



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111277328 A

(43)申请公布日 2020.06.12

(21)申请号 202010103610.X

(22)申请日 2020.02.20

(71)申请人 电子科技大学

地址 611731 四川省成都市高新区(西区)  
西源大道2006号

(72)发明人 周强 范云茹 袁晨智 邓光伟  
王淑 宋海智

(74)专利代理机构 成都点睛专利代理事务所  
(普通合伙) 51232

代理人 霍淑利

(51)Int.Cl.

H04B 10/079(2013.01)

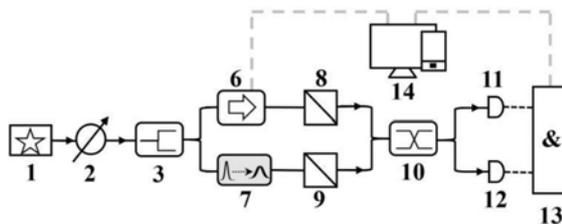
权利要求书2页 说明书8页 附图1页

(54)发明名称

一种光波导中群速度色散的测量系统和测量方法

(57)摘要

本发明涉及一种光波导中群速度色散的测量系统,属于光学测量技术领域。通过将待测光波导插入两臂对称的HOM干涉仪的一臂,并调整干涉仪两臂的臂程差测量HOM干涉条纹,基于光子间的二阶量子光学干涉效应,将光波导中群速度色散测量的时延法和干涉法相结合,实现光波导中群速度色散的高精度、高灵活性、高稳定性、低成本和小型化的测量。该测量系统使用的所有器件,均来自成熟的商用化器件,有利于系统组装、集成化和实用化发展,从而使该测量系统适用于光波导的色散测量、光路中的色散补偿、弱光测量、光纤传输与传感等领域。本发明还涉及一种光波导中群速度色散的测量方法。



1. 一种光波导中群速度色散的测量系统,其特征在于,包括锁模激光器(1)、第一可调光衰减器(2)、第一分束器(3)、HOM干涉仪、第一单光子探测器(11)、第二单光子探测器(12)、时间数字转换器(13)和数据处理设备(14);所述HOM干涉仪包括第一臂、第二臂和第二分束器(10);

所述第一可调光衰减器(2)用于将所述锁模激光器(1)产生的脉冲激光衰减至单光子水平,作为HOM干涉仪的弱相干态单光子源;

所述第一分束器(3)将所述第一可调光衰减器(2)输出的光束分为两部分,分别入射到所述HOM干涉仪对称的第一臂和第二臂中,第一臂包括依次连接的可调光延时线(6)和第一偏振分束器(8),第二臂包括依次连接的待测光波导(7)和第二偏振分束器(9),两臂的输出分别与第二分束器(10)的两个输入端连接;可调光延时线(6)用于调节入射光的时延,实现干涉仪臂程差的改变,所述可调光延时线(6)与所述数据处理设备(14)连接;

第二分束器(10)的两个输出端分别与第一单光子探测器(11)和第二单光子探测器(12)的输入端连接;第一单光子探测器(11)和第二单光子探测器(12)的输出端连接时间数字转换器(13);

时间数字转换器(13)用于记录第一单光子探测器(11)和第二单光子探测器(12)输出的电信号到达时间数字转换器(13)的时间序列,该时间序列以数字形式传输至数据处理设备中,所述数据处理设备进行数据处理获得光波导中的群速度色散。

2. 根据权利要求1所述的一种光波导中群速度色散的测量系统,其特征在于,还包括第二可调光衰减器(4)和第三可调光衰减器(5),第二可调光衰减器(4)位于第一臂中;第三可调光衰减器(5)位于第二臂中。

3. 根据权利要求1所述的一种光波导中群速度色散的测量系统,其特征在于,所述锁模激光器(1)为主动锁模激光器或被动锁模激光器。

4. 根据权利要求1所述的一种光波导中群速度色散的测量系统,其特征在于,第一可调光衰减器(2)、第二可调光衰减器(4)和第三可调光衰减器(5)为数显式光衰减器或机械式光衰减器。

5. 根据权利要求1-4任一项所述的一种光波导中群速度色散的测量系统,其特征在于,可调光延时线(6)为手动延时线或电动延时线。

6. 根据权利要求1-4任一项所述的一种光波导中群速度色散的测量系统,其特征在于,待测光波导(7)为光纤、棱镜、光栅、光子晶体波导或晶体材料。

7. 根据权利要求1-4任一项所述的一种光波导中群速度色散的测量系统,其特征在于,第一偏振分束器(8)或第二偏振分束器(9)为平板偏振分束器、立方体偏振分束器或光纤偏振分束器。

