



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113410743 B

(45) 授权公告日 2022.05.10

(21) 申请号 202110541004.0

CN 209046006 U, 2019.06.28

(22) 申请日 2021.05.18

WO 2020167968 A1, 2020.08.20

(65) 同一申请的已公布的文献号

US 2018205463 A1, 2018.07.19

申请公布号 CN 113410743 A

CN 112669226 A, 2021.04.16

CN 112034660 A, 2020.12.04

(43) 申请公布日 2021.09.17

WO 2019213137 A1, 2019.11.07

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院

US 2018083414 A1, 2018.03.22

地址 518057 广东省深圳市南山区粤海街

US 2012105177 A1, 2012.05.03

道高新技术产业园南区粤兴一道18号

CN 110554465 A, 2019.12.10

香港理工大学产学研大楼205室

US 2018351319 A1, 2018.12.06

专利权人 香港理工大学

Shun Fujii等.Analysis of Mode

(72) 发明人 程子豪 黄冬梅 李锋 卫炳江

Coupling Assisted Kerr Comb Generation in Normal Dispersion System.《IEEE Photonics Journal》.2018,第10卷(第5期),第1页第1段至第10页第3段、图1-7.

(74) 专利代理机构 深圳市君胜知识产权代理事务所(普通合伙) 44268

专利代理师 朱阳波

张利斌等.克尔微腔光频梳理论分析模型及多波长光源应用探讨.《激光与光电子学进展》.2014,第51卷第110008-1~9页.

(51) Int. Cl.

H01S 3/10 (2006.01)

H01S 3/091 (2006.01)

审查员 薛正燕

(56) 对比文件

CN 212623438 U, 2021.02.26

权利要求书2页 说明书9页 附图5页

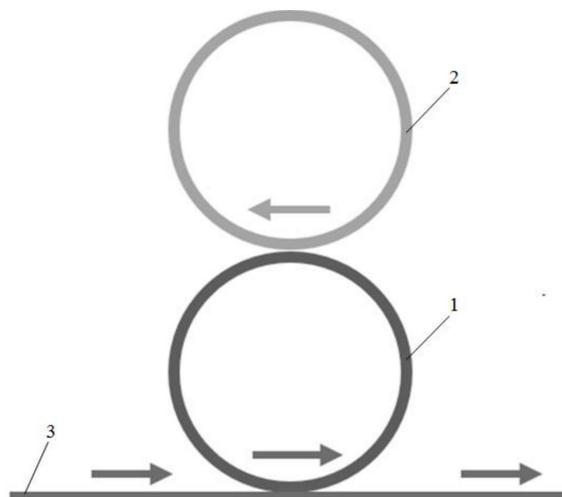
(54) 发明名称

材料选择和微腔结构设计的灵活性。

一种基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置及方法,包括:光源、主微腔、辅助微腔以及光波导;其中,主微腔与辅助微腔和光波导存在线性耦合,主微腔具有克尔非线性,辅助微腔的克尔非线性系数小于主微腔的克尔非线性系数的万分之一,主微腔和辅助微腔的模式失谐量以及耦合系数满足预设条件;光源用于产生频率处于泵浦模式的蓝失谐端的泵浦光;光波导用于将光源产生的泵浦光耦合入主微腔,以及输出光频率梳;主微腔用于接收光波导耦合入的泵浦光,并产生光频率梳。本发明的装置利用蓝失谐端泵浦形成光频率梳,提升了整个装置的热稳定性,微腔不受反常色散的限制,提升了



1. 一种基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置,其特征在于,包括:光源、主微腔、辅助微腔以及光波导;其中,所述主微腔同时与所述辅助微腔和所述光波导存在线性耦合,所述辅助微腔仅与所述主微腔存在线性耦合,所述主微腔同时与所述辅助微腔和所述光波导存在线性耦合,所述光波导仅与所述主微腔存在线性耦合,所述主微腔具有克尔非线性,所述辅助微腔的克尔非线性系数小于所述主微腔的克尔非线性系数的万分之一,所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数满足预设条件,在所述预设条件下所述主微腔在泵浦模式的蓝失谐端存在调制不稳定的区域;

所述光源用于产生频率处于泵浦模式的蓝失谐端的泵浦光;

所述光波导用于接收所述光源产生的泵浦光,并将所述泵浦光耦合入所述主微腔,以及输出所述主微腔产生的光频率梳;

所述主微腔用于接收所述光波导耦合入的泵浦光,并产生所述光频率梳;

所述预设条件为:

$$B'^2 - 3A'^2 > 0$$

$$\text{其中, } A' = -\frac{\kappa}{2} - \frac{\frac{\kappa'}{2}\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}, B' = -(\delta\omega_0 + \frac{D_2}{2}l^2) + \frac{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}, \delta\omega_0$$

代表主微腔的模式失谐量, $\delta\omega_0$ 中的下标0代表泵浦模式, $\delta\omega'_0$ 代表辅助微腔的模式失谐量, $D_2$ 代表主微腔的群速度色散, $D'_2$ 代表辅助微腔的群速度色散, $\kappa$ 代表主微腔的光强度损耗, $\kappa'$ 代表辅助微腔的光强度损耗, $\beta$ 代表主微腔和辅助微腔之间的耦合系数, $l$ 代表与泵浦模式对应的初模式的模式序号。

2. 根据权利要求1所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置,其特征在于,所述装置还包括:调节模块;

所述调节模块用于调节所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数,以使得所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数满足预设条件。

3. 根据权利要求2所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置,其特征在于,所述调节模块包括:耦合系数调节单元和模式失谐量调节单元;

所述耦合系数调节单元用于调节所述主微腔和所述辅助微腔之间的距离,以实现所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数的调节;

所述模式失谐量调节单元用于调节所述主微腔和/或所述辅助微腔的等效腔长,以实现所述主微腔的模式失谐量和所述辅助微腔的模式失谐量的调节。

4. 根据权利要求1所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置,其特征在于,所述主微腔的群速度色散为正常色散或反常色散,所述辅助微腔的群速度色散为正常色散、反常色散或零色散。

5. 根据权利要求1所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置,其特征在于,所述主微腔的材质为氮化硅,铌酸锂,氮化铝,二氧化硅,硅,氮化镓,磷化镓,铝镓砷,硫化砷中的一种或多种。

6. 一种如权利要求1所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置的微腔光频梳产生方法,其特征在于,包括;

通过光源产生频率处于泵浦模式的蓝失谐端的泵浦光,并将所述泵浦光发射至光波导;

通过所述光波导接收所述光源产生的泵浦光,并将所述泵浦光耦合入所述主微腔,以及输出所述主微腔产生的光频率梳;

通过所述主微腔接收所述光波导耦合入的泵浦光,并产生所述光频率梳;其中,所述主微腔同时与所述辅助微腔和所述光波导存在线性耦合,所述辅助微腔仅与所述主微腔存在线性耦合,所述主微腔同时与所述辅助微腔和所述光波导存在线性耦合,所述光波导仅与所述主微腔存在线性耦合,所述主微腔具有克尔非线性,所述辅助微腔的克尔非线性系数小于所述主微腔的克尔非线性系数的万分之一,所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数满足预设条件,在所述预设条件下所述主微腔在泵浦模式的蓝失谐端存在调制不稳定的区域;

