

证书号第 5532416 号



发明专利证书

发明名称：光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法

发明人：息朝祥;黄鑫;杨悦晨;姜震;宫新保;何广强

专利号：ZL 2021 1 1371372.1

专利申请日：2021 年 11 月 18 日

专利权人：上海交通大学

地址：200240 上海市闵行区东川路 800 号

授权公告日：2022 年 10 月 25 日

授权公告号：CN 114061913 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长
申长雨

申长雨



证书号第 5532416 号

专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年 11 月 18 日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

申请日时本专利记载的申请人、发明人信息如下：

申请人：

上海交通大学

发明人：

息朝祥；黄鑫；杨悦晨；姜震；宫新保；何广强



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114061913 A

(43) 申请公布日 2022. 02. 18

(21) 申请号 202111371372.1

(22) 申请日 2021.11.18

(71) 申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72) 发明人 息朝祥 黄鑫 杨悦晨 姜震

宫新保 何广强

(74) 专利代理机构 上海恒慧知识产权代理事务

所(特殊普通合伙) 31317

代理人 刘翠

(51) Int. Cl.

G01M 11/02 (2006.01)

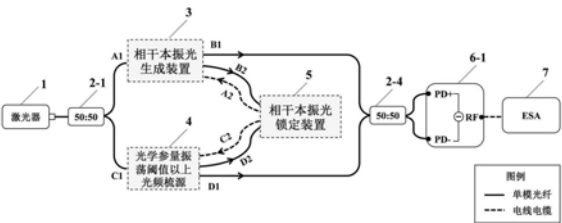
权利要求书4页 说明书14页 附图3页

(54) 发明名称

光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法

(57) 摘要

本发明提供了一种光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法。主激光器产生的激光由50:50分光器分开,分别用于相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳的生成。相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳由锁定装置锁定后,一同接入50:50分光器,再接入平衡零差探测器;最终平衡零差探测器的输出信号接入频谱分析仪。本发明将光学参量振荡阈值以上光频梳和相干本振光锁定,可以提高量子特性检测的稳定性,解决光学自由光谱范围远大于射频信号源频率的问题,避免了高频信号的电光调制和激光器锁相,可以高效地进行量子特性检测。



1. 一种光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置,其特征在于,包括:

相干本振光生成装置、光学参量振荡阈值以上光频梳源、相干本振光锁定装置以及检测装置;其中:

所述相干本振光生成装置,用于接收第一路泵浦激光,生成相干本振光输出至检测装置;

所述光学参量振荡阈值以上光频梳源,用于接收第二路泵浦激光,并利用该路泵浦激光作为主泵浦激光,产生光学参量振荡阈值以上光频梳后输出检测装置;

所述相干本振光锁定装置,用于对所述相干本振光生成装置和所述光学参量振荡阈值以上光频梳源进行持续的频率锁定;

所述检测装置,用于在频率锁定状态下,将所述相干本振光和所述光学参量振荡阈值以上光频梳合束后进行量子特性检测。

2. 根据权利要求1所述的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置,其特征在于,所述相干本振光生成装置,包括:辅助泵浦激光器、第一光纤放大器、第一光隔离器、第一光环行器、第一光纤布拉格光栅FBG1、第一偏振控制器、第二光纤放大器、第二光隔离器、第二光环行器、第一光纤布拉格光栅FBG2、第二偏振控制器、第三光环行器、第四光环行器、第一温度控制模块、第一具有微加热器的集成微腔和第一电流控制器;其中:

所述第一路泵浦激光依次经过所述第一光纤放大器、第一光隔离器、第一光环行器、第一偏振控制器和第三光环行器后,正向输入至所述第一具有微加热器的集成微腔;所述第一光纤布拉格光栅FBG1与所述第一光环行器连接,形成第一噪声过滤结构;

所述辅助泵浦激光器、第二光纤放大器、第二光隔离器、第二光环行器、第二偏振控制器和第四光环行器依次连接后,反向输入至所述第一具有微加热器的集成微腔;所述第一光纤布拉格光栅FBG2与所述第二光环行器连接,形成第二噪声过滤结构;

所述第一具有微加热器的集成微腔安装于所述第一温度控制模块上,所述第一具有微加热器的集成微腔的微加热器与所述第一电流控制器调控连接;所述第一具有微加热器的集成微腔用于产生光孤子,所述第一电流控制器用于精调所述光孤子的自由光谱范围。

3. 根据权利要求2所述的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置,其特征在于,所述相干本振光生成装置,还包括:第五光环行器、第二光纤布拉格光栅FBG1、第二光纤布拉格光栅FBG2、第一10:90分光器、第二10:90分光器、第一光谱分析仪、第二50:50分光器、第一可调带通光滤波器、第一可调光衰减器、第三偏振控制器、第二可调带通光滤波器、第二可调光衰减器、第四偏振控制器、第三50:50分光器、第二光谱分析仪、低噪声光纤放大器、第三光隔离器、第三可调光衰减器、相位调制器、波形发生器和第五偏振控制器;其中:

所述第五光环行器、第二光纤布拉格光栅FBG1和第二光纤布拉格光栅FBG2依次连接,形成泵浦光过滤结构,用于过滤与主泵浦激光和辅助泵浦激光频率一致的频率成分;所述第一10:90分光器的10%分离输出端与所述第二10:90分光器输入端连接,所述第一10:90分光器的90%分离输出端与所述第二50:50分光器输入端连接;所述第二10:90分光器的10%分离输出端连接至所述第一光谱分析仪,用于检测光谱,所述第二10:90分光器的90%分离输出端与所述相干本振光锁定装置连接,用于进行频率锁定;所述第二50:50分光器分出两路,其中一路依次接入第一可调带通光滤波器、第一可调光衰减器、第三偏振控制器、第三50:50分光器的一个输入端,另一路依次接入第二可调带通光滤波器、第二可调光衰减

器、第四偏振控制器、第三50:50分光器的另一个输入端,从而利用所述第一可调带通光滤波器和第二可调带通光滤波器选取出所述相干本振光;所述第三50:50分光器的一个输出端连接至所述第二光谱分析仪,用于检测光谱,所述第三50:50分光器的另一个输出端连接至所述低噪声光纤放大器;所述低噪声光纤放大器、第三光隔离器、第三可调光衰减器、相位调制器和第五偏振控制器依次连接后与所述检测装置连接;所述波形发生器与所述相位调制器调控连接,实现对所述相干本振光的相位调制。

4. 根据权利要求1所述的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置,其特征在于,所述光学参量振荡阈值以上光频梳源,包括第三光纤放大器、第四光隔离器、第六光环行器、第三光纤布拉格光栅FBG1、第四可调光衰减器、第六偏振控制器、第二具有微加热器的集成微腔、第二温度控制模块、第二电流控制器、第七光环行器、1:99分光器、第三10:90分光器、第四光纤布拉格光栅FBG1和第七偏振控制器;其中:

所述第二路泵浦激光依次经过所述第三光纤放大器、第四光隔离器、第六光环行器、第四可调光衰减器和第六偏振控制器后,正向输入至所述第二具有微加热器的集成微腔;所述第三光纤布拉格光栅FBG1与所述第六光环行器连接,形成第三噪声过滤结构;

所述第二具有微加热器的集成微腔安装于所述第二温度控制模块上,所述第二具有微加热器的集成微腔的微加热器与所述第二电流控制器调控连接;

所述第二电流控制器与所述第二具有微加热器的集成微腔调控连接;所述第二具有微加热器的集成微腔用于产生光学参量振荡阈值以上光频梳,所述第二电流控制器用于精调所述光学参量振荡阈值以上光频梳的自由光谱范围;

所述第二具有微加热器的集成微腔的输出端、所述第七光环行器和所述1:99分光器的输入端依次连接,所述1:99分光器的1%分离输出端与所述第三光谱分析仪连接,所述1:99分光器的99%分离输出端与所述第三10:90分光器的输入端连接;所述第三10:90分光器的10%分离输出端与所述相干本振光锁定装置连接,用于进行频率锁定,所述第三10:90分光器的90%分离输出端与所述第三光纤布拉格光栅FBG1和第七偏振控制器依次连接后与所述检测装置连接。

5. 根据权利要求1所述的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置,其特征在于,所述相干本振光锁定装置,包括:第三可调带通光滤波器、第四可调带通光滤波器、第五可调光衰减器、单边带调制器、第八偏振控制器、第九偏振控制器、第五50:50分光器、第二平衡零差探测器、射频滤波器、可调射频信号源、PID反馈控制器和射频信号放大器;其中:

所述第三可调带通光滤波器、单边带调制器、第八偏振控制器和第五50:50分光器的一个输入端依次连接;所述第四可调带通光滤波器、第五可调光衰减器、第九偏振控制器和第五50:50分光器的另一个输入端依次连接;所述第五50:50分光器的两个输出端接入所述第二平衡零差探测器;所述第二平衡零差探测器的输出端、射频滤波器和PID反馈控制器依次连接;所述射频信号放大器的信号发生端、射频信号放大器和单边带调制器射频信号输入端依次连接;所述射频信号放大器的参考时钟信号端连接至所述PID反馈控制器;所述PID反馈控制器输出信号连接至所述相干本振光生成装置和所述光学参量振荡阈值以上光频梳源,分别用于调控所述相干本振光生成装置和所述光学参量振荡阈值以上光频梳源的电流控制器,进而对所述相干本振光生成装置和所述光学参量振荡阈值以上光频梳源进行持

续的频率锁定。

6. 根据权利要求1所述的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置,其特征
在于,所述检测装置,包括:第四50:50分光器、第一平衡零差探测器和频谱分析仪;其中:

所述相干本振光和所述光学参量振荡阈值以上光频梳分别输入至所述第四50:50分光
器的两个输入端,所述第四50:50分光器的两个输出端与所述第一平衡零差探测器连接,所
述第一平衡零差探测器与所述频谱分析仪连接。

7. 根据权利要求1-5中任一项所述的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装
置,其特征还在于,还包括:主泵浦激光器和第一50:50分光器;其中:

所述主泵浦激光器,用于产生泵浦激光;

所述第一50:50分光器,用于将所述主泵浦激光器产生的泵浦激光分为两路。

8. 根据权利要求7所述的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置,其特征
在于,还包括如下任意一项或任意多项:

-所述光学参量振荡阈值以上光频梳源的泵浦激光波长与所述主泵浦激光器输出泵浦
激光波长一致且相干,所述光学参量振荡阈值以上光频梳源的待测频率成分在所述相干本
振光生成装置中具有对应的光谱谱线;

-所述主泵浦激光器和所述辅助泵浦激光器均采用可调谐的窄线宽连续光纤激光器,
其输出波长与所述相干本振光生成装置生成光孤子时所需的激光器波长一致;

-所述第一具有微加热器的集成微腔和第二具有微加热器的集成微腔的波导的输入输
出两端分别封装有单模光纤;

-所述第一具有微加热器的集成微腔和第二具有微加热器的集成微腔的微加热器电极
封装有电学接口;

-所述可调带通滤波器的带宽与所述光孤子的光谱谱线宽度匹配,并且调节范围涵盖
量子压缩态待测频率成分;

-所述相位调制器周期性地从0到 2π 调制相干本振光的相位,用于配合实现零差探测;

-所述波形发生器用于产生周期性地低频三角波信号;

-所述平衡零差探测器工作在散粒噪声极限状态;

-所述频谱分析仪工作在零扫宽模式下。

9. 一种光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测方法,其特征还在于,包括:

将泵浦激光分为两路;

利用其中一路泵浦激光生成相干本振光;

利用另一路泵浦激光生成光学参量振荡阈值以上光频梳;

对所述相干本振光和所述光学参量振荡阈值以上光频梳进行持续的频率锁定;

在频率锁定状态下,将所述相干本振光和所述光学参量振荡阈值以上光频梳合束后进
行量子特性检测。

10. 根据权利要求9所述的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测方法,其特征
在于,所述方法还包括如下任意一项或任意多项:

-所述利用其中一路泵浦激光生成相干本振光,包括:

采用双向泵浦法,利用所述泵浦激光生成光孤子,并在所述光孤子的基础上提取并处
理所需的频率成分,使得所述光孤子光谱分量覆盖所述光学参量振荡阈值以上光频梳的待

测频率成分；

从所述光孤子中分离出与所述待测频率成分相应的相干本振光，并对所述相干本振光进行相位调制，完成相应本振光的生成；-所述利用另一路泵浦激光生成光学参量振荡阈值以上光频梳，包括：

采用单向泵浦法，产生光学参量振荡光学参量振荡阈值以上的光频梳；

-所述对相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳进行频率锁定，包括：

从待锁频的光学参量振荡阈值以上光频梳和用于生成相干本振光的光孤子中选取有待锁定的一对频率成分；

将待锁频的光信号进行单边带调制；

将单边带调制后的所述待锁频的光信号与从所述光孤子中选取的频率成分进行拍频；

探测并提取出单边带调制对应频带处的误差信号；

利用控制电流调控所述光学参量振荡阈值以上光频梳和所述光孤子的自由光谱范围，最终实现对误差信号与参考时钟信号的锁定，完成对所述相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳的频率锁定；

-所述将相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳合束后进行量子特性检测，包括：

将所述光学参量振荡阈值以上光频梳的待测频率成分与所述相干本振光进行拍频；

在散粒噪声极限状态进行平衡零差探测；在零扫宽模式下进行频率分析；记录在所述相干本振光处于不同相位时频谱分析结果中特定频点处的功率值。

光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及量子特性检测技术领域,具体地,涉及一种基于频率锁定的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法。

背景技术

[0002] 基于光学微纳谐振腔(简称微腔)的光学频率梳为非线性物理研究提供了一个多功能的平台,并具有从计量学到光谱学的广泛用途。量子特性是微腔光频梳的一个未开发的方面,其中数百个等距频率模式之间的无条件纠缠可以作为可扩展的通用量子计算和量子网络的关键成分。光学微纳谐振腔采用克尔非线性效应,通过腔体谐振模式之间的四波混频提供宽带的参数增益。泵浦光子在四波混频中湮灭,从而在较低和较高的频率上产生信号光子和闲置光子。克尔参数化过程已经被用来证明基于微腔的光频梳(Science,2011,332(6029):555-559.)和耗散性克尔孤子(Nature photonics,2019,13(3):158-169.)。由于微腔光频梳有很大的自由光谱范围(FSR),从几千兆赫兹到1太赫兹(Optica,2017,4(2):193-203.),它能够从一个单一的微谐振腔提供数百个频率复用的量子通道,而且通过现成的波分复用滤波器就可以获得单个量子通道。在确定性体系中的光学参量振荡(OPO)阈值以上光频梳,不同频率模式之间的纠缠可以确定性地产生和检测,这将是朝着光子芯片上的可扩展量子架构迈出的重要一步。

[0003] 然而,微腔光频梳这么大的FSR为量子探测方面带来了相干本振光难以制备、相干本振光相位噪声积累等新的问题。目前电光调制方法(Nature Communications,2021,12(1):1-8)只能使用于FSR较小的微腔;也可以采用多台可调谐激光器锁相(Science advances,2020,6(39)),但是此方法在锁定激光器相位时也需要进行高频电光调制,锁定系统复杂。

发明内容

[0004] 本发明针对现有技术中存在的上述不足,提供了一种基于频率锁定的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法。

[0005] 根据本发明的一个方面,提供了一种光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置,包括:

[0006] 相干本振光生成装置、光学参量振荡阈值以上光频梳源、相干本振光锁定装置以及检测装置;其中:

[0007] 所述相干本振光生成装置,用于接收第一路泵浦激光,生成相干本振光输出至检测装置;

[0008] 所述光学参量振荡阈值以上光频梳源,用于接收第二路泵浦激光,并利用该路泵浦激光作为主泵浦激光,产生光学参量振荡阈值以上光频梳后输出检测装置;

[0009] 所述相干本振光锁定装置,用于对所述相干本振光生成装置和所述光学参量振荡阈值以上光频梳源进行持续的频率锁定;

[0010] 所述检测装置,用于在频率锁定状态下,将所述相干本振光和所述光学参量振荡阈值以上光频梳合束后进行量子特性检测。

[0011] 优选地,所述相干本振光生成装置,包括:辅助泵浦激光器、第一光纤放大器、第一光隔离器、第一光环行器、第一光纤布拉格光栅FBG1、第一偏振控制器、第二光纤放大器、第二光隔离器、第二光环行器、第一光纤布拉格光栅FBG2、第二偏振控制器、第三光环行器、第四光环行器、第一温度控制模块、第一具有微加热器的集成微腔和第一电流控制器;其中:

[0012] 所述第一路泵浦激光依次经过所述第一光纤放大器、第一光隔离器、第一光环行器、第一偏振控制器和第三光环行器后,正向输入至所述第一具有微加热器的集成微腔;所述第一光纤布拉格光栅FBG1与所述第一光环行器连接,形成第一噪声过滤结构;

[0013] 所述辅助泵浦激光器、第二光纤放大器、第二光隔离器、第二光环行器、第二偏振控制器和第四光环行器依次连接后,反向输入至所述第一具有微加热器的集成微腔;所述第一光纤布拉格光栅FBG2与所述第二光环行器连接,形成第二噪声过滤结构;

[0014] 所述第一具有微加热器的集成微腔安装于所述第一温度控制模块上,所述第一具有微加热器的集成微腔的微加热器与所述第一电流控制器调控连接;所述第一具有微加热器的集成微腔用于产生光孤子,所述第一电流控制器用于精调所述光孤子的自由光谱范围。