8. 根据权利要求1-4任一项所述的一种光波导中群速度色散的测量系统,其特征在于,第一单光子探测器(11)和第二单光子探测器(12)为雪崩二极管单光子探测器或超导纳米线单光子探测器;

和/或,所述第一分束器(3)和第二分束器(10)为50/50分束器。

9. 一种光波导中群速度色散的测量方法,其特征在于,基于权利要求1-8任一项所述的一种光波导中群速度色散的测量系统实现,包括以下步骤:

获得第一单光子探测器(11)和第二单光子探测器(12)输出的电信号到达时间数字转

换器(13)的时间序列;

根据对所述时间序列进行符合运算,获得符合计数;

获得可调光延时线(6)的时延;

根据所述可调光延时线(6)的时延和所述符合计数,获得干涉条纹;

根据所述干涉条纹,结合色散介质中的光脉冲传播理论、以及光场的二阶相干理论、量子力学中算符与量子态的运算规则,以及衰减器、分束器与可调光延迟的原理,获得待测光波导的群速度色散。

10. 根据权利要求1所述的一种光波导中群速度色散的测量方法,其特征在于,若入射光为高斯光,所述根据所述干涉条纹,结合色散介质中的光脉冲传播理论、以及光场的二阶相干理论、量子力学中算符与量子态的运算规则,以及衰减器、分束器与可调光延迟的原理,获得待测光波导的群速度色散,包括根据如下公式(1)获得群速度色散 $\beta_2$ :

$$|\beta_2| = \frac{T_0}{L} \sqrt{\left(\frac{b^2}{2 \ln 2} - 4T_0^2\right)} \quad (1)$$

其中, $T_0$ 为入射光脉冲的功率半宽度, $b$ 为HOM干涉条纹的半高全宽, $L$ 为待测光波导的长度。

## 一种光波导中群速度色散的测量系统和测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于光学测量技术领域,具体涉及一种光波导中群速度色散的测量系统和测量方法。

### 背景技术

[0002] 色散,即材料的折射率随入射光频率而变化的特性。然而,该色散特性会造成脉冲展宽,制约了自由空间光学系统及光纤通信系统向高速度、高质量方向的发展。因此色散补偿至关重要,而色散的准确测量是色散补偿的重要前提。色散测量实质就是测量不同频率的光脉冲在色散介质中传输相同距离所用的时延,或者测量不同频率的光脉冲对应频域上的相位。

[0003] 目前,测量色散的方法有很多,主要有时延法、相移法、干涉法等。具体而言,时延法通过测量不同频率光脉冲的时延量,进行多项式拟合,得到色散值。然而该方法需要使用多波长激光器,采样点少,测量精度低。相移法通过比较相位参考值和测量值,得到相位差进而得到色散值。目前使用相移法测量色散对光源要求高,测量成本高,测量范围小。干涉法测量色散是利用Mach-Zehnder或者Michelson干涉仪的两个臂作为待测臂和参考臂,通过改变参考臂的长度得到两个臂出射光干涉条纹的强度信息,得到相位的相对大小,进而得到相应的色散值。该方法要求实验系统有很高的稳定性。因此,亟需一种新的测量方法,实现光波导中群速度色散的高精度、高稳定性、低成本和实用化的测量。

### 发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题是针对现有技术存在的问题,提供一种光波导中群速度色散的测量系统和测量方法。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明实施例提供一种光波导中群速度色散的测量系统,包括锁模激光器、第一可调光衰减器、第一分束器、HOM干涉仪、第一单光子探测器、第二单光子探测器、时间数字转换器和数据处理设备;所述HOM干涉仪包括第一臂、第二臂和第二分束器;

[0006] 所述第一可调光衰减器用于将所述锁模激光器产生的脉冲激光衰减至单光子水平,作为HOM干涉仪的弱相干态单光子源;

[0007] 所述第一分束器将所述第一可调光衰减器输出的光束分为两部分,分别入射到所述HOM干涉仪对称的第一臂和第二臂中,第一臂包括依次连接的可调光延时线和第一偏振分束器,第二臂包括依次连接的待测光波导和第二偏振分束器,两臂的输出分别与第二分束器的两个输入端连接;可调光延时线用于调节入射光的时延,实现干涉仪臂程差的改变,所述可调光延时线与所述数据处理设备连接;

[0008] 第二分束器的两个输出端分别与第一单光子探测器和第二单光子探测器的输入端连接;第一单光子探测器和第二单光子探测器的输出端连接时间数字转换器;