所述预设条件为:

$$B'^2 - 3A'^2 > 0$$

$$\text{其中, } A' = -\frac{\kappa}{2} - \frac{\frac{\kappa'}{2}\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}, B' = -(\delta\omega_0 + \frac{D_2}{2}l^2) + \frac{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}, \delta\omega_0$$

代表主微腔的模式失谐量, $\delta\omega_0$ 中的下标0代表泵浦模式, $\delta\omega'_0$ 代表辅助微腔的模式失谐量, $D_2$ 代表主微腔的群速度色散, $D'_2$ 代表辅助微腔的群速度色散, $\kappa$ 代表主微腔的光强度损耗, $\kappa'$ 代表辅助微腔的光强度损耗, $\beta$ 代表主微腔和辅助微腔之间的耦合系数, $l$ 代表与泵浦模式对应的初模式的模式序号。

7. 根据权利要求6所述的微腔光频梳产生方法,其特征在于,所述通过所述主微腔接收所述光波导耦合入的泵浦光,并产生所述光频率梳的步骤之前包括:

调节所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数,以使得所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数满足预设条件。

8. 根据权利要求7所述的微腔光频梳产生方法,其特征在于,所述耦合系数和所述模式失谐量的调节方法包括热调节、机械调节、电调节和光调节中的一种或多种。

## 一种基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及光学技术领域,尤其涉及的是一种基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置及方法。

### 背景技术

[0002] 光学频率梳是指在频谱上由一系列均匀间隔且具有相干稳定相位关系的频率分量组成的光谱,光学频率梳在光学任意波形产生、多波长超短脉冲产生、密集波分复用和精密测量等领域有着广泛的应用。

[0003] 连续泵浦高品质因子光学微腔是一种产生光频梳的有效手段,目前常见的基于微腔的光频率梳产生装置中要求泵浦连续光处于泵浦模式的红失谐端,并且微腔的群速度色散在泵浦频率附近为反常色散。红失谐端泵浦在热效应出现扰动时具有不稳定性,通常需要额外的温控装置维持环境温度的稳定。且常见材料在通讯波段附近的微腔色散一般为正常色散,为实现反常色散需要对微腔的几何结构进行特殊的设计和加工,增加了微腔加工的难度,减少了微腔结构设计的灵活性。

[0004] 因此,现有技术还有待改进和发展。

### 发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题在于,针对现有技术的上述缺陷,提供一种基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置及方法,旨在解决现有基于微腔的光频率梳产生装置需要额外的温控装置,且微腔的群速度色散在泵浦频率附近必须为反常色散的问题。

[0006] 本发明解决问题所采用的技术方案如下:

[0007] 第一方面,本发明实施例提供一种基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置,其中,包括:光源、主微腔、辅助微腔以及光波导;其中,所述主微腔同时与所述辅助微腔和所述光波导存在线性耦合,所述主微腔具有克尔非线性,所述辅助微腔的克尔非线性系数小于所述主微腔的克尔非线性系数的万分之一,所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数满足预设条件,在所述预设条件下所述主微腔在泵浦模式的蓝失谐端存在调制不稳定的区域;

[0008] 所述光源用于产生频率处于泵浦模式的蓝失谐端的泵浦光;

[0009] 所述光波导用于接收所述光源产生的泵浦光,并将所述泵浦光耦合入所述主微腔,以及输出所述主微腔产生的光频率梳;

[0010] 所述主微腔用于接收所述光波导耦合入的泵浦光,并产生所述光频率梳。

[0011] 所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置,其中,所述预设条件为:

[0012]  $B'^2 - 3A'^2 > 0$

$$[0013] \quad \text{其中, } A' = -\frac{\kappa}{2} - \frac{\frac{\kappa'}{2}\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}, \quad B' = -(\delta\omega_0 + \frac{D_2}{2}l^2) + \frac{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}},$$

$\delta\omega_0$ 代表主微腔的模式失谐量,0代表泵浦模式, $\delta\omega'_0$ 代表辅助微腔的模式失谐量, $D_2$ 代表主微腔的群速度色散, $D'_2$ 代表辅助微腔的群速度色散, $\kappa$ 代表主微腔的光强度损耗, $\kappa'$ 代表辅助微腔的光强度损耗, $\beta$ 代表主微腔和辅助微腔之间的耦合系数, $l$ 代表与泵浦模式对应的初模式的模式序号。

[0014] 所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置,其中,所述装置还包括:调节模块;

[0015] 所述调节模块用于调节所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数,以使得所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数满足预设条件。

[0016] 所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置,其中,所述调节模块包括:耦合系数调节单元和模式失谐量调节单元;

[0017] 所述耦合系数调节单元用于调节所述主微腔和所述辅助微腔之间的距离,以实现所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数的调节;

[0018] 所述模式失谐量调节单元用于调节所述主微腔和/或所述辅助微腔的等效腔长,以实现所述主微腔的模式失谐量和所述辅助微腔的模式失谐量的调节。

[0019] 所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置,其中,所述主微腔的群速度色散为正常色散或反常色散,所述辅助微腔的群速度色散为正常色散、反常色散或零色散。

[0020] 所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置,其中,所述主微腔的材质为氮化硅,铈酸锂,氮化铝,二氧化硅,硅,氮化镓,磷化镓,铝镓砷,硫化砷中的一种或多种。

[0021] 第二方面,本发明实施例还提供一种所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置的微腔光频梳产生方法,其中,包括;

[0022] 通过光源产生频率处于泵浦模式的蓝失谐端的泵浦光,并将所述泵浦光发射至光波导;

[0023] 通过所述光波导接收所述光源产生的泵浦光,并将所述泵浦光耦合入所述主微腔,以及输出所述主微腔产生的光频率梳;

[0024] 通过所述主微腔接收所述光波导耦合入的泵浦光,并产生所述光频率梳;其中,所述主微腔同时与所述辅助微腔和所述光波导存在线性耦合,所述主微腔具有克尔非线性,所述辅助微腔的克尔非线性系数小于所述主微腔的克尔非线性系数的万分之一,所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数满足预设条件,在所述预设条件下所述主微腔在泵浦模式的蓝失谐端存在调制不稳定的区域。

[0025] 所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生方法,其中,所述预设条件为:

$$[0026] \quad B'^2 - 3A'^2 > 0$$

$$[0027] \quad \text{其中, } A' = -\frac{\kappa}{2} - \frac{\frac{\kappa'}{2}\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}, \quad B' = -(\delta\omega_0 + \frac{D_2}{2}l^2) + \frac{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2}l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}},$$

$\delta\omega_0$ 代表主微腔的模式失谐量,0代表泵浦模式, $\delta\omega'_0$ 代表辅助微腔的模式失谐量, $D_2$ 代表主微腔的群速度色散, $D'_2$ 代表辅助微腔的群速度色散, $\kappa$ 代表主微腔的光强度损耗, $\kappa'$ 代表辅助微腔的光强度损耗, $\beta$ 代表主微腔和辅助微腔之间的耦合系数, $l$ 代表与泵浦模式对应的初模式的模式序号。