[0015] 优选地,所述相干本振光生成装置,还包括:第五光环行器、第二光纤布拉格光栅FBG1、第二光纤布拉格光栅FBG2、第一10:90分光器、第二10:90分光器、第一光谱分析仪、第二50:50分光器、第一可调带通光滤波器、第一可调光衰减器、第三偏振控制器、第二可调带通光滤波器、第二可调光衰减器、第四偏振控制器、第三50:50分光器、第二光谱分析仪、低噪声光纤放大器、第三光隔离器、第三可调光衰减器、相位调制器、波形发生器和第五偏振控制器;其中:

[0016] 所述第五光环行器、第二光纤布拉格光栅FBG1和第二光纤布拉格光栅FBG2依次连接,形成泵浦光过滤结构,用于过滤与主泵浦激光和辅助泵浦激光频率一致的频率成分;所述第一10:90分光器的10%分离输出端与所述第二10:90分光器输入端连接,所述第一10:90分光器的90%分离输出端与所述第二50:50分光器输入端连接;所述第二10:90分光器的10%分离输出端连接至所述第一光谱分析仪,用于检测光谱,所述第二10:90分光器的90%分离输出端与所述相干本振光锁定装置连接,用于进行频率锁定;所述第二50:50分光器分出两路,其中一路依次接入第一可调带通光滤波器、第一可调光衰减器、第三偏振控制器、第三50:50分光器的一个输入端,另一路依次接入第二可调带通光滤波器、第二可调光衰减器、第四偏振控制器、第三50:50分光器的另一个输入端,从而利用所述第一可调带通光滤波器和第二可调带通光滤波器选取出所述相干本振光;所述第三50:50分光器的一个输出端连接至所述第二光谱分析仪,用于检测光谱,所述第三50:50分光器的另一个输出端连接至所述低噪声光纤放大器;所述低噪声光纤放大器、第三光隔离器、第三可调光衰减器、相位调制器和第五偏振控制器依次连接后与所述检测装置连接;所述波形发生器与所述相位调制器调控连接,实现对所述相干本振光的相位调制。

[0017] 优选地,所述光学参量振荡阈值以上光频梳源,包括第三光纤放大器、第四光隔离器、第六光环行器、第三光纤布拉格光栅FBG1、第四可调光衰减器、第六偏振控制器、第二具有微加热器的集成微腔、第二温度控制模块、第二电流控制器、第七光环行器、1:99分光器、

第三10:90分光器、第四光纤布拉格光栅FBG1和第七偏振控制器;其中:

[0018] 所述第二路泵浦激光依次经过所述第三光纤放大器、第四光隔离器、第六光环行器、第四可调光衰减器和第六偏振控制器后,正向输入至所述第二具有微加热器的集成微腔;所述第三光纤布拉格光栅FBG1与所述第六光环行器连接,形成第三噪声过滤结构;

[0019] 所述第二具有微加热器的集成微腔安装于所述第二温度控制模块上,所述第二具有微加热器的集成微腔的微加热器与所述第二电流控制器调控连接;

[0020] 所述第二电流控制器与所述第二具有微加热器的集成微腔调控连接;所述第二具有微加热器的集成微腔用于产生光学参量振荡阈值以上光频梳,所述第二电流控制器用于精调所述光学参量振荡阈值以上光频梳的自由光谱范围;

[0021] 所述第二具有微加热器的集成微腔的输出端、所述第七光环行器和所述1:99分光器的输入端依次连接,所述1:99分光器的1%分离输出端与所述第三光谱分析仪连接,所述1:99分光器的99%分离输出端与所述第三10:90分光器的输入端连接;所述第三10:90分光器的10%分离输出端与所述相干本振光锁定装置连接,用于进行频率锁定,所述第三10:90分光器的90%分离输出端与所述第三光纤布拉格光栅FBG1和第七偏振控制器依次连接后与所述检测装置连接。

[0022] 优选地,所述相干本振光锁定装置,包括:第三可调带通光滤波器、第四可调带通光滤波器、第五可调光衰减器、单边带调制器、第八偏振控制器、第九偏振控制器、第五50:50分光器、第二平衡零差探测器、射频滤波器、可调射频信号源、PID反馈控制器和射频信号放大器;其中:

[0023] 所述第三可调带通光滤波器、单边带调制器、第八偏振控制器和第五50:50分光器的一个输入端依次连接;所述第四可调带通光滤波器、第五可调光衰减器、第九偏振控制器和第五50:50分光器的另一个输入端依次连接;所述第五50:50分光器的两个输出端接入所述第二平衡零差探测器;所述第二平衡零差探测器的输出端、射频滤波器和PID反馈控制器依次连接;所述射频信号放大器的信号发生端、射频信号放大器he鹅单边带调制器射频信号输入端依次连接;所述射频信号放大器的参考时钟信号端连接至所述PID反馈控制器;所述PID反馈控制器输出信号连接至所述相干本振光生成装置和所述光学参量振荡阈值以上光频梳源,分别用于调控所述相干本振光生成装置和所述光学参量振荡阈值以上光频梳源的电流控制器,进而对所述相干本振光生成装置和所述光学参量振荡阈值以上光频梳源进行持续的频率锁定。

[0024] 优选地,所述检测装置,包括:第四50:50分光器、第一平衡零差探测器和频谱分析仪;其中:

[0025] 所述相干本振光和所述光学参量振荡阈值以上光频梳分别输入至所述第四50:50分光器的两个输入端,所述第四50:50分光器的两个输出端与所述第一平衡零差探测器连接,所述第一平衡零差探测器与所述频谱分析仪连接。

[0026] 优选地,所述检测装置还包括:主泵浦激光器和第一50:50分光器;其中:

[0027] 所述主泵浦激光器,用于产生泵浦激光;

[0028] 所述第一50:50分光器,用于将所述主泵浦激光器产生的泵浦激光分为两路。

[0029] 优选地,所述检测装置还包括如下任意一项或任意多项:

[0030] -所述光学参量振荡阈值以上光频梳源的泵浦激光波长与所述主泵浦激光器输出

泵浦激光波长一致且相干,所述光学参量振荡阈值以上光频梳源的待测频率成分在所述相干本振光生成装置中具有对应的光谱谱线;

[0031] -所述主泵浦激光器和所述辅助泵浦激光器均采用可调谐的窄线宽连续光纤激光器,其输出波长与所述相干本振光生成装置生成光孤子时所需的激光器波长一致;

[0032] -所述第一具有微加热器的集成微腔和第二具有微加热器的集成微腔的波导的输入输出两端分别封装有单模光纤;

[0033] -所述第一具有微加热器的集成微腔和第二具有微加热器的集成微腔的微加热器电极封装有电学接口;

[0034] -所述可调带通滤波器的带宽与所述光孤子的光谱谱线宽度匹配,并且调节范围涵盖量子压缩态待测频率成分;

[0035] -所述相位调制器周期性地从0到 2π 调制相干本振光的相位,用于配合实现零差探测;

[0036] -所述波形发生器用于产生周期性地低频三角波信号;

[0037] -所述平衡零差探测器工作在散粒噪声极限状态;

[0038] -所述频谱分析仪工作在零扫宽模式下。

[0039] 根据本发明的另一个方面,提供了一种光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测方法,包括:

[0040] 将泵浦激光分为两路;

[0041] 利用其中一路泵浦激光生成相干本振光;

[0042] 利用另一路泵浦激光生成光学参量振荡阈值以上光频梳;

[0043] 对所述相干本振光和所述光学参量振荡阈值以上光频梳进行持续的频率锁定;

[0044] 在频率锁定状态下,将所述相干本振光和所述光学参量振荡阈值以上光频梳合束后进行量子特性检测。

[0045] 优选地,所述利用其中一路泵浦激光生成相干本振光,包括:

[0046] 采用双向泵浦法,利用所述泵浦激光生成光孤子,并在所述光孤子的基础上提取并处理所需的频率成分,使得所述光孤子光谱分量覆盖所述光学参量振荡阈值以上光频梳的待测频率成分;

[0047] 从所述光孤子中分离出与所述待测频率成分相应的相干本振光,并对所述相干本振光进行相位调制,完成相应本振光的生成。

[0048] 优选地,所述利用另一路泵浦激光生成光学参量振荡阈值以上光频梳,包括:

[0049] 采用单向泵浦法,产生光学参量振荡光学参量振荡阈值以上的光频梳。

[0050] 优选地,所述对相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳进行频率锁定,包括:

[0051] 从待锁频的光学参量振荡阈值以上光频梳和用于生成相干本振光的稳定的光孤子中选取待锁定的一对频率成分;

[0052] 将待锁频的光信号进行单边带调制;

[0053] 将单边带调制后的所述待锁频的光信号与从所述稳定的光孤子中选取的频率成分进行拍频;

[0054] 探测并提取出单边带调制对应频带处的误差信号;

