



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114046868 A

(43) 申请公布日 2022. 02. 15

(21) 申请号 202111319090.7

(22) 申请日 2021.11.09

(71) 申请人 重庆大学

地址 400030 重庆市沙坪坝区沙正街174号

(72) 发明人 邓明 冯丹祺 张天衡 谷三峰

(74) 专利代理机构 重庆双马智翔专利代理事务
所(普通合伙) 50241

代理人 顾晓玲

(51) Int. Cl.

G01H 9/00 (2006.01)

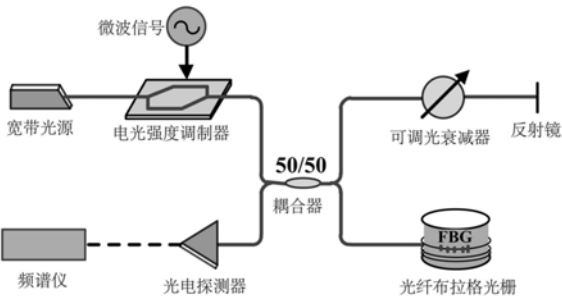
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统

(57) 摘要

本发明提供一种高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统,包括宽带光源、电光强度调制器、耦合器、可调光衰减器、反射镜、光纤布拉格光栅、光电探测器和频谱仪,宽带光源与所述电光强度调制器的输入端连接,电光强度调制器的输出端与该耦合器的耦合输入端连接,该耦合器的第一输出端通过该可调光衰减器连接该反射镜,第二输出端与该光纤布拉格光栅连接,该耦合器的耦合输出端通过该光电探测器连接该频谱仪。本发明结构简单、精度和灵敏度较高且解析时间较短,可以实现实时监测。



1. 一种高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统, 其特征在于, 包括宽带光源、电光强度调制器、耦合器、可调光衰减器、反射镜、光纤布拉格光栅、光电探测器和频谱仪, 所述宽带光源与所述电光强度调制器的输入端连接, 所述电光强度调制器的输出端与该耦合器的耦合输入端连接, 该耦合器的第一输出端通过该可调光衰减器连接该反射镜, 第二输出端与该光纤布拉格光栅连接, 该耦合器的耦合输出端通过该光电探测器连接该频谱仪;

所述宽带光源, 用于将激光信号传输给所述电光强度调制器;

所述电光强度调制器, 用于将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上, 并将加载有所述微波信号的激光信号传输给所述耦合器;

所述耦合器, 用于将加载有所述微波信号的激光信号分成上下两路, 一路作为参考光传输给所述可调光衰减器, 另一路作为测量光传输给所述光纤布拉格光栅;

所述可调光衰减器, 用于对所述参考光的强度进行调节, 并将强度调节后的参考光传输给所述反射镜; 所述反射镜在接收到强度调节后的参考光后, 通过所述可调光衰减器将参考反射光传输给所述耦合器; 所述光纤布拉格光栅在接收到所述测量光后, 将加载有振动信号的测量光反射光传输给所述耦合器; 所述参考反射光和测量反射光在所述耦合器处合束, 发生微波干涉, 所述光电探测器对微波干涉光信号进行探测, 获得微波干涉电信号; 所述频谱仪结合迈克尔逊干涉数学模型, 对所述微波干涉电信号进行分析, 从而获得不同位置处的振动强度;

其中, 所述可调光衰减器通过对所述参考光的强度进行调节, 来增大所述微波干涉的对比度, 从而提高振动信号测量灵敏度; 和/或通过选择并将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上, 利用加载有所述微波信号的激光信号进行振动测量, 以提高振动信号测量灵敏度。

2. 根据权利要求1所述的高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统, 其特征在于, 按照以下方法对所述微波信号的设定单频率进行选择:

搭建好所述微波干涉振动实时监测系统后, 在所述电光强度调制器不将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上, 不对所述宽带光源输出的激光信号进行电光强度调制, 且所述光纤布拉格光栅不对振动信号进行测量的前提下, 操作所述宽带光源输出激光信号, 所述频谱仪在获得宽频响应后, 确定所述宽频响应中微波干涉的波谷频率, 并将所述波谷频率作为该微波信号的设定单频率。

3. 根据权利要求1所述的高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统, 其特征在于, 所述频谱仪将所述微波干涉电信号带入迈克尔逊干涉数学模型, 计算出所述振动信号的强度。

