



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112019276 B

(45) 授权公告日 2021.07.27

(21) 申请号 202010669394.5

(22) 申请日 2020.07.13

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112019276 A

(43) 申请公布日 2020.12.01

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院  
地址 518000 广东省深圳市南山区粤海街  
道高新技术产业园南区粤兴一道18号  
香港理工大学产学研大楼205室  
专利权人 香港理工大学

(72) 发明人 黄冬梅 李锋 卫炳江

(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  
代理人 朱阳波

(51) Int. Cl.

H04B 10/50 (2013.01)

H04B 10/524 (2013.01)

H04B 10/54 (2013.01)

H01S 3/067 (2006.01)

H01S 3/10 (2006.01)

H01S 3/11 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109412007 A, 2019.03.01

CN 105576478 A, 2016.05.11

CN 109038191 A, 2018.12.18

CN 110504613 A, 2019.11.26

US 8582619 B2, 2013.11.12

JP 2019114720 A, 2019.07.11

CN 110504613 A, 2019.11.26

Dongmei Huang, etc.. Discrete Fourier domain harmonically mode locked laser by mode hopping modulation.《2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)》. 2019,

李雪. 有理谐波锁模光纤激光器的研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 信息科技辑》. 2013,

许立新等. 锁模光纤激光器在高速光通信中的应用研究.《中国科学技术大学学报》. 2008,

审查员 潘佩琳

权利要求书1页 说明书10页 附图5页

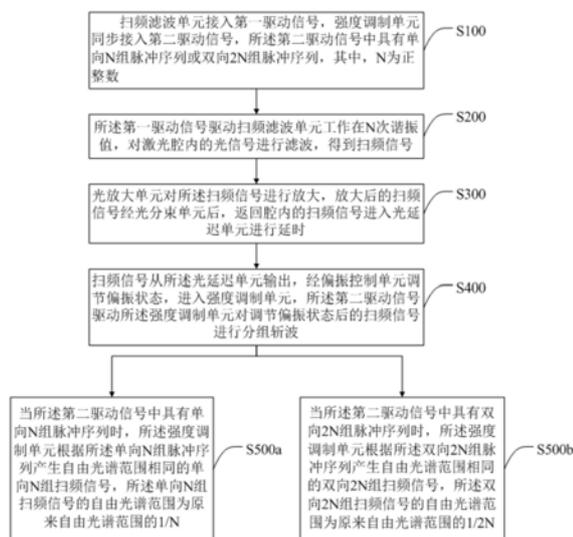
(54) 发明名称

一种分组跳模时域调制方法

(57) 摘要

本发明所提供的一种分组跳模时域调制方法, 包括: 扫频滤波单元接入第一驱动信号, 强度调制单元同步接入第二驱动信号, 第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列或双向2N组脉冲序列; 第一驱动信号驱动扫频滤波单元工作在N次谐振值得到扫频信号; 扫频信号经光放大单元、光分束单元、光延迟单元、偏振控制单元后进入强度调制单元, 第二驱动信号驱动强度调制单元对调节偏振状态后的扫频信号进行分组斩波; 强度调制单元产生自由光谱范围相同的单向N组扫频信号或双向2N组扫频信号, 自由光谱范围变为原来的1/N或1/2N。本发明获得了较小的自由光范围,

同时将傅里叶锁模激光器的扫频速度提高N倍。



1. 一种分组跳模时域调制方法,应用于傅里叶锁模激光器,其特征在于,所述傅里叶锁模激光器包括:通过光纤连接构成光回路的扫频滤波单元、光放大单元、光分束单元、光延迟单元、偏振控制单元和强度调制单元;

所述分组跳模时域调制方法包括:

扫频滤波单元接入第一驱动信号,强度调制单元同步接入第二驱动信号,所述第二驱动信号中具有双向 $2N$ 组脉冲序列,其中, $N$ 为正整数;

所述第一驱动信号驱动扫频滤波单元工作在 $N$ 次谐振值,对激光腔内的光信号进行滤波,得到扫频信号;

光放大单元对所述扫频信号进行放大,放大后的扫频信号经光分束单元后,返回腔内的扫频信号进入光延迟单元进行延时;

扫频信号从所述光延迟单元输出,经偏振控制单元调节偏振状态,进入强度调制单元,所述第二驱动信号驱动所述强度调制单元对调节偏振状态后的扫频信号进行分组斩波;