[0055] 利用控制电流调控所述光学参量振荡阈值以上光频梳和稳定的光孤子的自由光

谱范围,最终实现对误差信号与参考时钟信号的锁定,完成对所述相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳的频率锁定。

[0056] 优选地,所述将相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳合束后进行量子特性检测,包括:

[0057] 将所述光学参量振荡阈值以上光频梳的待测频率成分与相干本振光进行拍频;

[0058] 在散粒噪声极限状态进行平衡零差探测;在零扫宽模式下进行频率分析;

[0059] 记录在所述相干本振光处于不同相位时频谱分析结果中特定频点处的功率值。

[0060] 由于采用了上述技术方案,本发明与现有技术相比,具有如下至少一项的有益效果:

[0061] 本发明提供的锁定的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法,属于一种对光学参量振荡阈值以上光频梳进行量子特性探测的技术,采用的相干本振光生成方式基于光孤子产生,调试技术成熟,光孤子光谱中各个频率成分相干性好,噪声低,频率间隔一致性好。

[0062] 本发明提供的锁定的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法,相较于多台激光器锁相的方案,降低了对可调谐激光器的数量要求。

[0063] 本发明提供的锁定的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法,采用集成微腔,可以实现小型密封封装,提高器件对外部环境干扰因素的抵抗能力,简化系统构成,进一步提高系统稳定性。

[0064] 本发明提供的锁定的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法,采用具有微加热器的集成微腔,通过设计微腔结构和调控微加热器,集成微腔生成的相干本振光的频率间隔和光谱覆盖范围可以远超电光调制,并且克服了电光梳对高频稳定大功率射频源的需求。

[0065] 本发明提供的锁定的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法,提供了一种将光学参量振荡阈值以上光频梳和相干本振光锁定的技术,提高了量子特性检测的系统稳定性。

[0066] 本发明提供的锁定的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法,结合量子光学、非线性光学等多个学科领域,创新解决了光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测中面临的相干本振光制备与锁定等问题。

附图说明

[0067] 通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述,本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显:

[0068] 图1为本发明一实施例中光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置的结构示意图。

[0069] 图2为本发明一优选实施例中相干本振光生成装置的结构示意图。

[0070] 图3为本发明一优选实施例中光学参量振荡阈值以上光频梳源的结构示意图。

[0071] 图4为本发明一优选实施例中相干本振光锁定装置的结构示意图。

[0072] 图5为本发明一优选实施例中三台光谱分析仪的结果示意图。

[0073] 图6为本发明一实施例中光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测方法的流

程图。

[0074] 图中：

[0075] 1为第一可调谐激光器；2-1至2-5分别为第一至第五50:50分光器；3为相干本振光生成装置；4为光学参量振荡阈值以上光频梳源；5为相干本振光锁定装置；6-1和6-2为第一和第二平衡零差探测器；7为频谱分析仪；8为第二可调谐激光器；9-1至9-3分别为第一至第三光纤放大器；10-1至10-4分别为第一至第四光隔离器；11-1至11-7分别为第一至第七光环行器；12-1至12-4为第一至第四光纤布拉格光栅FBG1；13-1和13-2为第一和第二光纤布拉格光栅FBG2；14-1至14-9分别为第一至第九偏振控制器；15-1和15-2分别为第一和第二温度控制模块；16为第一具有微加热器的集成微腔；17-1至17-3分别为第一至第三10:90分光器；18-1至18-3分别为第一至第三光谱分析仪；19-1至19-4分别为第一至第四可调带通光滤波器；20-1至20-5分别为第一至第五可调光衰减器；21为低噪声光纤放大器；22为相位调制器；23为波形发生器；24-1和24-2分别为第一和第二电流控制器；25为第二具有微加热器的集成微腔；26为1:99分光器；27为单边带调制器；28为射频滤波器；29为可调射频信号源；30为PID反馈控制器；31为射频信号放大器。

具体实施方式

[0076] 下面对本发明的实施例作详细说明：本实施例在以本发明技术方案为前提下进行实施，给出了详细的实施方式和具体的操作过程。应当指出的是，对本领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明构思的前提下，还可以做出若干变形和改进，这些都属于本发明的保护范围。

[0077] 图1为本发明一实施例提供的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置的结构示意图。

[0078] 如图1所示，该实施例提供的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置，可以包括：相干本振光生成装置、光学参量振荡阈值以上光频梳源、相干本振光锁定装置以及检测装置；其中：

[0079] 相干本振光生成装置，用于接收第一路泵浦激光，生成相干本振光输出至检测装置；

[0080] 光学参量振荡阈值以上光频梳源，用于接收第二路泵浦激光，并利用该路泵浦激光作为主泵浦激光，产生光学参量振荡阈值以上光频梳后输出检测装置；

[0081] 相干本振光锁定装置，用于对相干本振光生成装置和光学参量振荡阈值以上光频梳源进行持续的频率锁定；

[0082] 检测装置，用于在频率锁定状态下，将相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳合束后进行量子特性检测。

[0083] 在该实施例中，作为一优选实施例，相干本振光生成装置，包括：辅助泵浦激光器、第一光纤放大器、第一光隔离器、第一光环行器、第一光纤布拉格光栅FBG1、第一偏振控制器、第二光纤放大器、第二光隔离器、第二光环行器、第一光纤布拉格光栅FBG2、第二偏振控制器、第三光环行器、第四光环行器、第一温度控制模块、第一具有微加热器的集成微腔和第一电流控制器；其中：

[0084] 第一路泵浦激光依次经过第一光纤放大器、第一光隔离器、第一光环行器、第一偏

振控制器和第三光环行器后,正向输入至第一具有微加热器的集成微腔;第一光纤布拉格光栅FBG1与第一光环行器连接,形成第一噪声过滤结构;

[0085] 辅助泵浦激光器、第二光纤放大器、第二光隔离器、第二光环行器、第二偏振控制器和第四光环行器依次连接后,反向输入至第一具有微加热器的集成微腔;第一光纤布拉格光栅FBG2与第二光环行器连接,形成第二噪声过滤结构;

[0086] 第一具有微加热器的集成微腔安装于第一温度控制模块上,第一具有微加热器的集成微腔的微加热器与第一电流控制器调控连接;第一具有微加热器的集成微腔用于产生光孤子,第一电流控制器用于精调光孤子的自由光谱范围。

[0087] 在该实施例中,作为一优选实施例,相干本振光生成装置,还包括:第五光环行器、第二光纤布拉格光栅FBG1、第二光纤布拉格光栅FBG2、第一10:90分光器、第二10:90分光器、第一光谱分析仪、第二50:50分光器、第一可调带通光滤波器、第一可调光衰减器、第三偏振控制器、第二可调带通光滤波器、第二可调光衰减器、第四偏振控制器、第三50:50分光器、第二光谱分析仪、低噪声光纤放大器、第三光隔离器、第三可调光衰减器、相位调制器、波形发生器和第五偏振控制器;其中:

[0088] 第五光环行器、第二光纤布拉格光栅FBG1和第二光纤布拉格光栅FBG2依次连接,形成泵浦光过滤结构,用于过滤与主泵浦激光和辅助泵浦激光频率一致的频率成分;第一10:90分光器的10%分离输出端与第二10:90分光器输入端连接,第一10:90分光器的90%分离输出端与第二50:50分光器输入端连接;第二10:90分光器的10%分离输出端连接至第一光谱分析仪,用于检测光谱,第二10:90分光器的90%分离输出端与相干本振光锁定装置连接,用于进行频率锁定;第二50:50分光器分出两路,其中一路依次接入第一可调带通光滤波器、第一可调光衰减器、第三偏振控制器、第三50:50分光器的一个输入端,另一路依次接入第二可调带通光滤波器、第二可调光衰减器、第四偏振控制器、第三50:50分光器的另一个输入端,从而利用第一可调带通光滤波器和第二可调带通光滤波器选取出相干本振光;第三50:50分光器的一个输出端连接至第二光谱分析仪,用于检测光谱,第三50:50分光器的另一个输出端连接至低噪声光纤放大器;低噪声光纤放大器、第三光隔离器、第三可调光衰减器、相位调制器和第五偏振控制器依次连接后与检测装置连接;波形发生器与相位调制器调控连接,实现对相干本振光的相位调制。

[0089] 在该实施例中,作为一优选实施例,光学参量振荡阈值以上光频梳源,包括第三光纤放大器、第四光隔离器、第六光环行器、第三光纤布拉格光栅FBG1、第四可调光衰减器、第六偏振控制器、第二具有微加热器的集成微腔、第二温度控制模块、第二电流控制器、第七光环行器、1:99分光器、第三10:90分光器、第四光纤布拉格光栅FBG1和第七偏振控制器;其中:

[0090] 第二路泵浦激光依次经过第三光纤放大器、第四光隔离器、第六光环行器、第四可调光衰减器和第六偏振控制器后,正向输入至第二具有微加热器的集成微腔;第三光纤布拉格光栅FBG1与第六光环行器连接,形成第三噪声过滤结构;