4. 根据权利要求3所述的高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统, 其特征在于, 所述迈克尔逊干涉数学模型为:

$$P = M^2 \left\{ A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \right. \\ \left. * \cos \left[2\pi f \alpha U_0 (\sin 2\pi \omega t) + 2\pi f \Delta \tau_0 \right] \right\}$$

A_1 为参考臂光振幅, A_2 为测量臂光振幅, f 为光频率, α 为色散系数, U_0 为振动信号幅值, ω 为振动信号频率, $\Delta \tau_0$ 为两臂的初始相位差, 其中, 函数 $\cos[]$ 表示迈克尔逊干涉条纹数学公式, $\sin 2$ 表示振动信号的表达式。

5. 根据权利要求3或4所述的高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统, 其特征在于, 将

所述微波干涉电信号带入所述迈克尔逊干涉数学模型后,比对所述迈克尔逊干涉数学模型中二次和四次谐波的功率,或者比对所述迈克尔逊干涉数学模型中一次和三次谐波的功率,确定因所述振动信号引起的相位变化,根据所述相位变化,计算出所述振动信号的强度。

6. 根据权利要求5所述的高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统,其特征在于,所述迈克尔逊干涉数学模型中一次至四次谐波的功率表示为:

$$P = 4A_1A_2M^2 \left\{ \begin{array}{l} -\sin(2\pi f\Delta\tau_0)J_1(2\pi f\alpha U_0)\sin(2\pi\omega t) \\ +\cos(2\pi f\Delta\tau_0)J_2(2\pi f\alpha U_0)\cos(4\pi\omega t) \\ -\sin(2\pi f\Delta\tau_0)J_3(2\pi f\alpha U_0)\sin(6\pi\omega t) \\ +\cos(2\pi f\Delta\tau_0)J_4(2\pi f\alpha U_0)\cos(8\pi\omega t) \end{array} \right\}$$

其中,M为微波信号幅度,J为贝塞尔函数, A_1 为参考臂光振幅, A_2 为测量臂光振幅,f为光频率, U_0 为振动信号幅值, ω 为振动信号频率, $\Delta\tau_0$ 为两臂的初始相位差, α 为色散系数。

7. 根据权利要求6所述的高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统,其特征在于,比对所述迈克尔逊干涉数学模型中二次和四次谐波的功率时,因所述振动信号引起的相位变化表示为:

$$\left| \frac{J_2(2\pi f\alpha U_0)}{J_4(2\pi f\alpha U_0)} \right|;$$

比对所述迈克尔逊干涉数学模型中一次和三次谐波的功率时,因所述振动信号引起的相位变化表示为:

$$\left| \frac{J_1(2\pi f\alpha U_0)}{J_3(2\pi f\alpha U_0)} \right|。$$

高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统

技术领域

[0001] 本发明属于振动监测领域，具体涉及一种高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统。

背景技术

[0002] 振动监测在现代工程系统中发挥着重要作用，比如石油工业中的健康监测以及地震活动或者环境监测。当这些系统运行异常时会产生振动，而监测系统振动可以进行预警和诊断。因此，振动传感技术在以上系统中起着十分重要的作用。光纤振动传感器由于其体积小、重量轻和抗电磁干扰等优势被应用于振动监测中。光纤振动传感器根据传感原理分为三类：基于光强的传感器、基于干涉的传感器和基于光栅的传感器。目前基于强度的光纤振动传感器其存在着测量精度受不确定的光纤弯曲和光功率波动的问题。基于干涉仪的光纤振动传感器存在着带宽受限以及结构制备复杂的问题。基于光栅的光纤传感系统中由于其基于波长漂移的解调方法存在着解调时间长的问题，不适合实时监测。

发明内容

[0003] 本发明提供一种高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统，以解决目前振动监测系统结构复杂、精度和灵敏度较低且解析时间较长、无法实现实时监测的问题。

[0004] 根据本发明实施例的第一方面，提供一种高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统，包括宽带光源、电光强度调制器、耦合器、可调光衰减器、反射镜、光纤布拉格光栅、光电探测器和频谱仪，所述宽带光源与所述电光强度调制器的输入端连接，所述电光强度调制器的输出端与该耦合器的耦合输入端连接，该耦合器的第一输出端通过该可调光衰减器连接该反射镜，第二输出端与该光纤布拉格光栅连接，该耦合器的耦合输出端通过该光电探测器连接该频谱仪；