所述强度调制单元根据所述双向 $2N$ 组脉冲序列产生自由光谱范围相同的双向 $2N$ 组扫频信号,所述双向 $2N$ 组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/2N$ ;

所述双向 $2N$ 组脉冲序列为双向非等间隔扫频时间序列;所述双向 $2N$ 组脉冲序列包括 $N$ 组前向脉冲序列和 $N$ 组后向脉冲序列;

所述强度调制单元根据所述 $N$ 组前向脉冲序列和 $N$ 组后向脉冲序列产生自由光谱范围相同的前向 $N$ 组扫频信号和后向 $N$ 组扫频信号,所述前向 $N$ 组扫频信号和后向 $N$ 组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/2N$ 。

2. 根据权利要求1所述的分组跳模时域调制方法,其特征在于,所述第一驱动信号的重复频率为腔基频的 $N$ 倍。

3. 根据权利要求1所述的分组跳模时域调制方法,其特征在于,所述扫频滤波单元接入第一驱动信号,强度调制单元同步接入第二驱动信号的步骤之前还包括:

信号发生单元产生第一驱动信号和第二驱动信号;

所述第一驱动信号为正弦信号,用于驱动扫频滤波器;所述第二驱动信号为双向 $2N$ 组脉冲序列,用于驱动强度调制单元对扫频信号进行分组斩波。

4. 根据权利要求3所述的分组跳模时域调制方法,其特征在于,所述信号发生单元产生第一驱动信号和第二驱动信号的步骤之前还包括:

时钟单元产生时钟信号,信号发生单元通过所述时钟信号触发产生第一驱动信号和第二驱动信号。

5. 一种存储介质,其特征在于,所述存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序能够被执行以用于实现如权利要求1-4任意一项所述的分组跳模时域调制方法的步骤。

## 一种分组跳模时域调制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及激光器技术领域,尤其涉及的是一种分组跳模时域调制方法。

### 背景技术

[0002] 傅里叶锁模激光技术是实现高速扫频激光光源的重要技术方案,在光学相干成像系统、光传感、光通信、光谱测量等领域都具有潜在的应用。在激光腔中加一段长光纤作为延迟线使每个波长在腔内循环一周再次到达扫频滤波器时,刚好滤波器调谐到这个波长使其通过。因此,每个波长无需从噪声重建,扫频速度不受限于激光振荡建立的时间而仅受限于滤波器的调谐速度。

[0003] 由于傅里叶锁模激光器的谐振腔的色散、非线性,光放大器的噪声、线宽增益因子引起的频率偏移、滤波器的线宽、调制频率失谐等因素的综合作用,使得信号很快变得不稳定,并且各个频率分量之间也没有建立强关联性,相干性较差。在腔内插入梳状滤波器可以将扫频信号在光谱上分割为数个小段,这种离散方法可以在一定程度上提高信号的相干性。但是高精细度的梳状滤波器成本高,而且一旦做好将无法进行任何调整,灵活性很差。

[0004] 在激光器中插入调制器,利用时域调制的方法可以解决梳状滤波器灵活性差的问题。利用时域调制可以在光谱域上产生自由光谱范围可调的离散扫频信号,较小的自由光谱范围在光学层析成像中能够获得较大的成像范围,受限于超短脉冲信号的产生,以及傅里叶变换极限的限制(当调制脉冲很短时,会展宽频谱,使得相邻脉冲的光谱重叠,降低光谱分辨能力),单独使用时域调制的方法很难获得非常小的自由光范围。

[0005] 因此,现有技术存在缺陷,有待改进与发展。

### 发明内容

[0006] 本发明要解决的技术问题在于,针对现有技术的上述缺陷,提供一种分组跳模时域调制方法,旨在解决现有技术中利用时域调制的方法很难获得非常小的自由光范围的问题。

[0007] 本发明解决技术问题所采用的技术方案如下:

[0008] 一种分组跳模时域调制方法,应用于傅里叶锁模激光器,其中,所述傅里叶锁模激光器包括:通过光纤连接构成光回路的扫频滤波单元、光放大单元、光分束单元、光延迟单元、偏振控制单元和强度调制单元;

[0009] 所述分组跳模时域调制方法包括:

[0010] 扫频滤波单元接入第一驱动信号,强度调制单元同步接入第二驱动信号,所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列或双向2N组脉冲序列,其中,N为正整数;