[0028] 所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生方法,其中,所述通过所述主微腔接收所述光波导耦合入的泵浦光,并产生所述光频率梳的步骤之前包括:

[0029] 调节所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数,以使得所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数满足预设条件。

[0030] 所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生方法,其中,所述耦合系数和所述模式失谐量的调节方法包括热调节、机械调节、电调节和光调节中的一种或多种。

[0031] 本发明的有益效果:本发明通过控制所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数满足预设条件,使得主微腔在泵浦模式的蓝失谐端存在调制不稳定的区域,主微腔在接收到蓝失谐端泵浦光后,可以形成光频率梳,由于蓝失谐端泵浦对于热效应导致的微腔谐振峰漂移具有负反馈的效果,提升了整个装置的热稳定性,微腔不受反常色散的限制,提升了材料选择和微腔结构设计的灵活性。

## 附图说明

[0032] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明中记载的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0033] 图1是本发明实施例提供的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置的结构示意图;

[0034] 图2是本发明实施例提供的双微腔和传统单微腔对应的调制不稳定性区域的结构示意图;

[0035] 图3是本发明实施例提供的热调节方式的耦合系数调节单元对应的结构示意图;

[0036] 图4是本发明实施例提供的机械调节方式的耦合系数调节单元对应的结构示意图;

[0037] 图5是本发明实施例提供的热调节方式的模式失谐量调节单元对应的结构示意图;

[0038] 图6是本发明实施例提供的电调节方式的模式失谐量调节单元对应的结构示意图;

[0039] 图7是本发明实施例提供的主微腔和辅助微腔均为正常色散时的光频率梳光谱

图；

[0040] 图8是本发明实施例提供的主微腔和辅助微腔均为反常色散时的光频率梳光谱图；

[0041] 图9是本发明实施例中提供的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生方法的流程示意图。

[0042] 附图中各标记：1、主微腔；2、辅助微腔；3、光波导；41、第一电极；41、第二电极；43、第三电极；44、PZT控制器；45、第四电极；46、第五电极；47、第六电极；48、第七电极；49、第八电极。

### 具体实施方式

[0043] 为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚、明确，以下参照附图并举实施例对本发明进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

[0044] 需要说明，若本发明实施例中有涉及方向性指示（诸如上、下、左、右、前、后……），则该方向性指示仅用于解释在某一特定姿态（如附图所示）下各部件之间的相对位置关系、运动情况等，如果该特定姿态发生改变时，则该方向性指示也相应地随之改变。

[0045] 目前常见的基于微腔的光频率梳产生方法中要求泵浦连续光处于泵浦模式的红失谐端，并且微腔的群速度色散在泵浦频率附近为反常色散。红失谐端泵浦在热效应出现扰动时具有不稳定性，通常需要额外的温控装置维持环境温度的稳定。且常见材料在通讯波段附近的微腔色散一般为正常色散，为实现反常色散需要对微腔的几何结构进行特殊的设计和加工，增加了微腔加工的难度，减少了微腔结构设计的灵活性。

#### [0046] 示例性装置

[0047] 为了解决现有技术的问题，本实施例提供了一种基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置，如图1所示，本发明实施例提供的微腔光频梳产生装置包括：光源、主微腔1、辅助微腔2以及光波导3；其中，所述光源用于产生频率处于泵浦模式的蓝失谐端的泵浦光；所述光波导3用于接收所述光源产生的泵浦光，并将所述泵浦光耦合入所述主微腔1，以及输出所述主微腔1产生的光频率梳；所述主微腔1用于接收所述光波导3耦合入的泵浦光，并产生所述光频率梳；所述辅助微腔2仅与所述主微腔1存在线性耦合，所述主微腔1同时与所述辅助微腔2和所述光波导3存在线性耦合，所述光波导3仅与所述主微腔1存在线性耦合，所述主微腔1具有克尔非线性，所述辅助微腔2的克尔非线性系数小于所述主微腔1的克尔非线性系数的万分之一，即所述辅助微腔2相对于所述主微腔1具有可忽略的克尔非线性，所述主微腔1的模式失谐量、所述辅助微腔2的模式失谐量以及所述主微腔1和所述辅助微腔2之间的耦合系数满足预设条件，在所述预设条件下所述主微腔1在泵浦蓝失谐端存在调制不稳定的区域。微腔中光频率梳的产生依赖于调制不稳定性，本实施例中通过控制所述主微腔1的模式失谐量、所述辅助微腔2的模式失谐量以及所述主微腔1和所述辅助微腔2之间的耦合系数满足预设条件，使得主微腔1在泵浦模式的蓝失谐端存在调制不稳定的区域，主微腔1在接收到蓝失谐端泵浦光后，可以形成光频率梳，由于蓝失谐端泵浦对于热效应导致的微腔谐振峰漂移具有负反馈的效果，提升了整个装置的热稳定性，微腔不受反常色散的限制，提升了材料选择和微腔结构设计的灵活性。

[0048] 具体地,主微腔1在泵浦模式的蓝失谐端存在的调制不稳定区域的大小和范围受到主微腔和辅助微腔的耦合强度,群速度色散,模式失谐量以及光强度损耗的影响,耦合微腔中的光信号传输可用以下方程组表示:

$$[0049] \quad \frac{\partial a_{\mu}}{\partial t} = -i(\delta\omega + \mu^2 \frac{D_2}{2})a_{\mu} - \frac{\kappa}{2}a_{\mu} + ig \sum_{\mu_1, \mu_2, \mu_3} a_{\mu_1} a_{\mu_2} a_{\mu_3}^* + i\beta a'_{\mu} + i\delta_{\mu 0} \sqrt{\kappa_{ext}} F \quad (1)$$

$$[0050] \quad \frac{\partial a'_{\mu}}{\partial t} = -i(\delta\omega' + \mu^2 \frac{D'_2}{2})a'_{\mu} - \frac{\kappa'}{2}a'_{\mu} + i\beta a_{\mu} \quad (2)$$

[0051] 其中,  $a_{\mu}$  代表主微腔中的第  $\mu$  个模式的强度,  $a_{\mu_1}$  代表主微腔中的第  $\mu_1$  个模式的强度,  $a_{\mu_2}$  代表主微腔中的第  $\mu_2$  个模式的强度,  $a_{\mu_3}^*$  代表主微腔中的第  $\mu_3$  个模式的强度,  $a'_{\mu}$  代表辅助微腔中的第  $\mu$  个模式的强度,  $t$  代表时间,  $\delta\omega$  代表主微腔的模式失谐量,  $\delta\omega'$  代表辅助微腔的模式失谐量,  $D_2$  代表主微腔的群速度色散,  $D'_2$  代表辅助微腔的群速度色散,  $\kappa$  代表主微腔的光强度损耗,  $\kappa'$  代表辅助微腔的光强度损耗,  $g$  代表克尔非线性系数,  $\beta$  代表两个微腔之间的耦合系数,  $\delta_{\mu 0}$  代表克罗内克函数, 当  $\mu=0$  时,  $\delta_{\mu 0}=1$ , 当  $\mu \neq 0$  时,  $\delta_{\mu 0}=0$ ,  $\kappa_{ext}$  代表波导与主微腔的耦合系数,  $F$  代表泵浦光强度。