[0005] 所述宽带光源，用于将激光信号传输给所述电光强度调制器；

[0006] 所述电光强度调制器，用于将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上，并将加载有所述微波信号的激光信号传输给所述耦合器；

[0007] 所述耦合器，用于将加载有所述微波信号的激光信号分成上下两路，一路作为参考光传输给所述可调光衰减器，另一路作为测量光传输给所述光纤布拉格光栅；

[0008] 所述可调光衰减器，用于对所述参考光的强度进行调节，并将强度调节后的参考光传输给所述反射镜；所述反射镜在接收到强度调节后的参考光后，通过所述可调光衰减器将参考反射光传输给所述耦合器；所述光纤布拉格光栅在接收到所述测量光后，将加载有振动信号的测量光反射光传输给所述耦合器；所述参考反射光和测量反射光在所述耦合器处合束，发生微波干涉，所述光电探测器对微波干涉光信号进行探测，获得微波干涉电信号；所述频谱仪结合迈克尔逊干涉数学模型，对所述微波干涉电信号进行分析，从而获得不同位置处的振动强度；

[0009] 其中，所述可调光衰减器通过对所述参考光的强度进行调节，来增大所述微波干

涉的对比度,从而提高振动信号测量灵敏度;和/或通过选择并将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上,利用加载有所述微波信号的激光信号进行振动测量,以提高振动信号测量灵敏度。

[0010] 在一种可选的实现方式中,按照以下方法对所述微波信号的设定单频率进行选择:

[0011] 搭建好所述微波干涉振动实时监测系统后,在所述电光强度调制器不将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上,不对所述宽带光源输出的激光信号进行电光强度调制,且所述光纤布拉格光栅不对振动信号进行测量的前提下,操作所述宽带光源输出激光信号,所述频谱仪在获得宽频响应后,确定所述宽频响应中微波干涉的波谷频率,并将所述波谷频率作为该微波信号的设定单频率。

[0012] 在另一种可选的实现方式中,所述频谱仪将所述微波干涉电信号带入迈克尔逊干涉数学模型,计算出所述振动信号的强度。

[0013] 在另一种可选的实现方式中,所述迈克尔逊干涉数学模型为:

$$[0014] \quad P = M^2 \left\{ A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \right. \\ \left. * \cos[2\pi f \alpha U_0 (\sin 2\pi \omega t) + 2\pi f \Delta \tau_0] \right\}$$

[0015] A_1 为参考臂光振幅, A_2 为测量臂光振幅, f 为光频率, α 为色散系数, U_0 为振动信号幅值, ω 为振动信号频率, $\Delta \tau_0$ 为两臂的初始相位差,其中,函数 $\cos[]$ 表示迈克尔逊干涉条纹数学公式, $\sin 2\pi \omega t$ 表示振动信号的表达式。

[0016] 在另一种可选的实现方式中,将所述微波干涉电信号带入所述迈克尔逊干涉数学模型后,比对所述迈克尔逊干涉数学模型中二次和四次谐波的功率,或者比对所述迈克尔逊干涉数学模型中一次和三次谐波的功率,确定因所述振动信号引起的相位变化,根据所述相位变化,计算出所述振动信号的强度。

[0017] 在另一种可选的实现方式中,所述迈克尔逊干涉数学模型中一次至四次谐波的功率表示为:

$$[0018] \quad P = 4A_1A_2M^2 \\ * \left\{ \begin{array}{l} -\sin(2\pi f \Delta \tau_0)J_1(2\pi f \alpha U_0)\sin(2\pi \omega t) \\ +\cos(2\pi f \Delta \tau_0)J_2(2\pi f \alpha U_0)\cos(4\pi \omega t) \\ -\sin(2\pi f \Delta \tau_0)J_3(2\pi f \alpha U_0)\sin(6\pi \omega t) \\ +\cos(2\pi f \Delta \tau_0)J_4(2\pi f \alpha U_0)\cos(8\pi \omega t) \end{array} \right\}$$

[0019] 其中, M 为微波信号幅度, J 为贝塞尔函数, A_1 为参考臂光振幅, A_2 为测量臂光振幅, f 为光频率, U_0 为振动信号幅值, ω 为振动信号频率, $\Delta \tau_0$ 为两臂的初始相位差, α 为色散系数。