[0011] 所述第一驱动信号驱动扫频滤波单元工作在N次谐振值,对激光腔内的光信号进行滤波,得到扫频信号;

[0012] 光放大单元对所述扫频信号进行放大,放大后的扫频信号经光分束单元后,返回腔内的扫频信号进入光延迟单元进行延时;

[0013] 扫频信号从所述光延迟单元输出,经偏振控制单元调节偏振状态,进入强度调制单元,所述第二驱动信号驱动所述强度调制单元对调节偏振状态后的扫频信号进行分组斩波;

[0014] 当所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列时,所述强度调制单元根据所述单向N组脉冲序列产生自由光谱范围相同的单向N组扫频信号,所述单向N组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/N$ ;

[0015] 当所述第二驱动信号中具有双向2N组脉冲序列时,所述强度调制单元根据所述双向2N组脉冲序列产生自由光谱范围相同的双向2N组扫频信号,所述双向2N组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/2N$ 。

[0016] 进一步地,所述单向N组脉冲序列为单向非等间隔扫频时间序列,第 $n+1$ 组脉冲序列相对于第 $n$ 组脉冲序列具有对应于特定频移的时间偏移。

[0017] 进一步地,所述双向2N组脉冲序列为双向非等间隔扫频时间序列;所述双向2N组脉冲序列包括N组前向脉冲序列和N组后向脉冲序列。

[0018] 进一步地,所述强度调制单元根据所述N组前向脉冲序列和N组后向脉冲序列产生自由光谱范围相同的前向N组扫频信号和后向N组扫频信号,所述前向N组扫频信号和后向N组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/2N$ 。

[0019] 进一步地,所述第一驱动信号的重复频率为腔基频的N倍。

[0020] 进一步地,所述扫频滤波单元接入第一驱动信号,强度调制单元同步接入第二驱动信号的步骤之前还包括:

[0021] 信号发生单元产生第一驱动信号和第二驱动信号;

[0022] 所述第一驱动信号为正弦信号,用于驱动扫频滤波器;所述第二驱动信号为单向N组脉冲序列或双向2N组脉冲序列,用于驱动强度调制单元对扫频信号进行分组斩波。

[0023] 进一步地,所述信号发生单元产生第一驱动信号和第二驱动信号的步骤之前还包括:

[0024] 时钟单元产生时钟信号,信号发生单元通过所述时钟信号触发产生第一驱动信号和第二驱动信号。

[0025] 本发明提供一种傅里叶锁模激光器,其中,包括通过光纤连接构成光回路的扫频滤波单元、光放大单元、光分束单元、光延迟单元、偏振控制单元和强度调制单元;

[0026] 所述扫频滤波单元用于接入第一驱动信号,并受所述第一驱动信号驱动工作在N次谐振值,对激光腔内的光信号进行滤波,得到扫频信号;

[0027] 所述强度调制单元用于同步接入第二驱动信号,所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列或双向2N组脉冲序列,其中,N为正整数;

[0028] 所述光放大单元用于对扫频信号进行放大;

[0029] 所述光分束单元用于对扫频信号进行不同比例的分束;

[0030] 所述光延迟单元用于对返回腔内的扫频信号进行延时;

[0031] 所述偏振控制单元用于对扫频信号调节偏振状态;

[0032] 所述强度调制单元还用于受所述第二驱动信号驱动,对调节偏振状态后的扫频信号进行分组斩波;

[0033] 当所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列时,所述强度调制单元用于根据所

述单向N组脉冲序列产生自由光谱范围相同的单向N组扫频信号,所述单向N组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/N$ ;

[0034] 当所述第二驱动信号中具有双向 $2N$ 组脉冲序列时,所述强度调制单元用于根据所述双向 $2N$ 组脉冲序列产生自由光谱范围相同的双向 $2N$ 组扫频信号,所述双向 $2N$ 组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/2N$ 。

[0035] 进一步地,所述傅里叶锁模激光器还包括:分别与所述扫频滤波单元和所述强度调制单元电连接的信号发生单元,所述信号发生单元用于产生第一驱动信号和第二驱动信号。

[0036] 本发明提供一种存储介质,其中,所述存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序能够被执行以用于实现如上所述的分组跳模时域调制方法的步骤。