[0009] 时间数字转换器用于记录第一单光子探测器和第二单光子探测器输出的电信号

到达时间数字转换器的时间序列,该时间序列以数字形式传输至数据处理设备中,所述数据处理设备进行数据处理获得光波导中的群速度色散。

[0010] 本发明的有益效果是:本发明的一种光波导中群速度色散的测量系统,通过将待测光波导插入两臂对称的HOM(Hong-Ou-Mandel)干涉仪的一臂,并调整干涉仪两臂的臂程差测量HOM干涉条纹,基于光子间的二阶量子光学干涉效应,将光波导中群速度色散测量的时延法和干涉法相结合,实现光波导中群速度色散的高精度、高灵活性、高稳定性、低成本和小型化的测量,其测量精度取决于可调光延时线的精度。该测量系统使用的所有器件,均来自成熟的商用化器件,有利于系统组装、集成化和实用化发展,从而使该测量系统适用于光波导的色散测量、光路中的色散补偿、弱光测量、光纤传输与传感等领域。

[0011] 在上述技术方案的基础上,本发明还可以做如下改进。

[0012] 进一步的,还包括第二可调光衰减器和第三可调光衰减器,第二可调光衰减器位于第一臂中;第三可调光衰减器位于第二臂中。

[0013] 采用上述进一步方案的有益效果是:第二可调光衰减器和第三可调光衰减器实现干涉仪两臂中光子数的衰减和调整,使得干涉仪两臂光子数相等,增大干涉条纹可见度,从而提高测量精度。

[0014] 进一步的,所述锁模激光器为主动锁模激光器或被动锁模激光器;

[0015] 进一步的,第一可调光衰减器、第二可调光衰减器和第三可调光衰减器为数显式光衰减器或机械式光衰减器;

[0016] 进一步的,可调光延时线为手动延时线或电动延时线;

[0017] 进一步的,待测光波导为光纤、棱镜、光栅、光子晶体波导或晶体材料;

[0018] 进一步的,第一偏振分束器或第二偏振分束器为平板偏振分束器、立方体偏振分束器或光纤偏振分束器;

[0019] 进一步的,第一单光子探测器和第二单光子探测器为雪崩二极管单光子探测器或超导纳米线单光子探测器;

[0020] 和/或,所述第一分束器和第二分束器为50/50分束器。

[0021] 为解决上述技术问题,本发明实施例提供了一种光波导中群速度色散的测量方法,基于前述的一种光波导中群速度色散的测量系统实现,包括以下步骤:

[0022] 获得第一单光子探测器和第二单光子探测器输出的电信号到达时间数字转换器的时间序列;

[0023] 根据对所述时间序列进行符合运算,获得符合计数;

[0024] 获得可调光延时线的时延;

[0025] 根据所述可调光延时线的时延和所述符合计数,获得干涉条纹;

[0026] 根据所述干涉条纹,结合色散介质中的光脉冲传播理论、以及光场的二阶相干理论、量子力学中算符与量子态的运算规则,以及衰减器、分束器与可调光延迟的原理,获得待测光波导的群速度色散。

[0027] 本发明的有益效果是:本发明的一种光波导中群速度色散的测量方法,通过将待测光波导插入两臂对称的HOM干涉仪的一臂,并调整干涉仪两臂的臂程差测量HOM干涉条纹,基于光子间的二阶量子光学干涉效应,将光波导中群速度色散测量的时延法和干涉法相结合,实现光波导中群速度色散的高精度、高灵活性、高稳定性、低成本和小型化的测量,

其测量精度取决于可调光延时线的精度。该测量方法使用的所有器件,均来自成熟的商用化器件,有利于系统组装、集成化和实用化发展,从而使该测量方法适用于光波导的色散测量、光路中的色散补偿、弱光测量、光纤传输与传感等领域。

[0028] 进一步的,若入射光为高斯光,所述根据所述干涉条纹,结合色散介质中的光脉冲传播理论、以及光场的二阶相干理论、量子力学中算符与量子态的运算规则,以及衰减器、分束器与可调光延迟的原理,获得待测光波导的群速度色散,包括根据如下公式(1)获得群速度色散 $\beta_2$ :

$$[0029] \quad |\beta_2| = \frac{T_0}{L} \sqrt{\left(\frac{b^2}{2\ln 2} - 4T_0^2\right)} \quad (1)$$