[0052] 当泵浦能量刚刚满足调制不稳定增益产生的临界状态, 此时微腔内仅需要考虑泵浦模式, 和第一组关于泵浦模式对称的初模式。考虑给初模式一个微扰, 如果加入微扰后微扰得到增益即满足调制不稳定出现的条件。此时主微腔中两个初模式的微扰和辅助微腔中两个初模式的微扰满足:

$$[0053] \quad \frac{\partial \delta a_{+l}}{\partial t} = -i(\delta\omega_0 + l^2 \frac{D_2}{2})\delta a_{+l} - \frac{\kappa}{2}\delta a_{+l} + ig(a_0^2 \delta a_{-l}^* + 2|a_0|^2 \delta a_{+l}) + i\beta \delta a'_{+l} \quad (3)$$

$$[0054] \quad \frac{\partial \delta a_{-l}^*}{\partial t} = i(\delta\omega_0 + l^2 \frac{D_2}{2})\delta a_{-l}^* - \frac{\kappa}{2}\delta a_{-l}^* - ig(a_0^{2*} \delta a_{+l} + 2|a_0|^2 \delta a_{-l}^*) - i\beta \delta a_{-l}^{*'} \quad (4)$$

$$[0055] \quad \frac{\partial \delta a'_{+l}}{\partial t} = -i(\delta\omega'_0 + l^2 \frac{D'_2}{2})\delta a'_{+l} - \frac{\kappa'}{2}\delta a'_{+l} + i\beta \delta a_{+l} \quad (5)$$

$$[0056] \quad \frac{\partial \delta a_{-l}^{*'}}{\partial t} = i(\delta\omega'_0 + l^2 \frac{D'_2}{2})\delta a_{-l}^{*'} - \frac{\kappa'}{2}\delta a_{-l}^{*'} - i\beta \delta a_{-l}^* \quad (6)$$

[0057] 其中,  $\delta$  代表微扰,  $a_{+1}$  表示主微腔中第+1个模式的强度,  $a_{+1}'$  表示辅助微腔中第+1个模式的强度,  $a_{-1}^*$  表示主微腔中第-1个模式的强度,  $a_{-1}^{*}'$  表示辅助微腔中第-1个模式的强度,  $\delta\omega_0$  代表主微腔的模式失谐量,  $0$  代表泵浦模式,  $\delta\omega'_0$  代表辅助微腔的模式失谐量,  $D_2$  代表主微腔的群速度色散,  $D'_2$  代表辅助微腔的群速度色散,  $\kappa$  代表主微腔的光强度损耗,  $\kappa'$  代表辅助微腔的光强度损耗,  $g$  代表克尔非线性系数,  $\beta$  代表主微腔和辅助微腔之间的耦合系数,  $l$  代表与泵浦模式对应的初模式的模式序号。考虑辅助微腔中的初模式达到稳态, 可求解出辅助微腔中初模式强度为:

$$[0058] \quad \delta a'_{+l} = \frac{i\beta}{i(\delta\omega'_0 + l^2 \frac{D'_2}{2}) + \frac{\kappa'}{2}} \delta a_{+l} \quad (7)$$

$$[0059] \quad \delta a_{-l}^{*'} = \frac{i\beta}{i(\delta\omega'_0 + l^2 \frac{D'_2}{2}) - \frac{\kappa'}{2}} \delta a_{-l}^* \quad (8)$$

[0060] 将公式(7)和(8)代入公式(3)和(4)中得到:

$$[0061] \quad \frac{\partial \delta a_{+l}}{\partial t} = [-i(\delta\omega_0 + \frac{D_2}{2} l^2) + 2ig|a_0|^2 + \frac{i(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}} - \frac{\kappa}{2} - \frac{\frac{\kappa'}{2}\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}] \delta a_{+l} + ig a_0^2 \delta a_{-l}^* \quad (9)$$

$$[0062] \quad \frac{\partial \delta a_{-l}^*}{\partial t} = [i(\delta\omega_0 + \frac{D_2}{2} l^2) - 2ig|a_0|^2 - \frac{i(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}} - \frac{\kappa}{2} - \frac{\frac{\kappa'}{2}\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}] \delta a_{-l}^* - ig a_0^{2*} \delta a_{+l} \quad (10)$$

[0063] 式(9)和式(10)有系数可构成矩阵,矩阵特征值的实部即代表增益与损耗,求解矩阵特征值具有一个不小于零的实部的条件就等价于满足调制不稳定性出现的条件。为推导出所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔

之间的耦合系数满足的预设条件,令  $M = -(\delta\omega_0 + \frac{D_2}{2} l^2) + 2g|a_0|^2 + \frac{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}$ ,

$$N = -\frac{\kappa}{2} - \frac{\frac{\kappa'}{2}\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}, \text{ 则有 } \begin{bmatrix} \frac{\partial a_{+l}}{\partial t} \\ \frac{\partial a_{-l}^*}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} iM + N & ig a_0^2 \\ -ig a_0^{2*} & -iM + N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{+l} \\ a_{-l}^* \end{bmatrix}, \text{ 得到本征矩阵}$$

$$\begin{bmatrix} iM + N - \lambda & ig a_0^2 \\ -ig a_0^{2*} & -iM + N - \lambda \end{bmatrix} = 0.$$

[0064] 根据本征矩阵得到  $\lambda^2 - 2N\lambda + N^2 + M^2 - g^2|a_0|^4 = 0$ , 要求本征值有一个实部大于0的解等价于  $\text{Re}[2N + \sqrt{4g^2|a_0|^4 - 4M^2}] > 0$ , 即  $0 > N^2 + M^2 - g^2|a_0|^4$ 。令  $X = |a_0|^2$ ,

$$A' = -\frac{\kappa}{2} - \frac{\frac{\kappa'}{2}\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}, \quad B' = -(\delta\omega_0 + \frac{D_2}{2} l^2) + \frac{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)\beta^2}{(\delta\omega'_0 + \frac{D'_2}{2} l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}, \text{ 则有 } 0 > 3g^2 X^2 +$$

$4gB'X + A'^2 + B'^2$ , 此时调制不稳定区域的存在相当于对腔内泵浦功率,与泵浦失谐量提出了要求,由于腔内泵浦功率一定要是实数,所以上不等式对应方程的两个实根之间的区域

就是调制不稳定存在的区域。求解这两个实根有  $X_{\pm} = \frac{-2B' \pm \sqrt{B'^2 - 3A'^2}}{3g}$ , 实根存在要求

判别式  $B'^2 - 3A'^2 > 0$ 。即蓝端调制不稳定性就是要求在蓝失谐端泵浦条件下,主微腔以及辅助微腔色散、耦合系数、光强度损耗、模式失谐量能够满足以上条件。

[0065] 如图2所示为在不同失谐量的情况下,主微腔1内能量满足调制不稳定性出现的范围,其中虚线所围区域为传统单微腔结构下的情况,仅有红失谐端(失谐量为正)存在调制