[0037] 本发明所提供的一种分组跳模时域调制方法,所述傅里叶锁模激光器包括:通过光纤连接构成光回路的扫频滤波单元、光放大单元、光分束单元、光延迟单元、偏振控制单元和强度调制单元;所述分组跳模时域调制方法包括:扫频滤波单元接入第一驱动信号,强度调制单元同步接入第二驱动信号,所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列或双向 $2N$ 组脉冲序列,其中,N为正整数;所述第一驱动信号驱动扫频滤波单元工作在N次谐振值,对激光腔内的光信号进行滤波,得到扫频信号;光放大单元对所述扫频信号进行放大,放大后的扫频信号经光分束单元后,返回腔内的扫频信号进入光延迟单元进行延时;扫频信号从所述光延迟单元输出,经偏振控制单元调节偏振状态,进入强度调制单元,所述第二驱动信号驱动所述强度调制单元对调节偏振状态后的扫频信号进行分组斩波;当所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列时,所述强度调制单元根据所述单向N组脉冲序列产生自由光谱范围相同的单向N组扫频信号,所述单向N组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/N$ ;当所述第二驱动信号中具有双向 $2N$ 组脉冲序列时,所述强度调制单元根据所述双向 $2N$ 组脉冲序列产生自由光谱范围相同的双向 $2N$ 组扫频信号,所述双向 $2N$ 组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/2N$ 。本发明通过对强度调制单元施加单向N组脉冲序列或双向 $2N$ 组脉冲序列对应的离散信号,将自由光谱范围将为原来的 $1/N$ 或 $1/2N$ ,获得了较小的自由光范围,同时将傅里叶锁模激光器的扫频速度提高N倍。

## 附图说明

[0038] 图1是本发明中分组跳模时域调制方法较佳实施例的流程图。

[0039] 图2是本发明中傅里叶锁模激光器较佳实施例的功能原理框图。

[0040] 图3是基于分组跳模时域调制的单向扫频傅里叶锁模激光器的原理。

[0041] 图4是基于分组跳模时域调制的双向扫频傅里叶锁模激光器的原理。

[0042] 图5是加载在调制器的单向三组离散的扫频脉冲序列。

[0043] 图6是加载在调制器的双向六组离散的扫频脉冲序列。

[0044] 图7是光谱仪上观察到的基于单向三组离散化扫频序列驱动的激光器输出光谱。

[0045] 图8是高速示波器上基于单向三组离散化扫频序列驱动的激光器输出时域谱。

## 具体实施方式

[0046] 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。

[0047] 为了获得较小的自由光谱范围,需要增加调制脉冲的个数。对于一个固定时间周期,当脉冲数量增加时,为了避免相邻脉冲不重叠,则需要缩短脉冲宽度。当脉冲宽度缩小到百皮秒量级甚至皮秒量级时,很难通过信号发生器产生。

[0048] 时域调制对扫频信号进行光谱离散化,是基于信号的扫频特性。当信号的波长与时间成一定函数关系时,通过斩波选出某些时刻点的光信号,也就等效选出了某些特定光波长上的信号,与采用对等的滤波器达到的效果相当。

[0049] 因此,本发明提供一种结合时域调制方法和分组跳模技术实现N次谐波锁模的离散傅里叶锁模激光器,主要解决傅里叶锁模激光器很难得到较小自由光谱范围的问题,同时解决采用梳状滤波器的傅里叶锁模激光器灵活性差不可调谐的问题,还可以将扫描频率提高N倍。

[0050] 请参见图1,图1是本发明中分组跳模时域调制方法的流程图。如图1所示,本发明实施例所述的分组跳模时域调制方法包括以下步骤:

[0051] S100、扫频滤波单元接入第一驱动信号,强度调制单元同步接入第二驱动信号,所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列或双向2N组脉冲序列,其中,N为正整数。

[0052] 在一种实现方式中,所述步骤S100之前还包括:信号发生单元产生第一驱动信号和第二驱动信号。所述第一驱动信号为正弦信号,用于驱动扫频滤波器;所述第二驱动信号为单向N组脉冲序列或双向2N组脉冲序列,用于驱动强度调制单元对扫频信号进行分组斩波。

[0053] 所述信号发生单元产生第一驱动信号和第二驱动信号的步骤之前还包括:时钟单元产生时钟信号,信号发生单元通过所述时钟信号触发产生第一驱动信号和第二驱动信号。