[0030] 其中, $T_0$ 为入射光脉冲的功率半宽度, $b$ 为HOM干涉条纹的半高全宽, $L$ 为待测光波导的长度。

### 附图说明

[0031] 图1为本发明实施例的一种光波导中群速度色散的测量系统;

[0032] 图2为本发明实施例的另一种光波导中群速度色散的测量系统;

[0033] 图3为本发明实施例获得的HOM干涉条纹的实验和模拟结果。

[0034] 附图中,各标号所代表的部件列表如下:

[0035] 1、锁模激光器,2、第一可调光衰减器,3、第一分束器,4、第二可调光衰减器,5、第三可调光衰减器,6、可调光延时线,7、待测光波导,8、第一偏振分束器,9、第二偏振分束器,10、第二分束器,11、第一单光子探测器,12、第二单光子探测器,13、时间数字转换器,14、数据处理设备。

### 具体实施方式

[0036] 以下结合附图对本发明的原理和特征进行描述,所举实例只用于解释本发明,并非用于限定本发明的范围。

[0037] 如图1所示,本发明实施例提供一种光波导中群速度色散的测量系统,包括锁模激光器1、第一可调光衰减器2、第一分束器3、HOM干涉仪、第一单光子探测器11、第二单光子探测器12、时间数字转换器13和数据处理设备14;所述HOM干涉仪包括第一臂、第二臂和第二分束器10;

[0038] 所述第一可调光衰减器2用于将所述锁模激光器1产生的脉冲激光衰减至单光子水平,作为HOM干涉仪的弱相干态单光子源;

[0039] 所述第一分束器3将所述第一可调光衰减器2输出的光束分为两部分,分别入射到所述HOM干涉仪对称的第一臂和第二臂中,第一臂包括依次连接的可调光延时线6和第一偏振分束器8,第二臂包括依次连接的待测光波导7和第二偏振分束器9,两臂的输出分别与第二分束器10的两个输入端连接;可调光延时线6用于调节入射光的时延,实现干涉仪臂程差的改变,所述可调光延时线6与所述数据处理设备14连接;

[0040] 第二分束器10的两个输出端分别与第一单光子探测器11和第二单光子探测器12的输入端连接;第一单光子探测器11和第二单光子探测器12的输出端连接时间数字转换器13;

[0041] 时间数字转换器13用于记录第一单光子探测器11和第二单光子探测器12输出的电信号到达时间数字转换器13的时间序列,该时间序列以数字形式传输至数据处理设备中,所述数据处理设备14进行数据处理获得光波导中的群速度色散。

[0042] 上述实施例,通过将待测光波导插入两臂对称的HOM干涉仪的一臂,并调整干涉仪两臂的臂程差测量HOM干涉条纹,基于光子间的二阶量子光学干涉效应,将光波导中群速度色散测量的时延法和干涉法相结合,实现光波导中群速度色散的高精度、高灵活性、高稳定性、低成本和小型化的测量,其测量精度取决于可调光延时线的精度。该测量系统使用的所有器件,均来自成熟的商用化器件,有利于系统组装、集成化和实用化发展,从而使该测量系统适用于光波导的色散测量、光路中的色散补偿、弱光测量、光纤传输与传感等领域。

[0043] 其中,锁模激光器1用于提供高时间分辨率、高空间分辨率、宽谱带、高稳定的脉冲激光输出。例如,使用半导体可饱和吸收镜实现被动锁模,输出中心波长为1565.8nm,重复频率5MHz的激光,3dB带宽为4.31nm。

[0044] 所述第一可调光衰减器2用于调节所述脉冲激光的功率,将所述脉冲激光衰减至单光子水平,作为HOM干涉仪的弱相干态单光子源。

[0045] 所述第一分束器3例如为C波段的分束器,回波损耗大于50dB,具有一个输入端口和两个输出端口,输入端口与第一可调光衰减器相连,两个输出端口分别接入干涉仪两臂。

[0046] 可调光延时线6用于调节入射光的时延,实现微米精度级的干涉仪臂程差的改变。例如为带有光纤尾纤的电动可调光延时线,延时范围为0-560ps,分辨率为1fs,回波损耗大于50dB。

[0047] 第一偏振分束器8和第二偏振分束器9用于将一束光分成正交偏振的两束光,擦除光子在偏振自由度的可区分性,使其进入第二分束器10时偏振状态相同,满足HOM干涉效应对偏振自由度的全同性要求。例如为工作在C波段的光纤偏振分束器。