不稳定,实线所围区域为本发明实施例耦合微腔的情况,可以看出蓝失谐端和红失谐端都存在满足调制不稳定性的区域。

[0066] 考虑到色散和光强度损耗通常难以即时调节,但是可以通过调节两个微腔之间的耦合系数和两个微腔的模式失谐量实现对蓝端调制不稳定区域的实时调节。所述微腔光频梳产生装置还包括:调节模块;所述调节模块用于调节所述主微腔1和所述辅助微腔2之间的耦合系数和微腔损耗,以使得主微腔1的模式失谐量、辅助微腔2的模式失谐量以及所述主微腔1和所述辅助微腔2之间的耦合系数满足预设条件。在一具体实施方式中,所述调节模块包括:耦合系数调节单元和模式失谐量调节单元;所述耦合系数调节单元用于调节所述主微腔1和所述辅助微腔2之间的距离,以实现所述主微腔1和所述辅助微腔2之间的耦合系数的调节;所述模式失谐量调节单元用于调节所述主微腔1和/或所述辅助微腔2的等效腔长,以实现所述主微腔1和所述辅助微腔2的模式失谐量的调节。

[0067] 进一步地,所述耦合系数调节单元的调节方式包括但不限于热调节、机械调节、电调节、光调节。热调节通过改变耦合区域温度实现耦合系数调节,机械调节直接改变两个环之间的距离调节耦合系数,电调节利用具有电光效应的材料通过外电信号改变光学特性的方式实现耦合调节,光调节可通过外光场作用与耦合区域改变耦合系数。如图3所示,当所述耦合系数调节单元的调节方式为热调节时,所述耦合系数调节单元包括第一电极41、第二电极42以及第三电极43,所述第一电极41和所述第二电极42与外部电源连接,所述第三电极43覆盖于所述主微腔1和所述辅助微腔2的耦合区域,通过给耦合区域通电加热可以改变主微腔1和辅助微腔2之间的距离,从而调节主微腔1和辅助微腔2之间的耦合系数。如图4所示,当所述耦合系数调节单元的调节方式为机械调节时,所述耦合系数调节单元包括PZT控制器44,所述PZT控制器44包括控制端和移动端,所述PZT控制器44的移动端与辅助微腔2连接,通过PZT控制器44的控制端使移动端进行相应的移动,可以改变主微腔1和辅助微腔2之间的距离,从而调节主微腔1和辅助微腔2之间的耦合系数。

[0068] 进一步地,所述模式失谐量调节单元的调节方式包括但不限于热调节、机械调节、电调节、光调节。如图5所示,当所述模式失谐量调节单元的调节方式为热调节时,所述模式失谐量调节单元包括第四电极45、第五电极46以及第六电极47,所述第四电极45和所述第五电极46与外部电源连接,所述第六电极47覆盖于所述主微腔1或所述辅助微腔2上,所述第六电极47与所述主微腔1或所述辅助微腔2之间设置有覆盖夹层,通过给第六电极47通电加热可以改变主微腔1或辅助微腔2的折射率实现等效腔长的改变,进而调节主微腔1和辅助微腔2的模式失谐量。如图6所示,当所述模式失谐量调节单元的调节方式为电调节时,所述模式失谐量调节单元包括第七电极48和第八电极49,所述第七电极48位于所述主微腔1或所述辅助微腔2外,所述第八电极49位于所述主微腔1或所述辅助微腔2内,通过给第七电极48和第八电极49通电可以改变主微腔1或辅助微腔2的折射率实现等效腔长的改变,进而调节主微腔1和辅助微腔2的模式失谐量。

[0069] 在一具体实施方式中,主微腔1是支持光频率梳产生的载体,需要具有克尔非线性,色散可以为正常色散或反常色散,构成主微腔1的材质包括但不限于氮化硅、铌酸锂、氮化铝、二氧化硅、硅、氮化镓、磷化镓、铝镓砷、硫化砷。对于光波导3其功能是用于泵浦光耦合入主微腔1,以及主微腔1中产生的光频率梳的耦合输出。主微腔1、辅助微腔2以及光波导3的材料并无限制,满足光传输以及色散非线性要求的材料均为可用材料。对于泵浦光源,

可使用连续光泵浦,也可以使用脉冲光泵浦。

[0070] 为了验证本发明实施例提供的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置在蓝失谐端满足调制不稳定性区域可以实现光频率梳的产生,发明人通过数值仿真得到如图7所示的主微腔1和辅助微腔2均为正常色散时的光频率梳光谱图和图8所示的主微腔1和辅助微腔2均为反常色散时的光频率梳光谱图。从图7和图8可以看出,本发明实施例提供的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置确实可以产生光频率梳,且微腔的群速度色散可以为正常色散或反常色散,提升了材料选择和微腔结构设计的灵活性。

[0071] 示例性方法

[0072] 本实施例提供一种上述所述的基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置的微腔光频梳产生方法,如图9中所示,所述方法包括:

[0073] 步骤S100、通过光源产生频率处于泵浦模式的蓝失谐端的泵浦光,并将所述泵浦光发射至光波导;

[0074] 步骤S200、通过所述光波导接收所述光源产生的泵浦光,并将所述泵浦光耦合入所述主微腔,以及输出所述主微腔产生的光频率梳;

[0075] 步骤S300、通过所述主微腔接收所述光波导耦合入的泵浦光,并产生所述光频率梳。

[0076] 由于,微腔中光频率梳的产生依赖于调制不稳定性,本实施例中控制两个微腔之间的耦合系数以及两个微腔的模式失谐量满足预设条件,使得主微腔在泵浦模式的蓝失谐端存在调制不稳定的区域,当需要产生光频率梳时,通过光源产生频率处于泵浦模式的蓝失谐端的泵浦光,并将所述泵浦光发射至光波导,然后通过光波导接收所述光源产生的泵浦光,并通过光波导将泵浦光耦合入所述主微腔,由于主微腔在泵浦模式的蓝失谐端存在调制不稳定的区域,其接收到所述光波导耦合入的泵浦光后可产生光频率梳,最后再通过光波导输出所述主微腔产生的光频率梳。本实施例中由于蓝失谐端泵浦对于热效应导致的微腔谐振峰漂移具有负反馈的效果,提升了整个装置的热稳定性,无需额外增加温控装置,解决了微腔必须为反常色散的限制。

[0077] 在一具体实施方式中,两个微腔之间的耦合系数以及两个微腔的模式失谐量满足的预设条件为: $B'^2 - 3A'^2 > 0$ ,其中,

$$A' = -\frac{\kappa}{2} - \frac{\frac{\kappa'}{2}\beta^2}{(\delta\omega_0' + \frac{D_2'}{2}l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}}, \quad B' = -(\delta\omega_0 + \frac{D_2}{2}l^2) + \frac{(\delta\omega_0' + \frac{D_2'}{2}l^2)\beta^2}{(\delta\omega_0' + \frac{D_2'}{2}l^2)^2 + \frac{\kappa'^2}{4}},$$

$\delta\omega_0$ 代表主微

腔的模式失谐量,0代表泵浦模式, $\delta\omega_0'$ 代表辅助微腔的模式失谐量, $D_2$ 代表主微腔的群速度色散, $D_2'$ 代表辅助微腔的群速度色散, $\kappa$ 代表主微腔的光强度损耗, $\kappa'$ 代表辅助微腔的光强度损耗, $\beta$ 代表主微腔和辅助微腔之间的耦合系数,1代表与泵浦模式对应的初模式的模式序号。