[0091] 第二具有微加热器的集成微腔安装于第二温度控制模块上,第二具有微加热器的集成微腔的微加热器与第二电流控制器调控连接;

[0092] 第二电流控制器与第二具有微加热器的集成微腔调控连接;第二具有微加热器的集成微腔用于产生光学参量振荡阈值以上光频梳,第二电流控制器用于精调光学参量振荡

阈值以上光频梳的自由光谱范围；

[0093] 第二具有微加热器的集成微腔的输出端、第七光环行器和1:99分光器的输入端依次连接,1:99分光器的1%分离输出端与第三光谱分析仪连接,1:99分光器的99%分离输出端与第三10:90分光器的输入端连接;第三10:90分光器的10%分离输出端与相干本振光锁定装置连接,用于进行频率锁定,第三10:90分光器的90%分离输出端与第三光纤布拉格光栅FBG1和第七偏振控制器依次连接后与检测装置连接。

[0094] 在该实施例中,作为一优选实施例,相干本振光锁定装置,包括:第三可调带通光滤波器、第四可调带通光滤波器、第五可调光衰减器、单边带调制器、第八偏振控制器、第九偏振控制器、第五50:50分光器、第二平衡零差探测器、射频滤波器、可调射频信号源、PID反馈控制器和射频信号放大器;其中:

[0095] 第三可调带通光滤波器、单边带调制器、第八偏振控制器和第五50:50分光器的一个输入端依次连接;第四可调带通光滤波器、第五可调光衰减器、第九偏振控制器和第五50:50分光器的另一个输入端依次连接;第五50:50分光器的两个输出端接入第二平衡零差探测器;第二平衡零差探测器的输出端、射频滤波器和PID反馈控制器依次连接;射频信号放大器的信号发生端、射频信号放大器he单边带调制器射频信号输入端依次连接;射频信号放大器的参考时钟信号端连接至PID反馈控制器;PID反馈控制器输出信号连接至相干本振光生成装置和光学参量振荡阈值以上光频梳源,分别用于调控相干本振光生成装置和光学参量振荡阈值以上光频梳源的电流控制器,进而对相干本振光生成装置和光学参量振荡阈值以上光频梳源进行持续的频率锁定。

[0096] 在该实施例中,作为一优选实施例,检测装置,包括:第四50:50分光器、第一平衡零差探测器和频谱分析仪;其中:

[0097] 相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳分别输入至第四50:50分光器的两个输入端,第四50:50分光器的两个输出端与第一平衡零差探测器连接,第一平衡零差探测器与频谱分析仪连接。

[0098] 在该实施例中,作为一优选实施例,检测装置还包括:主泵浦激光器和第一50:50分光器;其中:

[0099] 主泵浦激光器,用于产生泵浦激光;

[0100] 第一50:50分光器,用于将主泵浦激光器产生的泵浦激光分为两路。

[0101] 在该实施例中,作为一优选实施例,该检测装置还包括如下任意一项或任意多项:

[0102] -光学参量振荡阈值以上光频梳源的泵浦激光波长与主泵浦激光器输出泵浦激光波长一致且相干,光学参量振荡阈值以上光频梳源的待测频率成分在相干本振光生成装置中具有对应的光谱谱线;

[0103] -主泵浦激光器和辅助泵浦激光器均采用可调谐的窄线宽连续光纤激光器,其输出波长与相干本振光生成装置生成光孤子时所需的激光器波长一致;

[0104] -第一具有微加热器的集成微腔和第二具有微加热器的集成微腔的波导的输入输出两端分别封装有单模光纤;

[0105] -第一具有微加热器的集成微腔和第二具有微加热器的集成微腔的微加热器电极封装有电学接口;

[0106] -可调带通滤波器的带宽与光孤子的光谱谱线宽度匹配,并且调节范围涵盖量子

压缩态待测频率成分；

[0107] -相位调制器周期性地从0到 2π 调制相干本振光的相位，用于配合实现零差探测；

[0108] -波形发生器用于产生周期性地低频三角波信号；

[0109] -平衡零差探测器工作在散粒噪声极限状态；

[0110] -频谱分析仪工作在零扫宽模式下。

[0111] 本发明上述实施例提供的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置，其工作原理为：运用集成微腔产生的光孤子在频域上具有一系列离散的、等频率间隔的相干频率成分，在时域上是孤子序列，具有优良的噪声特性。光孤子的FSR可以通过微腔结构设计粗调，可以通过在微腔上集成的微加热器精调，能够实现光孤子的FSR与波分复用系统兼容。所以微腔光孤子为光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测提供了新的可能。

[0112] 下面结合附图，对本发明上述实施例提供的技术方案进一步详细描述如下。

[0113] 本发明上述实施例提供了一种基于频率锁定的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置。

[0114] 如图1至图4所示，第一可调谐激光器1产生的泵浦激光由第一50:50分光器2-1分开，分别输入相干本振光生成装置3和光学参量振荡阈值以上光频梳源4。相干本振光生成装置3首先利用第一具有微加热器的集成微腔16产生光孤子，该光孤子光谱分量覆盖光学参量振荡阈值以上光频梳源4的待测频率成分。相干本振光生成装置3随后用第一和第二可调带通光滤波器19-1和19-2从光孤子中分离出待测频率成分相应的相干本振光，并对此相干本振光做功率平衡、偏振控制、光放大和零差探测所需的相位调制。相干本振光生成装置3和光学参量振荡阈值以上光频梳源4输出的光信号接入第四50:50分光器2-4两个输入端，第四50:50分光器2-4两个输出端接入第一平衡零差探测器6-1，第一平衡零差探测器6-1输出信号接入频谱分析仪7。

[0115] 作为一优选实施例，第一可调谐激光器1的波长优选为1549.4nm。

[0116] 作为一优选实施例，第一和第二平衡零差探测器6-1和6-2的带宽优选为2GHz。

[0117] 作为一优选实施例，频谱分析仪7的零扫宽模式的中心频率优选为20MHz。

[0118] 如图2所示，相干本振光生成装置3运用双向泵浦法，首先使得第一具有微加热器的集成微腔16产生光孤子。第一可调谐激光器1(A1端口输入)作为主泵浦激光器，它的光信号经第一光纤放大器9-1放大、第一光隔离器10-1保护、第一光环行器11-1和第一光纤布拉格光栅FBG1 12-1构成的噪声过滤、第一偏振控制器14-1调整偏振态、第三光环行器11-3保护后，正向输入第一具有微加热器的集成微腔16。第二可调谐激光器8作为辅助泵浦激光器，它的光信号经第二光纤放大器9-2放大、第二光隔离器10-2保护、第二光环行器11-2和第一光纤布拉格光栅FBG2 13-1构成的噪声过滤、第二偏振控制器14-2调整偏振态、第四光环行器11-4保护后，反向输入第一具有微加热器的集成微腔16。第一具有微加热器的集成微腔16放置在第一温度控制模块15-1上，保持温度恒定。集成微腔16上的微加热器受第一电流控制器24-1的调控，电流控制信号由A2端口输入，从而精调光孤子的自由光谱范围(FSR1)。

[0119] 作为一优选实施例，第二可调谐激光器8的波长优选为1559.1nm。

[0120] 作为一优选实施例，第一可调谐激光器1对应的第一光纤放大器9-1的输出功率优选为30dBm。

[0121] 作为一优选实施例,第二可调谐激光器8对应的第二光纤放大器9-2的输出功率优选为32dBm。

[0122] 作为一优选实施例,第一至第四光隔离器10-1至10-4和第一至第七光环行器11-1至11-7的中心波长优选为1550nm,最大承受功率优选为5W。

[0123] 作为一优选实施例,第一至第四光纤布拉格光栅FBG1 12-1至12-4的中心波长优选为1549.5nm,3dB工作带宽优选为1nm,带内反射率优选为99.9%。

[0124] 作为一优选实施例,第一和第二光纤布拉格光栅FBG2 13-1和13-2的中心波长优选为1559nm,3dB工作带宽优选为1nm,带内反射率优选为99.9%。