[0048] 第二分束器10用于实现HOM干涉,干涉仪两臂产生的全同光子分别从第二分束器的两个输入端口入射,当两臂长度差大于光束的相干长度时,两个光子以相同的概率从第二分束器10的两个输出端口输出。当两个全同光子到达第二分束器10的时间相同时,此时两光子不可区分,由于光子聚束效应,两个光子便都从第二分束器10的某一个输出端口出射,而不会发生每个端口各有一个光子的情况。第二分束器10例如为使用带保偏尾纤的四端口耦合器,工作模式为慢轴对准,具有两个输入端口,两个输出端口,输出端分束比为50:50,两个输入端口分别接HOM干涉仪两臂,两个输出端口分别接入第一单光子探测器11和第二单光子探测器12。

[0049] 第一单光子探测器11和第二单光子探测器12用于探测发生HOM干涉后两光路的光子,并将光信号转化成电信号,输入到时间数字转换器中。

[0050] 时间数字转换器13例如为使用ID900时间数字转换器,每个通道的快速计数率高达100Mcps,分辨率为100ps。

[0051] 可选地,如图2所示,还包括第二可调光衰减器4和第三可调光衰减器5,第二可调光衰减器4位于第一臂中;第三可调光衰减器5位于第二臂中。

[0052] 上述实施例中,第二可调光衰减器4位于可调光延时线6之前;第三可调光衰减器5位于待测光波导7之前。此外,第二可调光衰减器4也可位于可调光延时线6之后,或位于第一偏振分束器8之后;第三可调光衰减器5也可位于待测光波导7之后,或位于第二偏振分束

器9之后。

[0053] 通过调节可调光衰减器上的旋钮或螺钉,实现干涉仪两臂中光子数的衰减和调整,使得干涉仪两臂光子数相等,增大干涉条纹可见度,从而提高测量精度。

[0054] 在所述测量系统中,入射到第二分束器10的光子数是否相等将影响HOM干涉的可见度。因此,为了能得到最优的干涉结果,需要对两束光的光子数进行衰减和调整,使得干涉仪两臂光子数相等。可调光衰减器例如为工作波长为C波段,衰减为0-60dB的机械式可调光衰减器。

[0055] 可选地,所述锁模激光器1为主动锁模激光器或被动锁模激光器;

[0056] 上述实施例中,所述锁模激光器1也可为利用光克尔效应的激光频梳中的任何一种商用激光器,能产生百飞秒及以下的激光脉冲;待测光波导7也可为其他人工光学材料。

[0057] 可选地,第一可调光衰减器2、第二可调光衰减器4和第三可调光衰减器5为数显式光衰减器或机械式光衰减器;

[0058] 可选地,可调光延时线6为手动延时线或电动延时线;

[0059] 可选地,待测光波导7为光纤、棱镜、光栅、光子晶体波导或晶体材料;

[0060] 可选地,第一偏振分束器8或第二偏振分束器9为平板偏振分束器、立方体偏振分束器或光纤偏振分束器;

[0061] 可选地,第一单光子探测器11和第二单光子探测器12单光子探测器为雪崩二极管单光子探测器或超导纳米线单光子探测器;和/或,所述第一分束器3和第二分束器10为50/50分束器。

[0062] 上述实施例中,当使用超导纳米线单光子探测器时,对1550nm波段的光的探测效率可以达到75%,输出的电脉冲表征探测到的光子。

[0063] 本发明实施例提供一种光波导中群速度色散的测量方法,基于前述的一种光波导中群速度色散的测量系统实现,包括以下步骤:

[0064] 获得第一单光子探测器11和第二单光子探测器12输出的电信号到达时间数字转换器13的时间序列;

[0065] 根据对所述时间序列进行符合运算,获得符合计数;

[0066] 获得可调光延时线6的时延;

[0067] 根据所述可调光延时线6的时延和所述符合计数,获得干涉条纹;

[0068] 根据所述干涉条纹,结合色散介质中的光脉冲传播理论、以及光场的二阶相干理论、量子力学中算符与量子态的运算规则,以及衰减器、分束器与可调光延迟的原理,获得待测光波导的群速度色散。

[0069] 上述实施例,通过将待测光波导插入两臂对称的HOM干涉仪的一臂,并调整干涉仪两臂的臂程差测量HOM干涉条纹,基于光子间的二阶量子光学干涉效应,将光波导中群速度色散测量的时延法和干涉法相结合,实现光波导中群速度色散的高精度、高灵活性、高稳定性、低成本和小型化的测量,其测量精度取决于可调光延时线的精度。该测量方法使用的所有器件,均来自成熟的商用化器件,有利于系统组装、集成化和实用化发展,从而使该测量方法适用于光波导的色散测量、光路中的色散补偿、弱光测量、光纤传输与传感等领域。