[0020] 在另一种可选的实现方式中,比对所述迈克尔逊干涉数学模型中二次和四次谐波的功率时,因所述振动信号引起的相位变化表示为:

$$[0021] \quad \left| \frac{J_2(2\pi f \alpha U_0)}{J_4(2\pi f \alpha U_0)} \right|;$$

[0022] 比对所述迈克尔逊干涉数学模型中一次和三次谐波的功率时,因所述振动信号引起的相位变化表示为:

$$[0023] \quad \left| \frac{J_1(2\pi f\alpha U_0)}{J_3(2\pi f\alpha U_0)} \right|。$$

[0024] 本发明的有益效果是：

[0025] 1、本发明通过设置可调光衰减器，对参考臂上传输的参考光的强度进行调节，可以增大所述微波干涉的对比度，从而提高振动信号测量灵敏度和分辨率，通过选择并将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上，利用加载有所述微波信号的激光信号进行振动测量，同样可以提高振动信号测量灵敏度和分辨率；本发明进行干涉测量时是基于微波干涉，如此可以提高系统的稳定性，并且本发明结构简单，在进行振动信号解析时，将微波干涉电信号与迈克尔逊干涉数学模型相结合，解析方法简单且所用时间短，可以实现振动信号实时监测；

[0026] 2、本发明将微波干涉中波谷频率对应的微波信号加载到激光信号进行振动测量，振动测量的灵敏度最大。

附图说明

[0027] 图1是本发明高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统的一个实施例结构示意图。

具体实施方式

[0028] 为了使本技术领域的人员更好地理解本发明实施例中的技术方案，并使本发明实施例的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂，下面结合附图对本发明实施例中技术方案作进一步详细的说明。

[0029] 在本发明的描述中，除非另有规定和限定，需要说明的是，术语“连接”应做广义理解，例如，可以是机械连接或电连接，也可以是两个元件内部的连通，可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，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的具体含义。

[0030] 参见图1，为本发明高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统的一个实施例结构示意图。该高灵敏度的微波干涉振动实时监测系统可以包括宽带光源、电光强度调制器、耦合器、可调光衰减器、反射镜、光纤布拉格光栅、光电探测器和频谱仪，所述宽带光源与所述电光强度调制器的输入端连接，所述电光强度调制器的输出端与该耦合器的耦合输入端连接，该耦合器的第一输出端通过该可调光衰减器连接该反射镜，第二输出端与该光纤布拉格光栅连接，该耦合器的耦合输出端通过该光电探测器连接该频谱仪；

[0031] 所述宽带光源，用于将激光信号传输给所述电光强度调制器；

[0032] 所述电光强度调制器，用于将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上，并将加载有所述微波信号的激光信号传输给所述耦合器；

[0033] 所述耦合器，用于将加载有所述微波信号的激光信号分成上下两路，一路作为参考光传输给所述可调光衰减器，另一路作为测量光传输给所述光纤布拉格光栅；

[0034] 所述可调光衰减器，用于对所述参考光的强度进行调节，并将强度调节后的参考光传输给所述反射镜；所述反射镜在接收到强度调节后的参考光后，通过所述可调光衰减器将参考反射光传输给所述耦合器；所述光纤布拉格光栅在接收到所述测量光后，将加载有振动信号的测量光反射光传输给所述耦合器；所述参考反射光和测量反射光在所述耦合

器处合束,发生微波干涉,所述光电探测器对微波干涉光信号进行探测,获得微波干涉电信号;所述频谱仪结合迈克尔逊干涉数学模型,对所述微波干涉电信号进行分析,从而获得不同位置处的振动强度;

[0035] 其中,所述可调光衰减器通过对所述参考光的强度进行调节,来增大所述微波干涉的对比度,从而提高振动信号测量灵敏度;和/或通过选择并将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上,利用加载有所述微波信号的激光信号进行振动测量,以提高振动信号测量灵敏度。

[0036] 本实施例中,光纤布拉格光栅用于对外界的振动信号进行测量,其在接收到测量光后,会产生向后传输的测量反射光,且外界的振动信号会被加载至该测量发射光上,连同测量反射光向后传输回该耦合器。由于参考光传输所在参考臂与测量光传输所在测量臂的长度不同,导致参考臂和测量臂之间存在一定的光程差,为此本发明中反射镜向后传输回的参考反射光和光纤布拉格光栅向后传输回的测量反射光在耦合器处会发生微波干涉。由于光学的相干干涉容易受到外界扰动影响,这就带来了测量的不稳定性,本发明通过将设定单频率的微波信号激光信号中,利用加载有微波信号的激光信号对外界振动信号进行测量,以使反射镜向后传输的参考反射光和光纤布拉格光栅向后传输回的测量反射光在耦合器处发生微波干涉,由此可以提高系统的稳定性。