[0125] 作为一优选实施例,第一和第二温度控制模块15-1和15-2的设定温度优选为25℃。

[0126] 作为一优选实施例,第一具有微加热器的集成微腔16所设计的自由光谱范围FSR1为50GHz。

[0127] 如图2所示,相干本振光生成装置3接下来用第二光纤布拉格光栅FBG1 12-2和第二光纤布拉格光栅FBG2 13-2,将产生的光孤子中与第一可调谐激光器1、第二可调谐激光器8的频率成分一致的成分去除,只留下去除了主泵浦激光和辅助泵浦激光的光孤子。随后此光孤子由第一10:90分光器17-1分离出10%的光功率用于第一光谱分析仪18-1的光谱监测(光谱如图5(a)所示)和锁定(接至B2端口输出,用于连接相干本振光锁定装置,进行频率锁定),余下99%的光功率输入第二50:50分光器2-2。第二50:50分光器2-2的两个输出口,一路依次接入第一可调带通光滤波器19-1、第一可调光衰减器20-1、第三偏振控制器14-3、第三50:50分光器2-3的一个输入端,另一路依次接入第二可调带通光滤波器19-2、第二可调光衰减器20-2、第四偏振控制器14-4、第三50:50分光器2-3的另一个输入端,从而利用第一和第二可调带通光滤波器19-1和19-2选取出相干本振光;选取出相干本振光的光谱如图5(b)所示。选取出相干本振光经过第三50:50分光器2-3合束,经过低噪声光纤放大器21放大、第三光隔离器10-3保护、第三可调光衰减器20-3调整功率,经过相位调制器22调制,经过第五偏振控制器14-5调整偏振态,之后输出至B1端口,用于连接检测装置,以提供相干本振光。在波形发生器23的控制下,相位调制器22对相干本振光进行0到 2π 的相位调制,从而配合实现零差检测中的本振光相位扫描。

[0128] 图2中第一光谱分析仪18-1的光谱示意图,如图5(a)所示。图5(a)中第一可调谐激光器1的波长编号为0,第一具有微加热器的集成微腔16产生的光孤子以波长编号0为中心、以FSR1为间隔在光谱上左右等距排列。

[0129] 图2中第二光谱分析仪18-2的光谱示意图,如图5(b)所示。图5(b)中第一可调谐激光器1的波长编号为0,选取出相干本振光的光谱成分对应的编号分别为+n和-m。

[0130] 作为一优选实施例,优选 $n=12$,优选 $m=12$,即测量与第一可调谐激光器1的频率相差 $\pm 50\text{GHz} \times 12 = \pm 600\text{GHz}$ 的一对频率之处的量子特性。

[0131] 作为一优选实施例,相干本振光生成装置3的输出功率优选为17mW。

[0132] 作为一优选实施例,第一至第四可调带通光滤波器19-1至19-4设计的中心波长优选为1550nm,工作的中心波长调谐范围优选为100nm,调谐步长优选为0.01nm,3dB工作带宽优选为0.1nm。

[0133] 作为一优选实施例,相位调制器22优选为光纤拉伸器,最高调制速率优选为

10kHz。

[0134] 作为一优选实施例,波形发生器23的输出波形优选为三角波,该波形频率优选为4Hz,波形峰峰值优选为5V。

[0135] 如图3所示,光学参量振荡阈值以上光频梳源4使用单向泵浦法产生光学参量振荡阈值以上的光频梳。第一可调谐激光器1(C1端口输入)作为泵浦激光器,它的光信号经第三光纤放大器9-3放大、第四光隔离器10-4保护、第六光环行器11-6和第三光纤布拉格光栅FBG1 12-3构成的噪声过滤、第四可调光衰减器20-4调整功率、第六偏振控制器14-6调整偏振态后,输入第二具有微加热器的集成微腔25。第二具有微加热器的集成微腔25放置在第二温度控制模块15-2上,保持温度恒定。第二具有微加热器的集成微腔25上的微加热器受第二电流控制器24-2的调控,电流控制信号由C2端口输入,从而精调光学参量振荡阈值以上光频梳的自由光谱范围(FSR2)。第二具有微加热器的集成微腔25产生的光学参量振荡阈值以上光频梳经第七光环行器11-7保护,由1:99分光器26分离出1%的光功率用于第三光谱分析仪18-3的光谱监测,余下99%的光功率由第三10:90分光器17-3分离出10%的光功率输出至D2端口,用于连接相干本振光锁定装置、90%的光功率由第四光纤布拉格光栅FBG1 12-4反射泵浦光和第七偏振控制器14-7调整偏振态后输出至D1端口,用于连接检测装置。

[0136] 图3中第三光谱分析仪18-3的光谱示意图,如图5(c)所示。图5(c)中第一可调谐激光器1的波长编号为0,第二具有微加热器的集成微腔25产生的光学参量振荡阈值以上光频梳的光谱分量以自由光谱范围FSR2为间隔在光谱上等距排列。

[0137] 作为一优选实施例,C1端口后级的第三光纤放大器9-3输出的光功率优选为20dBm。

[0138] 作为一优选实施例,第二具有微加热器的集成微腔25所设计的FSR为100GHz。

[0139] 作为一优选实施例,第二具有微加热器的集成微腔25生成的光学参量振荡阈值以上光频梳的自由光谱范围FSR2为400GHz。

[0140] 如图4所示,相干本振光锁定装置5通过从B2端口和D2端口输入的光信号进行处理,从A2端口和C2端口输出电流控制信号,来实现相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳的锁定。B2端口输入光信号经过第三可调带通光滤波器19-3过滤、单边带调制器27调制、第八偏振控制器14-8调整偏振态之后,和经过第四可调带通光滤波器19-4过滤、第五可调光衰减器20-5调整功率、第九偏振控制器14-9调整偏振态的D2端口输入光信号,一起输入第五50:50分光器2-5;50:50分光器2输出至第二平衡零差探测器6-2以产生误差信号。第二平衡零差探测器6-2输出的误差信号接射频滤波器28之后,输入至PID反馈控制器30。单边带调制器27的调制信号来自可调射频信号源29,并经过射频滤波器28放大。可调射频信号源29输出的参考时钟信号也接入PID反馈控制器30。PID反馈控制器30会把来自平衡零差探测器6的误差信号和来自可调射频信号源29的参考时钟信号进行相位锁定;PID反馈控制器30输出两路电流控制信号。A2端口输出的信号用于控制相干本振光生成装置3中的第一电流控制器24-1,以便调节FSR1;C2端口输出的信号用于控制光学参量振荡阈值以上光频梳源4中的第二电流控制器24-2,以便调节FSR2,进而对相干本振光生成装置和光学参量振荡阈值以上光频梳源进行持续的频率锁定。

[0141] 作为一优选实施例,B2端口和D2端口后级的第三和第四可调带通光滤波器19工作

的中心波长优选为 $n=12$ 时对应的波长。

[0142] 作为一优选实施例,单边带调制器27的调制频率,即可调射频信号源29的输出频率,优选为800MHz。

[0143] 作为一优选实施例,射频滤波器28的中心波长优选为800MHz,3dB带宽优选为400MHz。

[0144] 作为一优选实施例,可调射频信号源29输出的参考时钟信号优选为100MHz。

[0145] 在本发明部分实施例中:

[0146] 光学参量振荡阈值以上光频梳源的泵浦激光波长需要与主泵浦激光器输出波长一致且相干,且光学参量振荡阈值以上光频梳源的待测频率成分在相干本振光生成装置中有对应的光谱谱线。

[0147] 主泵浦激光器和辅助泵浦激光器为可调谐的窄线宽连续光纤激光器,其输出波长与双向泵浦法生成光孤子时所需的激光器波长一致。

[0148] 光纤放大器的工作波长范围和输出功率满足双向泵浦法生成光孤子的需求。

[0149] 光隔离器、光环行器、光纤布拉格光栅和偏振控制器均可承受光纤放大器输出的最大光功率。

[0150] 光纤布拉格光栅的工作带宽大于激光器的线宽,但远远小于光纤放大器噪声谱带宽,光纤布拉格光栅用于过滤放大后的泵浦激光噪声。

[0151] 具有微加热器的集成微腔的波导的输入输出两端分别封装有单模光纤。

[0152] 具有微加热器的集成微腔的微加热器电极封装有电学接口。

[0153] 具有微加热器的集成微腔可以在电流控制器的控制下,精调光孤子的FSR。

[0154] 温度控制模块可以使得集成微纳谐振腔的温度保持恒定。

[0155] 光谱分析仪可用于监测输出的光谱。

[0156] 可调带通滤波器的带宽需要与光孤子光谱谱线宽度匹配,并且调节范围需要涵盖量子压缩态待测频率成分。

[0157] 可调光衰减器可以平衡来自50:50分光器的、经过了可调带通滤波器的两个相干本振光的光功率。

[0158] 相位调制器需要周期地从0到 2π 调制相干本振光的相位,以配合实现零差探测。

[0159] 单边带调制器需要在射频信号的输入下,将单频光信号调制为单边带光信号。

[0160] 波形发生器需要产生周期性的低频三角波信号。

[0161] 平衡零差探测器需要工作在散粒噪声极限状态。

[0162] 频谱分析仪需要工作在零扫宽模式下。

[0163] 本发明上述实施例提供的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置,光学参量振荡阈值以上光频梳使用集成的微纳谐振腔产生;在不改变入射激光波长的情况下,仅使用集成在微纳谐振腔上的微加热器来实现自由光谱范围的调节与反馈锁定;产生相干本振光的微腔的自由光谱范围(FSR1)与产生光学参量振荡阈值以上光频梳的自由光谱范围(FSR2)可以是分数倍关系。相干本振光锁定装置可以实现相干本振光与光学参量振荡阈值以上光频梳的零频率差锁定;相干本振光锁定装置使用单边带调制器;相干本振光锁定装置使用射频滤波器提取误差信号;相干本振光锁定装置使用PID控制器输出电流控制信号来控制微加热器,最终实现相干本振光与光学参量振荡阈值以上光频梳的锁定。