[0070] 可选地,若入射光为高斯光,所述根据所述干涉条纹,结合色散介质中的光脉冲传播理论、以及光场的二阶相干理论、量子力学中算符与量子态的运算规则,以及衰减器、分

束器与可调光延迟的原理,获得待测光波导的群速度色散,包括根据如下公式(1)获得群速度色散 $\beta_2$ :

$$[0071] \quad |\beta_2| = \frac{T_0}{L} \sqrt{\left(\frac{b^2}{2 \ln 2} - 4T_0^2\right)} \quad (1)$$

[0072] 其中, $T_0$ 为入射光脉冲的功率半宽度, $b$ 为HOM干涉条纹的半高全宽, $L$ 为待测光波导的长度。

[0073] 上述实施例中,入射光脉冲为周期性高斯光脉冲,其复振幅可以记为

$$E_i(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} E_0 e^{-\frac{(t-nT_p)^2}{2T_0^2}} e^{-i\omega_0 t}, \text{其中 } E_0 \text{ 为电场强度的峰值, } T_p \text{ 为脉冲重复周期, } T_0 \text{ 为脉冲宽度, } n$$

表示脉冲序号, $\omega_0$ 为脉冲的中心频率。

[0074] 根据衰减器和分束器的原理,可以得到:进入可调光延时线6之前的光场的量子态

$$|\psi_1\rangle \text{ 满足 } a(t) |\psi_1\rangle = \alpha_1(t) |\psi_1\rangle, \text{ 其中 } \alpha_1(t) = (\sqrt{\pi} T_0)^{-1/2} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} e^{-\frac{(t-nT_p)^2}{2T_0^2}} e^{-i\omega_0 t}, a(t) \text{ 为可调光延时}$$

线6所在的干涉仪一臂中的光场的湮灭算符;进入待测光波导7之前的光场的量子态 $|\psi_3\rangle$ 满足

[0075] 根据可调光延时线的原理,可知经过延迟线后的光场的量子态 $|\psi_2\rangle$ 满足 $a(t) |\psi_2\rangle = \alpha_1(t-\tau) |\psi_2\rangle$ , $\tau$ 为延迟线引入的时延量。

[0076] 根据脉冲光场在色散介质中的传播理论,可以得到经过待测光波导7之后的量子态满足 $b(t) |\psi_4\rangle = \alpha_2(t) |\psi_4\rangle$ ,其中

$$[0077] \quad \alpha_2(t) = \frac{e^{-i\omega_0 t}}{\sqrt{2\pi}} \int d\Omega \alpha_1(\Omega) e^{-i\frac{\beta_2 \Omega^2 L}{2}} e^{-i\Omega(t-\beta_1 L)} = [\sqrt{\pi} (T_0^2 - i\frac{\beta_2 L}{2})]^{-1/2} e^{-i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} e^{-\frac{(t-\beta_1 L - nT_p)^2}{2(T_0^2 - i\frac{\beta_2 L}{2})}} \quad (2)$$

[0078] 其中 $L$ 为待测光波导7的长度, $\beta_1$ 为色散介质在角频率 $\omega_0$ 处的群速度的倒数, $\beta_2$ 为色散介质在角频率 $\omega_0$ 处的群速度色散, $\alpha_1(\Omega) = e^{i\omega_0 t} \int dt \alpha_1(t) e^{i\Omega t} / \sqrt{2\pi}$ 。

[0079] 根据量子力学中量子态的运算规则可知,第二分束器10的两个输入端的光场构成的双光子量子系统的量子态为 $|\psi_T\rangle = |\psi_2\rangle \oplus |\psi_4\rangle$ ;

[0080] 根据第二分束器10的原理,可以得到:

$$[0081] \quad c(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [a(t) + b(t)], \quad d(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [a(t) - b(t)] \quad (3)$$

[0082] 其中 $c(t)$ 表示第二分束器10与第一单光子探测器11相连接的输出端中光场的湮灭算符, $d(t)$ 表示第二分束器10与第二单光子探测器12相连接的输出端中光场的湮灭算符。

[0083] 根据光场的二阶相干理论,第一单光子探测器11和第二单光子探测器12上的符合计数为:

$$[0084] \quad n_{12} = \eta_1 \eta_2 \int_0^\infty dt \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} d\tau_t \langle \psi_T | c^\dagger(t) d^\dagger(t+\tau_t) d(t+\tau_t) c(t) | \psi_T \rangle \quad (4)$$