[0054] S200、所述第一驱动信号驱动扫频滤波单元工作在N次谐振值,对激光腔内的光信号进行滤波,得到扫频信号。

[0055] S300、光放大单元对所述扫频信号进行放大,放大后的扫频信号经光分束单元后,返回腔内的扫频信号进入光延迟单元进行延时。

[0056] 所述扫频滤波单元和光放大单元之间设置有第一光隔离单元,所述光放大单元和光分束单元之间设置有第二光隔离单元,以保证扫频信号的单方向传输。

[0057] S400、扫频信号从所述光延迟单元输出,经偏振控制单元调节偏振状态,进入强度调制单元,所述第二驱动信号驱动所述强度调制单元对调节偏振状态后的扫频信号进行分组斩波。

[0058] S500a、当所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列时,所述强度调制单元根据所述单向N组脉冲序列产生自由光谱范围相同的单向N组扫频信号,所述单向N组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/N$ 。

[0059] 也就是说,N组自由光谱范围相同的扫频信号组合成新的离散扫频信号,且自由光谱范围变为原来自由光谱范围的 $1/N$ 。

[0060] S500b、当所述第二驱动信号中具有双向2N组脉冲序列时,所述强度调制单元根据所述双向2N组脉冲序列产生自由光谱范围相同的双向2N组扫频信号,所述双向2N组扫频信

号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/2N$ 。

[0061] 也就是说,  $2N$ 组自由光谱范围相同的扫频信号组合成新的离散扫频信号, 且自由光谱范围变为原来自由光谱范围的 $1/2N$ 。

[0062] 请参阅图2, 本发明的激光器包括通过光纤连接构成光回路的扫频滤波单元30、光放大单元50、光分束单元70、光延迟单元80、偏振控制单元90和强度调制单元100。并且, 时钟单元10产生时钟信号, 信号发生单元20通过所述时钟信号触发产生第一驱动信号和第二驱动信号; 扫频滤波单元30和光放大单元50之间设置有第一光隔离单元40, 光放大单元50和光分束单元70之间设置有第二光隔离单元60。具体的, 扫频滤波单元30为扫频滤波器(SF), 强度调制单元100为光强度调制器(MOD), 光放大单元50为光放大器(OA), 光分束单元70为光分束器(BS), 光延迟单元80为光纤延迟线(Delay), 第一光隔离单元40和第二光隔离单元60均为光隔离器(ISO), 偏振控制单元90为偏振控制器(PC), 信号发生单元20为信号发生器(SG), 时钟单元10为时钟(CLK)。

[0063] 光放大器(OA)为激光器提供增益, 可以是半导体光放大器, 掺杂光纤放大器, 喇曼放大器, 参量放大器等。光隔离器(ISO)是保证光信号沿单一方向传播, 隔离反向散射光对系统的干扰, 可以使光纤隔离器或者是自由空间型的隔离器。光分束器(BS)对光信号进行不同比例的分束, 可以是基于光纤熔锥、波导分束等机制的光纤分束器或者是自由空间光分束器。光纤延迟线(Delay)用于将光信号进行延迟, 可以用普通单模或多模光纤, 也可以用色散位移、色散补偿等特种光纤或其组合, 其可以单次单向传播, 或者结合光环形器及反射器件如全反射光纤环、反射镜、法拉第旋光反射镜等器件实现双向传播延迟。偏振控制器(PC)调节腔内的偏振态使偏振敏感器件如光调制器、半导体光放大器等在系统所要求的最佳状态工作, 可以是基于三环型、双环形、挤压型等不同类型的光纤在线偏振控制器或者是由多个玻片组成的自由空间偏振控制器。光强度调制器(MOD)用来实现对光信号的强度或幅度调制, 可以是基于铌酸锂或其他电光材料的马赫增德尔电光调制器, 或者是半导体电吸收调制器, 微机械光开关等不同类型的光调制器。扫频滤波器(SF)可以是基于扫描透镜与光栅配合, 压电陶瓷控制的机械式或者集成式的扫频滤波器, 通过周期性的信号控制滤波器的透射波长对光信号进行窄带滤波。信号发生器(SG)用来产生扫频滤波器SF和光强度调制器(MOD)所需的驱动电信号, 驱动SF扫频滤波器对光信号进行动态滤波, 并驱动光强度调制器(MOD)实现分组跳模的离散输出。时钟(CLK)产生触发信号驱动信号发生器SG。