[0164] 图6为本发明一实施例提供的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测方法的流程图。

[0165] 如图6所示,该实施例提供的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测方法,可以包括如下步骤:

[0166] S100,将泵浦激光分为两路;

[0167] S200,利用其中一路泵浦激光生成相干本振光;利用另一路泵浦激光生成光学参量振荡阈值以上光频梳;

[0168] S300,对相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳进行持续的频率锁定;

[0169] S400,在频率锁定状态下,将相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳合束后进行量子特性检测。

[0170] 在该实施例的S200中,作为一优选实施例,利用其中一路泵浦激光生成相干本振光,可以包括如下步骤:

[0171] S201,采用双向泵浦法,利用泵浦激光生成光孤子,并在光孤子的基础上提取并处理所需的频率成分,使得光孤子光谱分量覆盖光学参量振荡阈值以上光频梳的待测频率成分;

[0172] S202,从光孤子中分离出与待测频率成分相应的相干本振光,并对相干本振光进行相位调制,完成相应本振光的生成。

[0173] 在该实施例的S200中,,作为一优选实施例,利用另一路泵浦激光生成光学参量振荡阈值以上光频梳,可以包括如下步骤:

[0174] 采用单向泵浦法,产生光学参量振荡光学参量振荡阈值以上的光频梳。

[0175] 在该实施例的S300中,作为一优选实施例,对相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳进行频率锁定,可以包括如下步骤:

[0176] S301,从待锁频的光学参量振荡阈值以上光频梳和用于生成相干本振光的稳定的光孤子中选取待锁定的一对频率成分;

[0177] S302,将待锁频的光信号进行单边带调制;

[0178] S303,将单边带调制后的待锁频的光信号与从稳定的光孤子中选取的频率成分进行拍频;

[0179] S304,探测并提取出单边带调制对应频带处的误差信号;

[0180] S305,利用控制电流调控光学参量振荡阈值以上光频梳和稳定的光孤子的自由光谱范围,最终实现对误差信号与参考时钟信号的锁定,完成对相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳的频率锁定。

[0181] 进一步地,结合本发明上述实施例提供的量子特性检测装置中的各部件,在该实施例的S300中,对相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳进行频率锁定,可以包括如下步骤:

[0182] 利用可调带通光滤波器从待锁频的光学参量振荡阈值以上光频梳和稳定的光孤子中选取待锁定的一对频率成分;

[0183] 将待锁频的光信号进行单边带调制;

[0184] 将单边带调制后的待锁频的光信号与从稳定的光孤子中选取的频率成分进行拍频;

[0185] 用平衡零差探测器和射频滤波器探测并提取出单边带调制对应频带处的误差信号,并输入至PID控制器;

[0186] PID控制器通过调控电流控制器的输出电流,来调控光学参量振荡阈值以上光频梳和稳定的光孤子的自由光谱范围,最终实现对误差信号与参考时钟信号的锁定。

[0187] 在该实施例的S400中,作为一优选实施例,将相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳合束后进行量子特性检测,可以包括如下步骤:

[0188] S401,将光学参量振荡阈值以上光频梳的待测频率成分与相干本振光进行拍频;

[0189] S402,在散粒噪声极限状态进行平衡零差探测;在零扫宽模式下进行频率分析;

[0190] S403,记录在相干本振光处于不同相位时频谱分析结果中特定频点处的功率值。

[0191] 进一步地,结合本发明上述实施例提供的量子特性检测装置中的各部件,在该实施例的S400中,将相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳合束后进行量子特性检测,可以包括如下步骤:

[0192] 光学参量振荡阈值以上光频梳的待测频率成分与相干本振光进行拍频;

[0193] 平衡零差探测器工作在散粒噪声极限状态;频谱分析仪工作在零扫宽模式下;

[0194] 记录在相干本振光处于不同相位时频谱分析仪特定频点处的功率值。

[0195] 需要说明的是,本发明提供的方法中的步骤,可以利用系统中对应的模块、装置、单元等予以实现,本领域技术人员可以参照系统的技术方案实现方法的步骤流程,即,系统中的实施例可理解为实现方法的优选例,在此不予赘述。

[0196] 本发明上述实施例提供的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法,主泵浦激光器产生的激光由50:50分光器分开,分别用于相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳的生成。相干本振光和光学参量振荡阈值以上光频梳由锁定装置锁定后,一同接入50:50分光器,再接入平衡零差探测器;最终平衡零差探测器的输出信号接入频谱分析仪。本发明上述实施例提供的光学参量振荡阈值以上光频梳的量子特性检测装置及方法,将光学参量振荡阈值以上光频梳和相干本振光锁定,可以提高量子特性检测的稳定性,解决光学自由光谱范围远大于射频信号源频率的问题,避免了高频信号的电光调制和激光器锁相,能够高效地进行量子特性检测。

[0197] 以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是,本发明并不局限于上述特定实施方式,本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改,这并不影响本发明的实质内容。