[0037] 经申请人研究发现,通过调节参考光的强度,使得参考光的强度与测量光的强度相等时,在耦合器处产生的微波干涉的对比度最大,且微波干涉的对比度越大,振动信号的测量灵敏度越高,为此本发明在测量臂上设置有可调光衰减器。另外,通过选择并将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上,利用加载有所述微波信号的激光信号进行振动测量,使得参考臂和测量臂上向后传输回的参考反射光与测量反射光发生微波干涉,可以提高振动信号测量灵敏度和分辨率,为此本发明设置有电光强度调制器,用于将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上。

[0038] 其中,该耦合器可以为 2×2 耦合器。经申请人研究发现,将微波干涉中不同位置处的单频率微波信号加载到激光信号进行振动测量,会对振动测量的灵敏度产生不同的影响,其中微波干涉的波谷频率相比于其他位置处的频率,将该波谷频率对应的微波信号加载到激光信号进行振动测量时,振动测量的灵敏度最大。为此本发明可以按照以下方法对所述微波信号的设定单频率进行选择:搭建好所述微波干涉振动实时监测系统后,在所述电光强度调制器不将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上,不对所述宽带光源输出的激光信号进行电光强度调制,且所述光纤布拉格光栅不对振动信号进行测量的前提下,操作所述宽带光源输出激光信号,所述频谱仪在获得宽频响应后,确定所述宽频响应中微波干涉的波谷频率,并将所述波谷频率作为该微波信号的设定单频率。

[0039] 另外,本发明频谱仪在进行振动强度分析时,结合迈克尔逊干涉数学模型,对所述微波干涉电信号进行分析,具体地,所述频谱仪将所述微波干涉电信号带入迈克尔逊干涉数学模型,计算出所述振动信号的强度,所述迈克尔逊干涉数学模型为:

$$[0040] \quad P = M^2 \left\{ A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \right. \\ \left. * \cos \left[2\pi f \alpha U_0 (\sin 2\pi \omega t) + 2\pi f \Delta \tau_0 \right] \right\}$$

[0041] A_1 为参考臂光振幅, A_2 为测量臂光振幅, f 为光频率, α 为色散系数, U_0 为振动信号幅值, ω 为振动信号频率, $\Delta \tau_0$ 为两臂的初始相位差,其中,函数 $\cos[]$ 表示迈克尔逊干涉条纹

数学公式, $\sin 2\pi \omega t$ 表示振动信号的表达式。

[0042] 将所述微波干涉电信号带入所述迈克尔逊干涉数学模型后, 比对所述迈克尔逊干涉数学模型中二次和四次谐波的功率, 或者比对所述迈克尔逊干涉数学模型中一次和三次谐波的功率, 确定因所述振动信号引起的相位变化, 根据所述相位变化, 计算出所述振动信号的强度。

[0043] 所述迈克尔逊干涉数学模型中一次至四次谐波的功率表示为:

$$P = 4A_1 A_2 M^2$$

$$* \begin{cases} -\sin(2\pi f \Delta \tau_0) J_1(2\pi f \alpha U_0) \sin(2\pi \omega t) \\ +\cos(2\pi f \Delta \tau_0) J_2(2\pi f \alpha U_0) \cos(4\pi \omega t) \\ -\sin(2\pi f \Delta \tau_0) J_3(2\pi f \alpha U_0) \sin(6\pi \omega t) \\ +\cos(2\pi f \Delta \tau_0) J_4(2\pi f \alpha U_0) \cos(8\pi \omega t) \end{cases}$$

[0045] 将上述迈克尔逊干涉数学模型利用贝塞尔展开获得一次至四次谐波的功率的表达式。其中, M 为微波信号幅度, J 为贝塞尔函数, A_1 为参考臂光振幅, A_2 为测量臂光振幅, f 为光频率, U_0 为振动信号幅值, ω 为振动信号频率, $\Delta \tau_0$ 为两臂的初始相位差, α 为色散系数。

