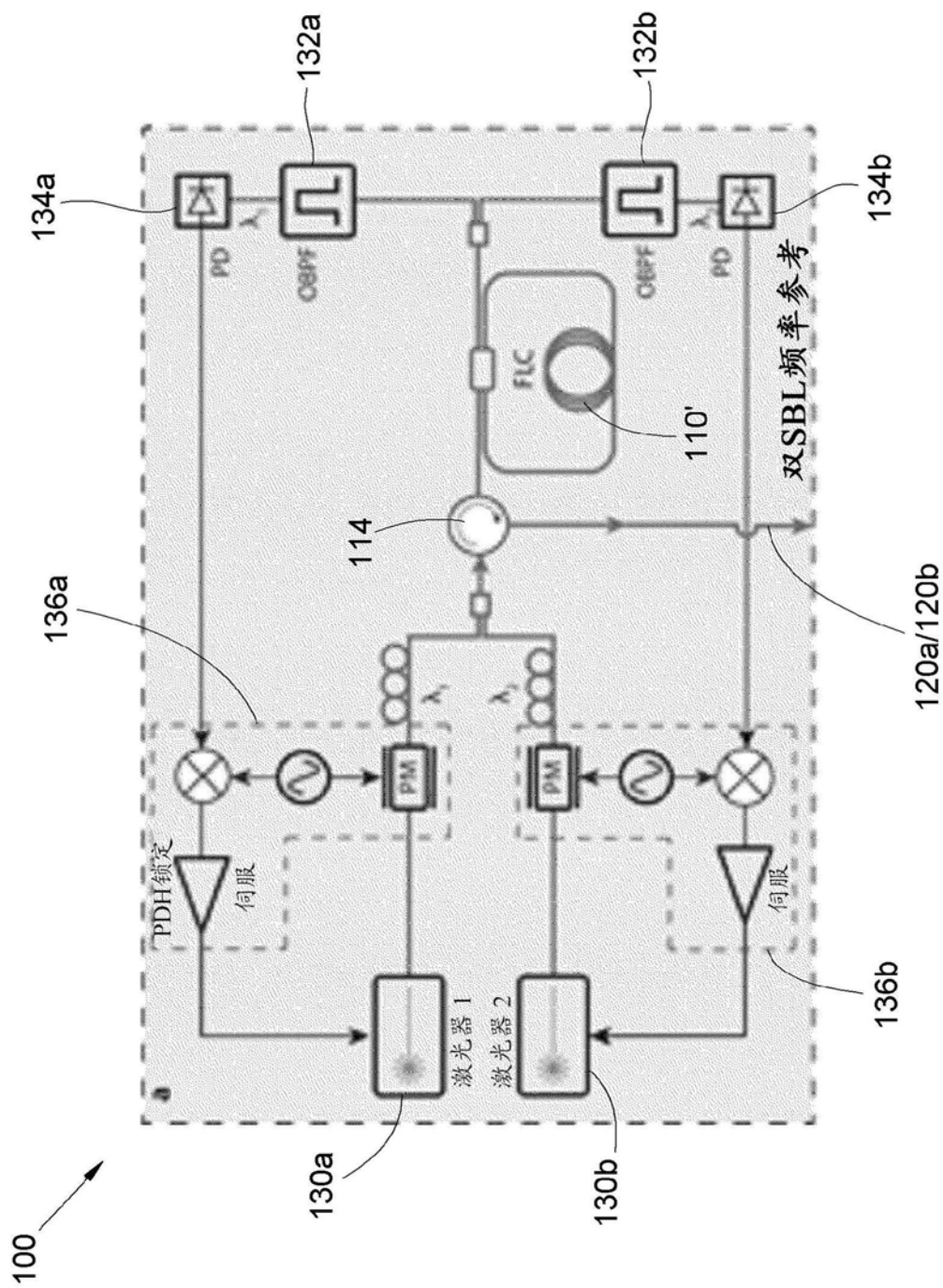


图8

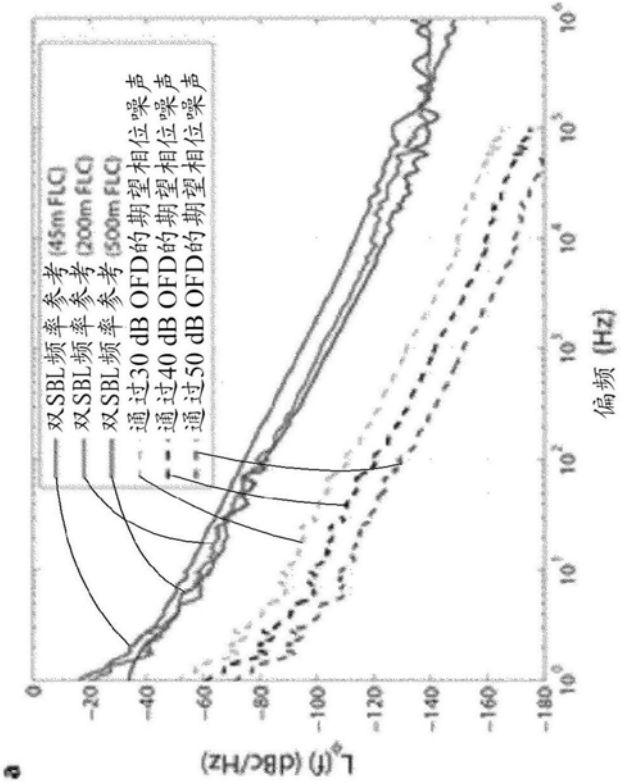


图9A

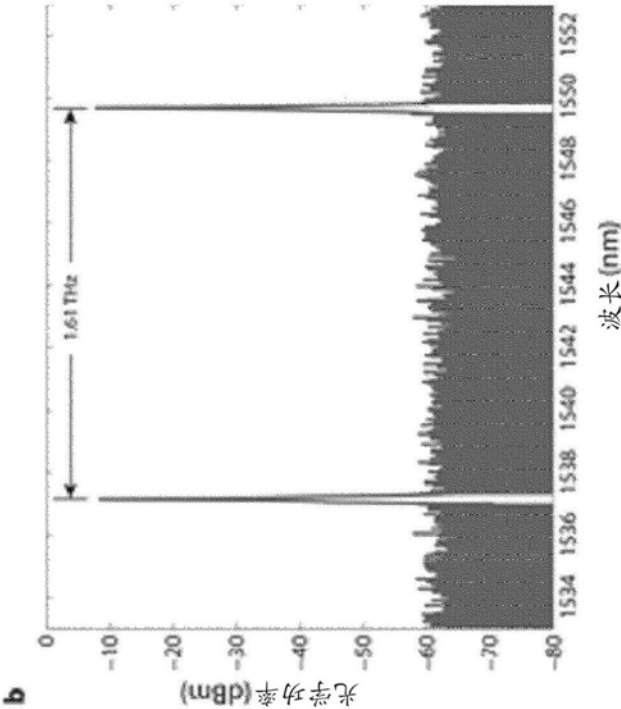


图9B