[0078] 在一具体实施方式中,通过所述主微腔接收所述光波导耦合入的泵浦光,并产生所述光频率梳的步骤之前包括:调节所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数,以使得所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数满足预设条件。

所述耦合系数和所述模式失谐量的调节方法包括但不限于热调节、机械调节、电调节和光调节中的一种或多种。

[0079] 综上所述,本发明公开了一种基于蓝失谐连续光泵浦的微腔光频梳产生装置及方法,包括:光源、主微腔、辅助微腔以及光波导;其中,所述主微腔同时与所述辅助微腔和所述光波导存在线性耦合,所述主微腔具有克尔非线性,所述辅助微腔的克尔非线性系数小于所述主微腔的克尔非线性系数的万分之一,所述主微腔的模式失谐量、所述辅助微腔的模式失谐量以及所述主微腔和所述辅助微腔之间的耦合系数满足预设条件,在所述预设条件下所述主微腔在泵浦模式的蓝失谐端存在调制不稳定的区域;所述光源用于产生频率处于泵浦模式的蓝失谐端的泵浦光;所述光波导用于接收所述光源产生的泵浦光,并将所述泵浦光耦合入所述主微腔,以及输出所述主微腔产生的光频率梳;所述主微腔用于接收所述光波导耦合入的泵浦光,并产生所述光频率梳。本发明的装置利用蓝失谐端泵浦形成光频率梳,由于蓝失谐端泵浦对于热效应导致的微腔谐振峰漂移具有负反馈的效果,提升了整个装置的热稳定性,微腔不受反常色散的限制,提升了材料选择和微腔结构设计的灵活性。

[0080] 应当理解的是,本发明的应用不限于上述的举例,对本领域普通技术人员来说,可以根据上述说明加以改进或变换,所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