[0046] 比对所述迈克尔逊干涉数学模型中二次和四次谐波的功率时, 因所述振动信号引起的相位变化表示为:

$$[0047] \quad \left| \frac{J_2(2\pi f \alpha U_0)}{J_4(2\pi f \alpha U_0)} \right|;$$

[0048] 比对所述迈克尔逊干涉数学模型中一次和三次谐波的功率时, 因所述振动信号引起的相位变化表示为:

$$[0049] \quad \left| \frac{J_1(2\pi f \alpha U_0)}{J_3(2\pi f \alpha U_0)} \right|。$$

[0050] 本发明在进行振动信号解析时, 将微波干涉电信号与迈克尔逊干涉数学模型相结合, 解析方法简单且所用时间短, 可以实现振动信号实时监测。

[0051] 由上述实施例可见, 本发明通过设置可调光衰减器, 对参考臂上传输的参考光的强度进行调节, 可以增大所述微波干涉的对比度, 从而提高振动信号测量灵敏度和分辨率, 通过选择并将设定单频率的微波信号加载至所述激光信号上, 利用加载有所述微波信号的激光信号进行振动测量, 同样可以提高振动信号测量灵敏度和分辨率; 本发明进行干涉测量时是基于微波干涉, 如此可以提高系统的稳定性, 并且本发明结构简单, 在进行振动信号解析时, 将微波干涉电信号与迈克尔逊干涉数学模型相结合, 解析方法简单且所用时间短, 可以实现振动信号实时监测。

[0052] 本领域技术人员在考虑说明书及实践这里公开的发明后, 将容易想到本发明的其它实施方案。本申请旨在涵盖本发明的任何变型、用途或者适应性变化, 这些变型、用途或者适应性变化遵循本发明的一般性原理并包括本发明未公开的本技术领域中的公知常识或惯用技术手段。说明书和实施例仅被视为示例性的, 本发明的真正范围和精神由下面的权利要求指出。

[0053] 应当理解的是, 本发明并不局限于上面已经描述并在附图中示出的精确结构, 并且可以在不脱离其范围进行各种修改和改变。本发明的范围仅由所附的权利要求来管制。

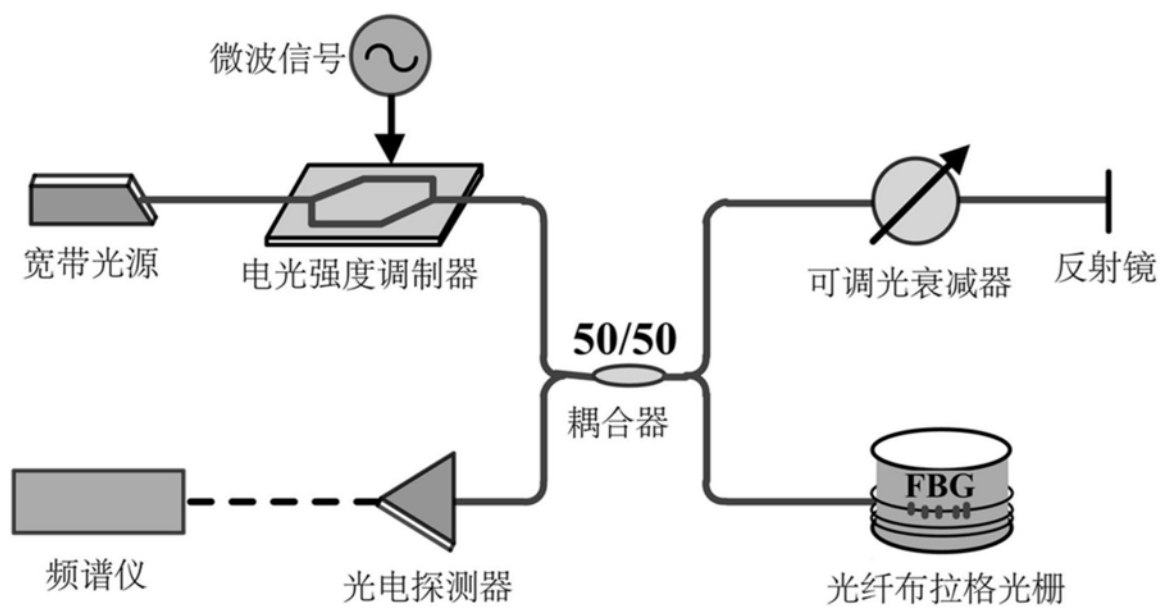


图1