[0085] 其中 $\tau_t$ 为TDC中两个通道的电延时, $\tau_0$ 为符合计数过程中电延时窗口的宽度, $\eta_1$ 和

$\eta_2$ 分别为第一单光子探测器11和第二单光子探测器12的探测效率。

[0086] 根据公式 $a(t)|\psi_2\rangle=\alpha_1(t-\tau)|\psi_2\rangle$ 、 $b(t)|\psi_4\rangle=\alpha_2(t)|\psi_4\rangle$ 、式(2)、(3)、(4),以及量子力学中算符的运算规则,对 $n_{12}$ 进行化简,可以得到 $n_{12}$ 的最终表达式为:

$$[0087] \quad n_{12}=C\left[1-\frac{1}{2}\frac{T_0^2}{\sqrt{T_0^4+(\frac{\beta_2 L}{2})^2}}e^{-\frac{(\tau-\tau_L)^2}{2T_0^2+\frac{1}{2}(\frac{\beta_2 L}{T_0})^2}}\right] \quad (5)$$

[0088] 其中C为常数, $\tau_L=\beta_1 L \bmod T_p$ ,表示 $\beta_1 L$ 对 $T_p$ 取余。从式(5)可以得到 $n_{12}$ 与相对时延 $\tau$ 之间的关系,即干涉条纹。干涉条纹的形状为高斯函数,其半高全宽为

$$[0089] \quad b=2\sqrt{\ln 2}\sqrt{2T_0^2+\frac{1}{2}(\frac{\beta_2 L}{T_0})^2} \quad (6)$$

[0090] 根据式(6),可得到

$$[0091] \quad |\beta_2|=\frac{T_0}{L}\sqrt{\left(\frac{b^2}{2\ln 2}-4T_0^2\right)} \quad (1)$$

[0092] 通过公式(1),由实验测得的干涉条纹半高全宽b即可计算得到群速度色散 $\beta_2$ 的绝对值,在已知 $\beta_2$ 的符号条件下,即可以得到 $\beta_2$ 。

[0093] 图3示出的为本发明实施例的HOM干涉条纹的实验和模拟结果,其中实线为模拟结果,携带误差棒的数据点为实验结果。图3中,横坐标为相对时延差,将符合计数最小点的相对时延差定义为0,其余点的相对时延差为该点的延迟线时延量与符合计数最小点的延迟线时延量之差。具体为,使用输出中心波长为1565.8nm,脉冲半宽度为 $T_0=438$ fs,重复频率为5MHz,3dB带宽为4.31nm的被动锁模激光器,在干涉仪的第二臂插入80m光纤测量HOM干涉。通过调节可调光延时线,测量HOM干涉,得到30s内累计的符合计数结果随相对时延差的变化曲线,即干涉条纹,该曲线为HOM干涉条纹的实验结果,使用蒙特-卡洛方法模拟1000次,得到HOM干涉条纹的模拟结果。从图3可以获知,HOM干涉条纹的半高全宽b为 $4.07\pm 0.12$ ps,根据公式(1)可获得群速度色散的绝对值 $|\beta_2|$ 为 $18.305\pm 0.002$ ps<sup>2</sup>/km,其中的测量误差为通过蒙特-卡洛方法结合误差传递函数得到,表明该测量方法可以对群速度色散进行高可靠测量。同时,已知第二臂中插入光纤在1565.8nm附近为反常色散介质,即 $\beta_2<0$ ,因而可得到 $\beta_2=-18.305\pm 0.002$ ps<sup>2</sup>/km。

[0094] 在本发明的描述中,需要理解的是,术语“中心”、“纵向”、“横向”、“长度”、“宽度”、“厚度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”“内”、“外”、“顺时针”、“逆时针”、“轴向”、“径向”、“周向”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。

[0095] 此外,术语“第一”、“第二”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此,限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。在本发明的描述中,“多个”的含义是至少两个,例如两个,三个等,除非另有明确具体的限定。

[0096] 在本发明中,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”、“固定”等

术语应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或成一体;可以是机械连接,也可以是电连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部的连通或两个元件的相互作用关系,除非另有明确的限定。对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0097] 在本发明中,除非另有明确的规定和限定,第一特征在第二特征“上”或“下”可以是第一和第二特征直接接触,或第一和第二特征通过中间媒介间接接触。而且,第一特征在第二特征“之上”、“上方”和“上面”可是第一特征在第二特征正上方或斜上方,或仅仅表示第一特征水平高度高于第二特征。第一特征在第二特征“之下”、“下方”和“下面”可以是第一特征在第二特征正下方或斜下方,或仅仅表示第一特征水平高度小于第二特征。