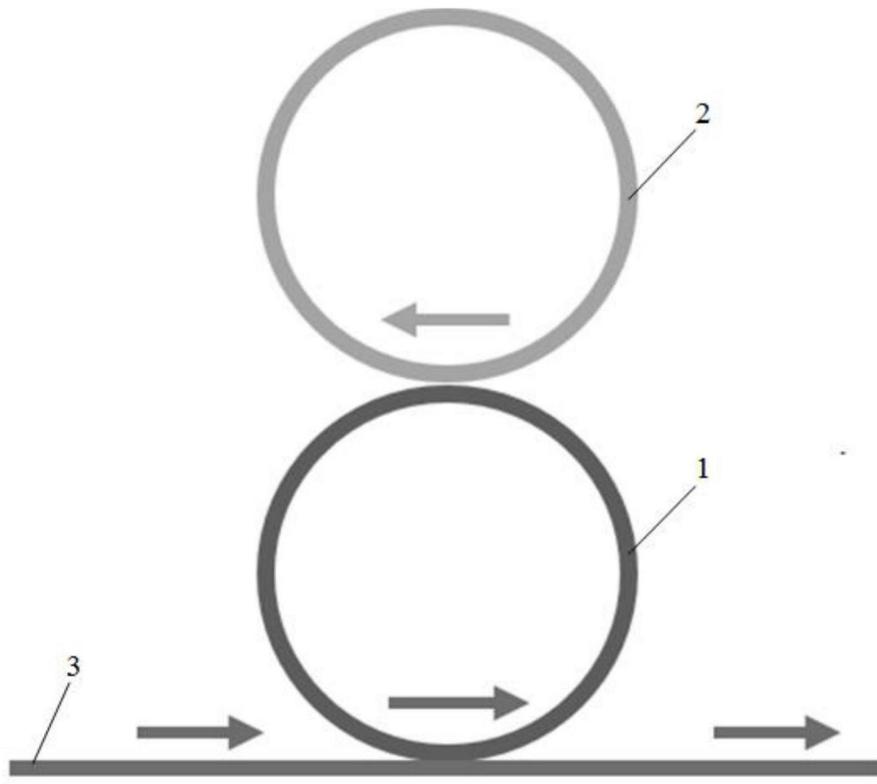


图1

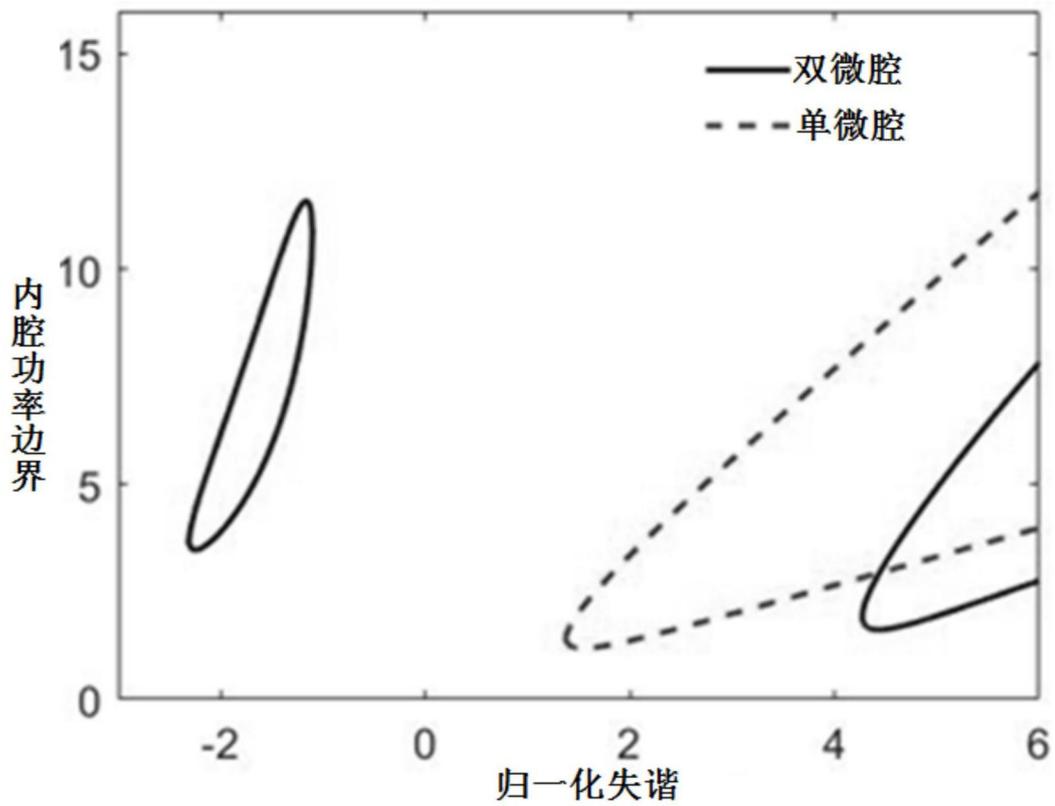


图2

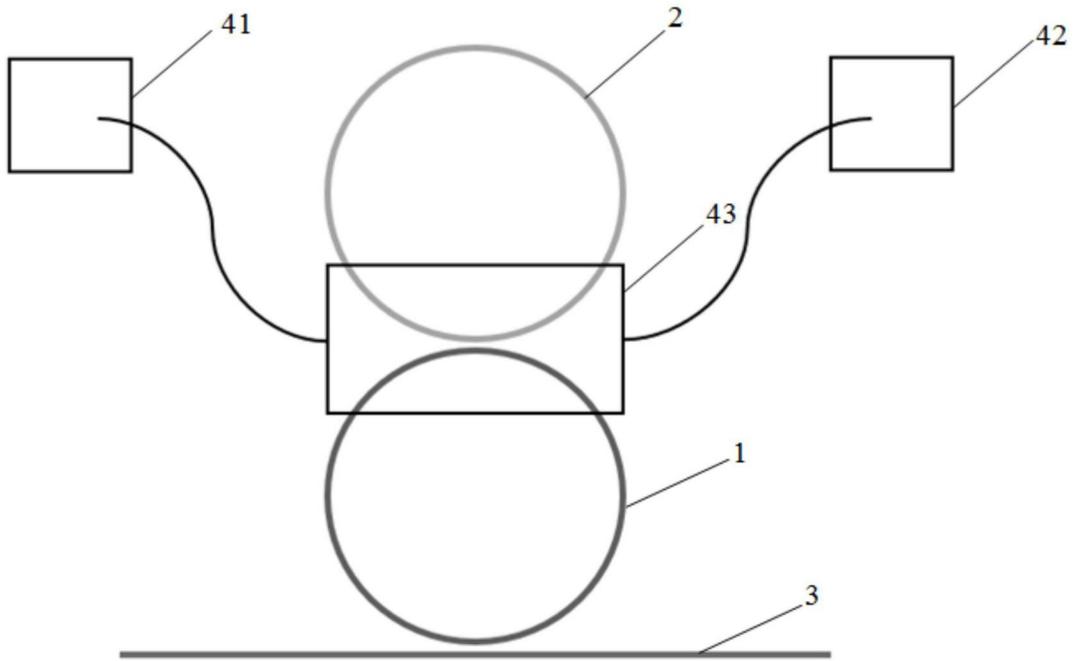


图3

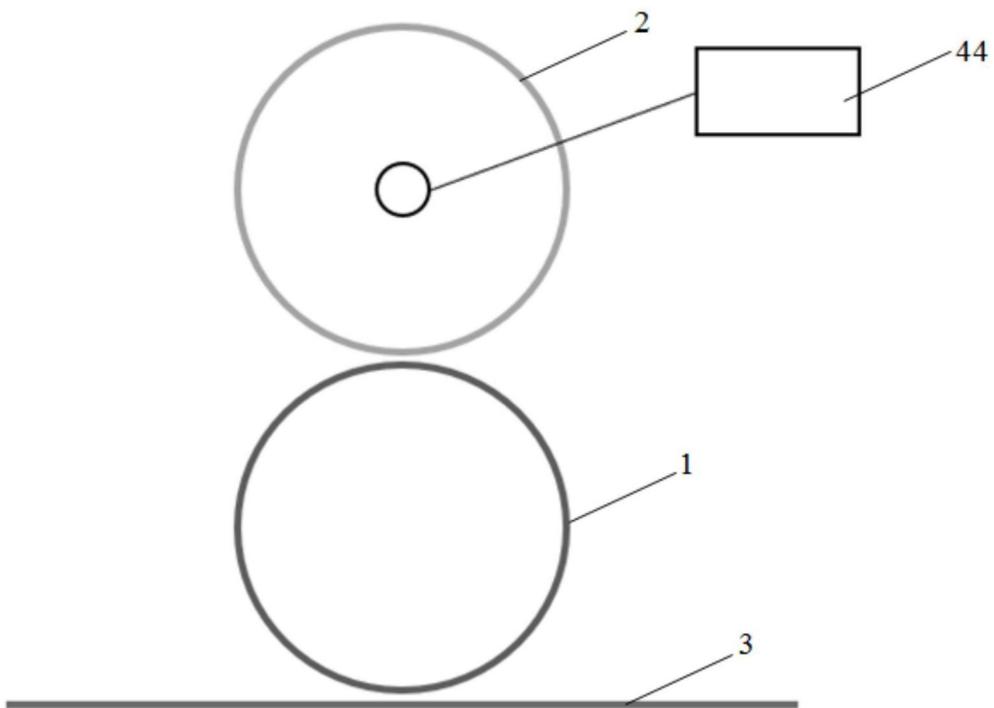


图4

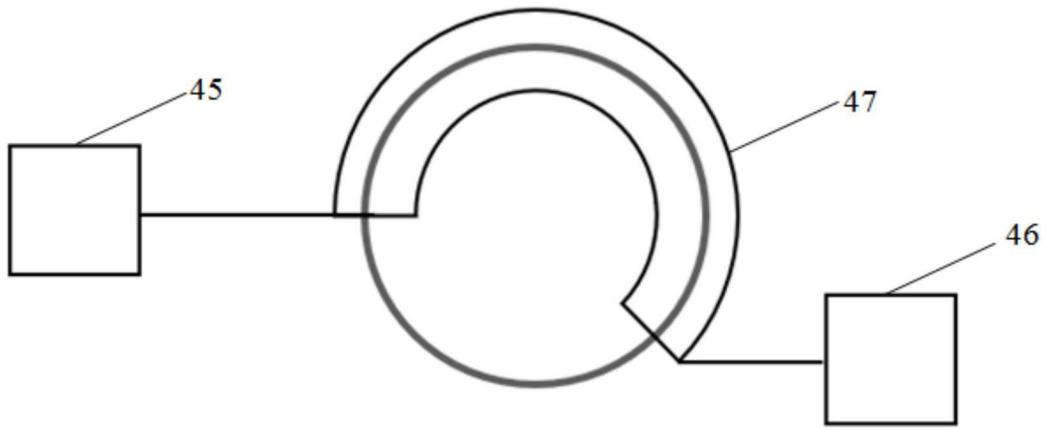