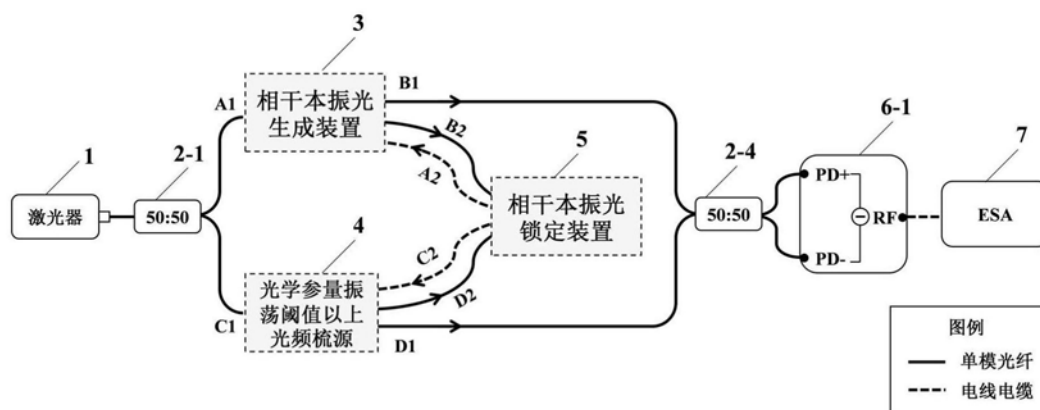


图1

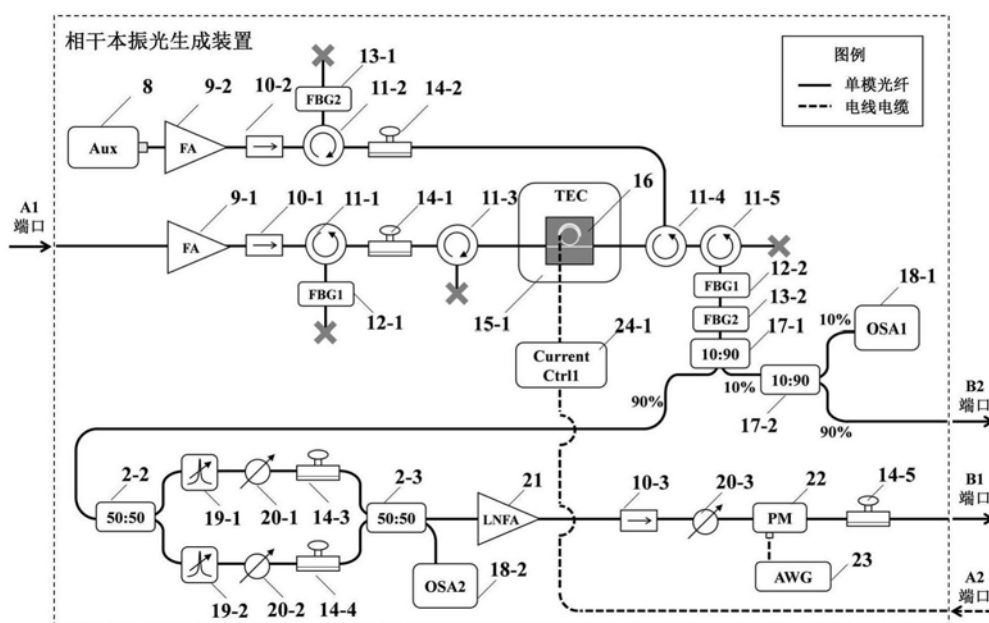


图2

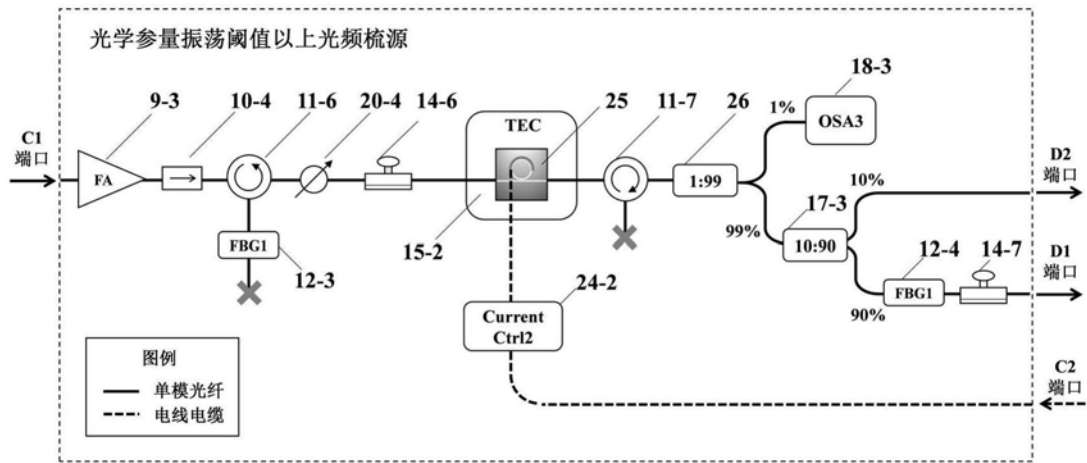


图3

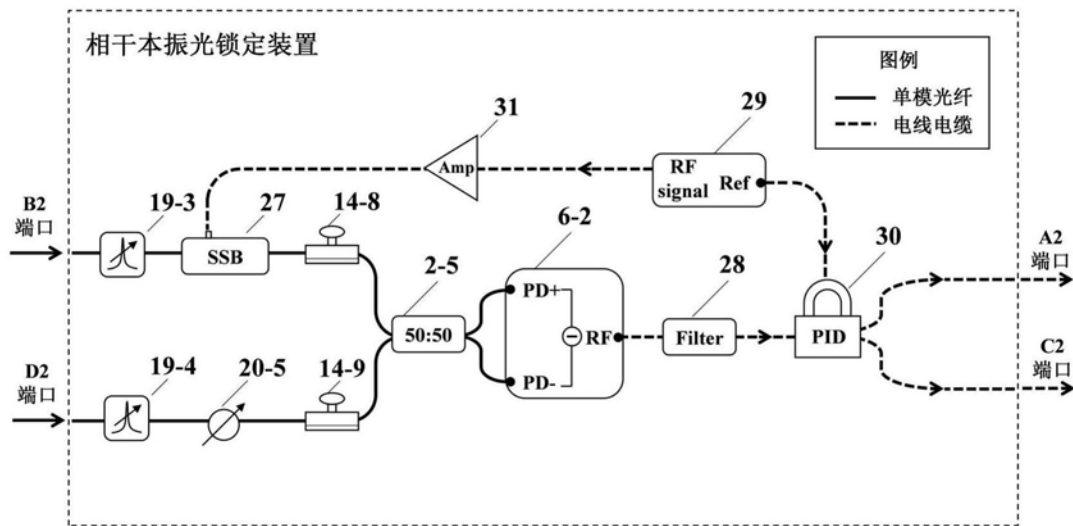


图4

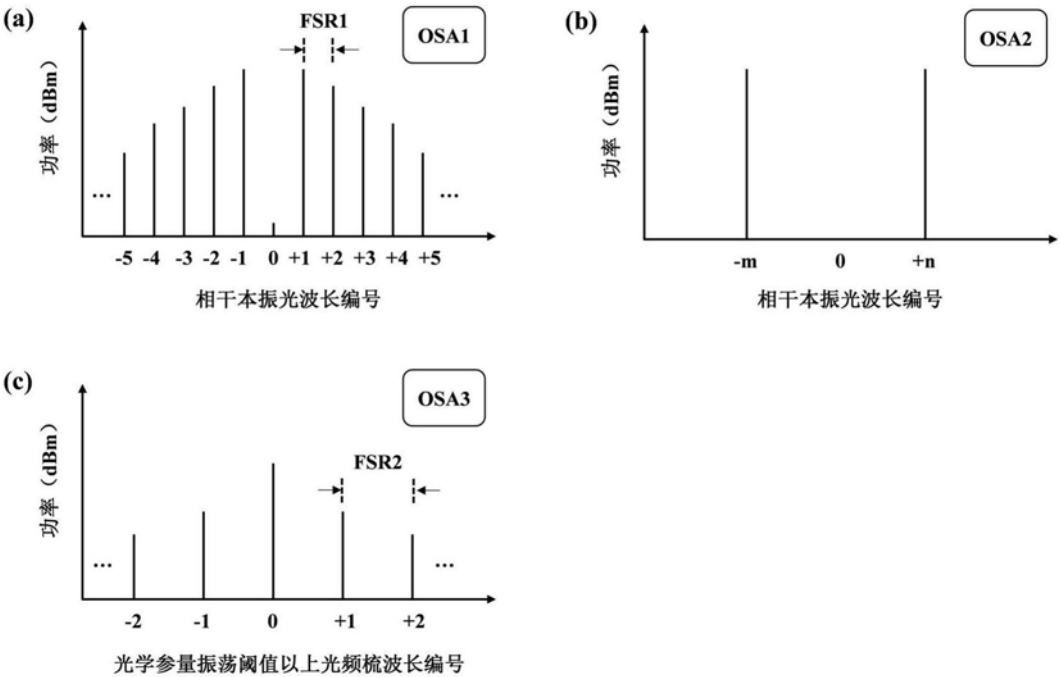


图5

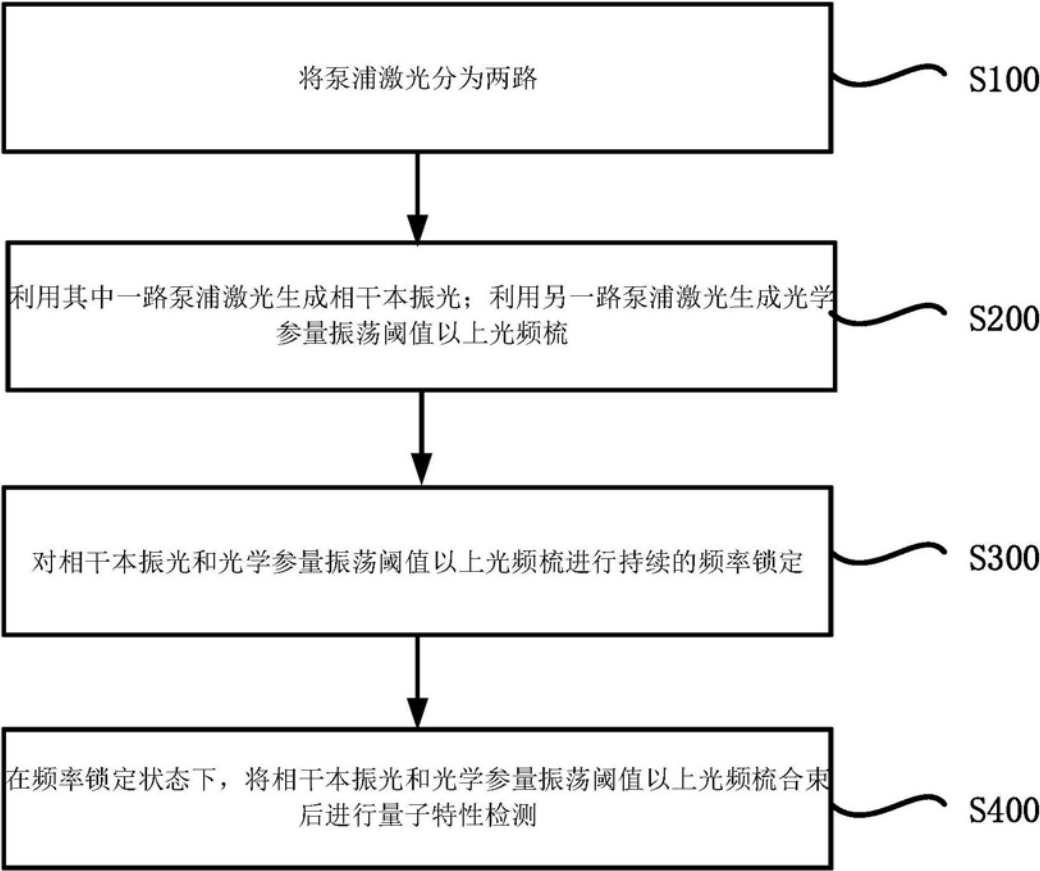


图6