[0098] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不必针对的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外,在不相互矛盾的情况下,本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

[0099] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

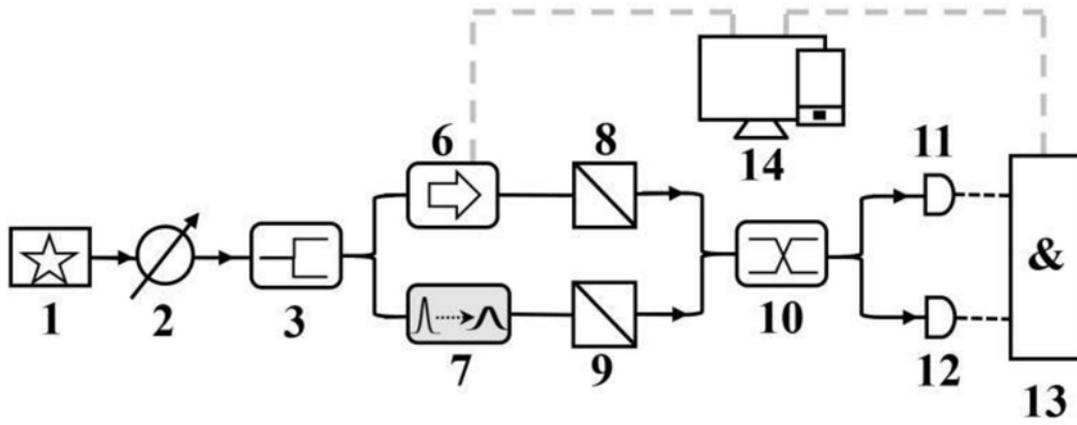


图1

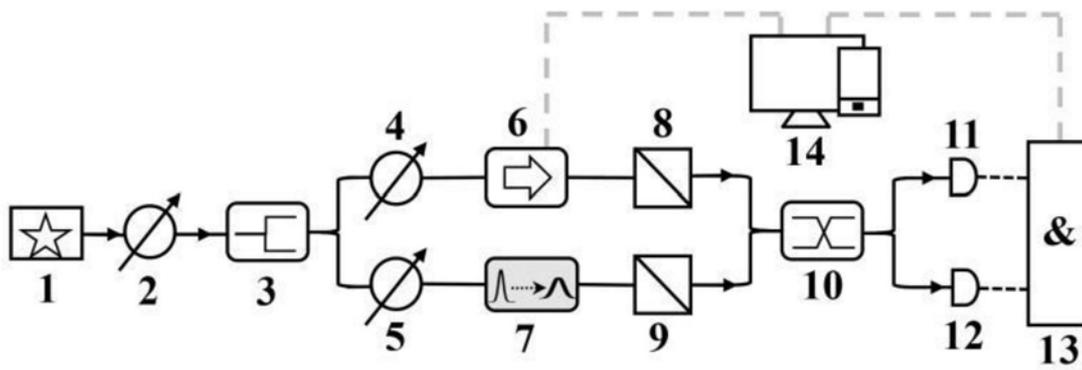


图2

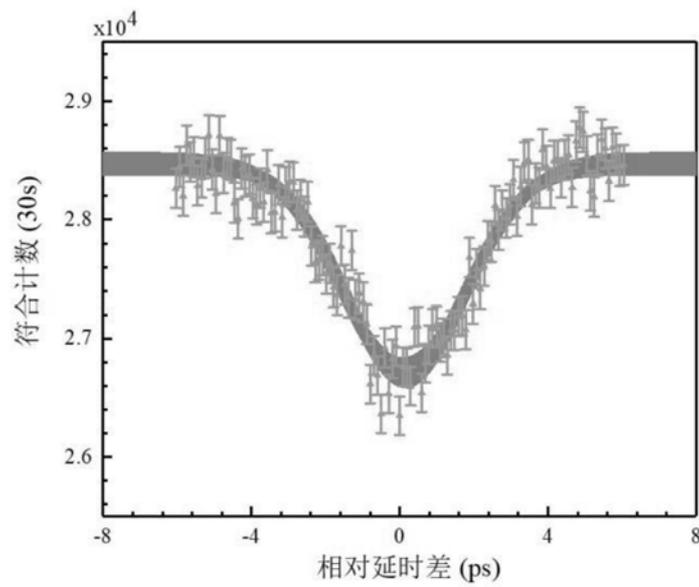


图3