图5

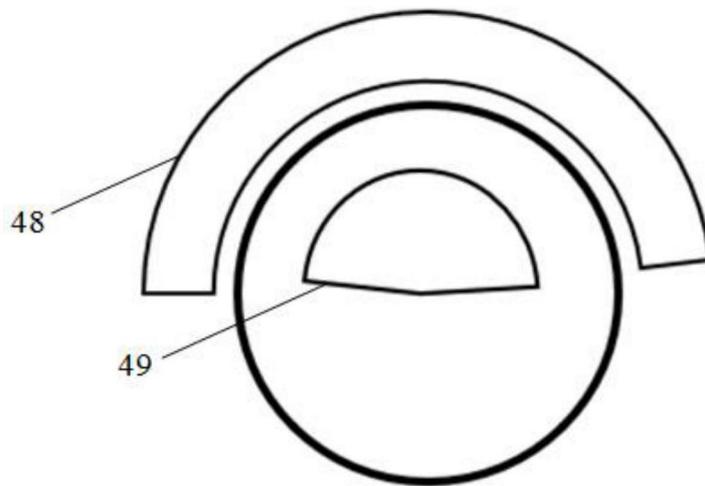


图6

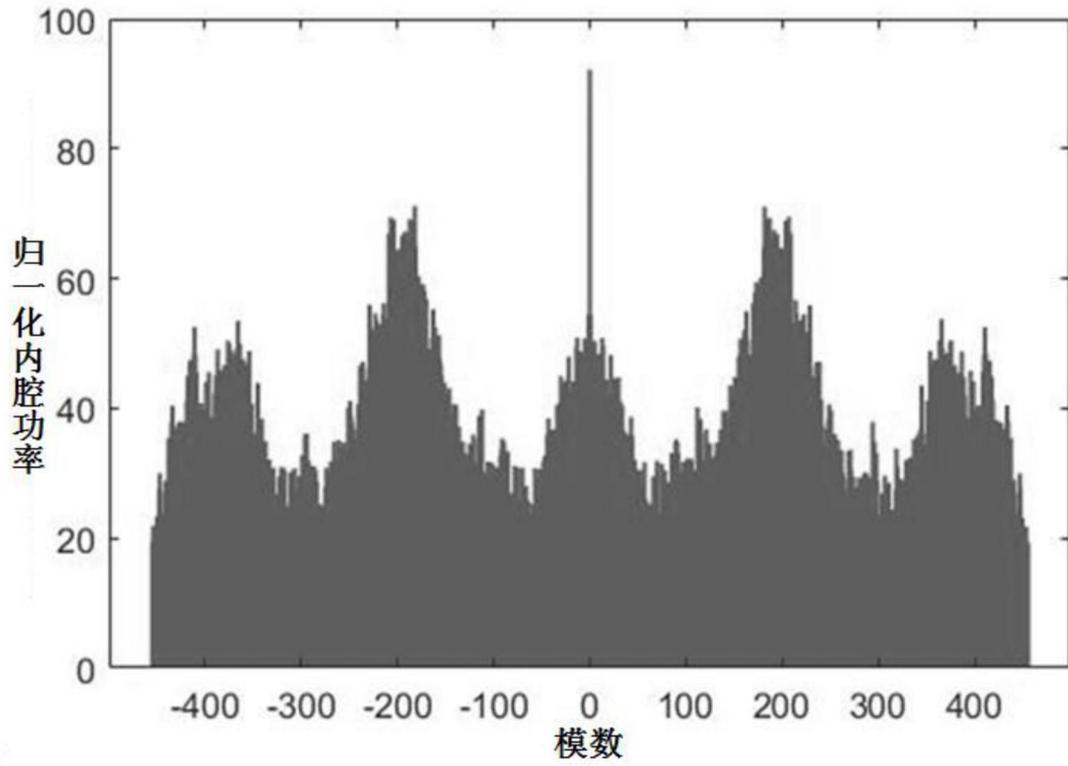


图7

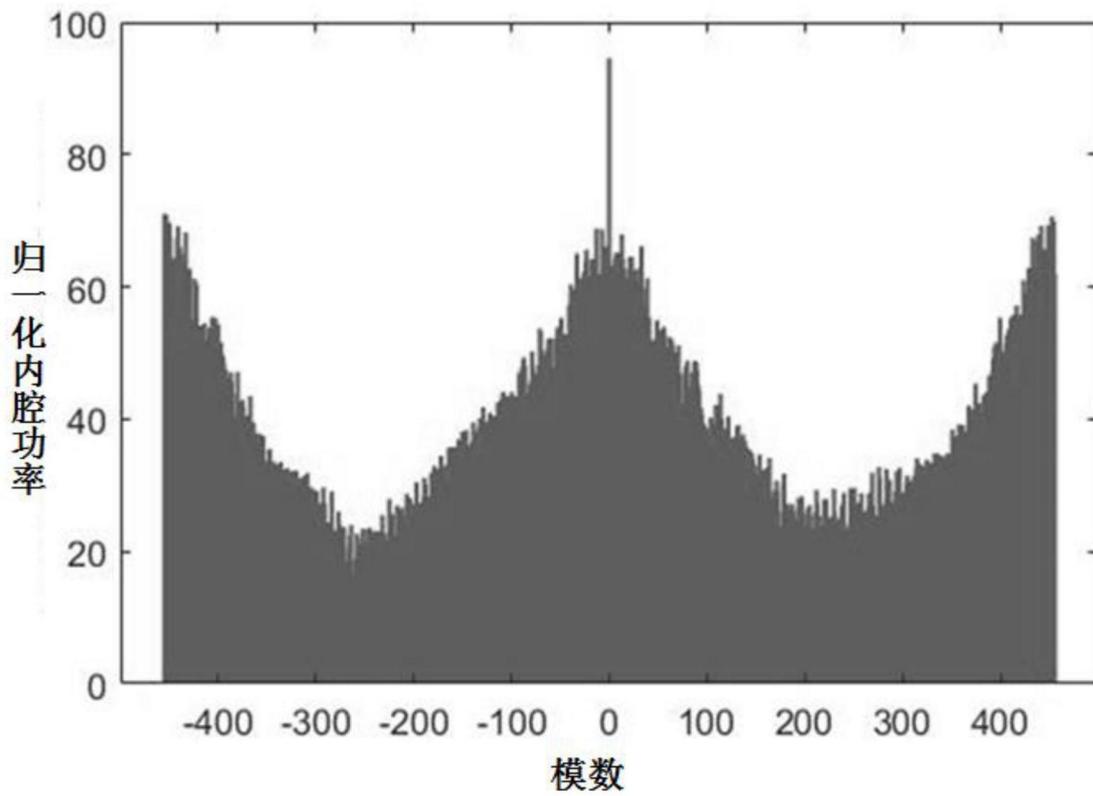


图8

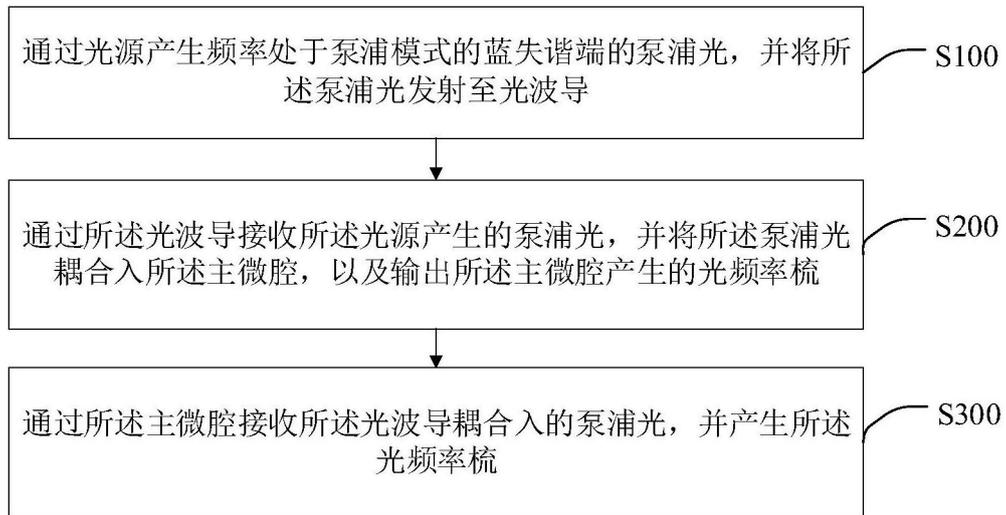


图9