[0064] 傅里叶锁模激光器的构成方式为环形, 光器件的连接顺序可以不同, 光放大器(OA)、光隔离器(ISO)、光分束器(BS)、偏振控制器(PC)、光延迟线(Delay)、扫频滤波器(SF)和光强度调制器(MOD)为腔内必需器件。信号发生器SG产生的周期性信号驱动扫频滤波器(SF), 信号发生器SG产生的非等间隔的时间脉冲序列驱动光强度调制器(MOD)实现自由光谱范围相同的分组离散的频谱。

[0065] 本发明将基于时域调制的方法, 通过给强度调制单元分组施加非等间隔的时间脉冲序列, 在频率上实现自由光谱范围相同的分组离散的傅里叶锁模激光器。

[0066] 傅里叶锁模激光器可调制单向扫频信号和双向扫频信号。

[0067] 在调制单向扫频信号时, 所述单向 $N$ 组脉冲序列为单向非等间隔扫频时间序列, 并且, 第 $n+1$ 组脉冲序列相对于第 $n$ 组脉冲序列具有对应于特定频移的时间偏移。

[0068] 具体的, 在调制单向扫频信号时, 请参阅图3, 图3以傅里叶锁模激光器工作在三次

谐波锁模状态且只调制单向的扫频信号为例,即以单向三组非等间隔的扫频时间序列为例进行说明。傅里叶锁模激光器的基频周期为 $T$ ,加载在扫频滤波单元的周期为 $T/3$ 。三个分组脉冲序列以 $T$ 的周期施加在强度调制单元上,三组脉冲序列以 $T/3$ 为周期垂直对齐排列。在每个周期中 $T/3$ 时间内,一个分组的脉冲序列将在频域中产生具有一个特定自由光谱范围(FSR)(例如300GHz)的均匀离散扫描信号。为了实现模式跳变,与第一脉冲序列相比,第二脉冲序列具有对应于一个特定频移(例如100GHz)的时间偏移。与第二脉冲序列相比,第三脉冲序列也具有相同的时间偏移。

[0069] 这样,通过分组跳模技术的离散傅里叶锁模激光器将在频域中产生自由光谱范围(FSR)均匀分布的扫频信号。因此,基于分组跳模时域调制的三次谐波傅里叶锁模激光器的自由光谱范围则由原来的300GHz降为100GHz( $300\text{GHz}/3=100\text{GHz}$ ),同时扫描速率增加三倍。依此类推,若想要将离散傅里叶锁模激光器的自由光谱范围降为原来的 $1/N$ ,则可以使傅里叶锁模激光器处于 $N$ 次谐波锁模状态,同时通过产生相应的单向脉冲序列间隔和时间偏移来实现。

[0070] 在调制双向扫频信号时,所述双向 $2N$ 组脉冲序列为双向非等间隔扫频时间序列;所述双向 $2N$ 组脉冲序列包括 $N$ 组前向脉冲序列和 $N$ 组后向脉冲序列。所述强度调制单元根据所述 $N$ 组前向脉冲序列和 $N$ 组后向脉冲序列产生自由光谱范围相同的前向 $N$ 组扫频信号和后向 $N$ 组扫频信号,所述前向 $N$ 组扫频信号和后向 $N$ 组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/2N$ 。

[0071] 具体的,基于分组跳模时域调制的傅里叶锁模激光器还可以拓展到调制双向的扫频信号,请参阅图4,以双向六组非等间隔的扫频时间序列为例进行说明。相比于调制单向扫频信号,将原来另一个方向置零的扫频信号重新加载调制脉冲实现双向扫频信号的离散。双向的扫频信号是由前向和后向两个方向的三个分组脉冲序列构成,每个方向(前向或后向)的三组脉冲信号与调制单向扫频信号的原理是一样的,每一组自由光谱范围为300GHz,每个方向(前向或后向)的三组脉冲信号序列将自由光谱范围降为100GHz( $300\text{GHz}/3$ )。双向扫频设计与单向扫频设计的区别是,前向和后向脉冲设计的起始点对应于频率间隔( $300\text{GHz}/6=50\text{GHz}$ )应该为单独每组脉冲序列自由光谱范围的 $1/6$ 。基于这个原理,组合前向和后向的三个分组扫频信号,离散的傅里叶锁模激光器输出的自由光谱范围(50GHz)能够变为每组设计的自由光谱范围(300GHz)的 $1/6$ 。依此类推,若想要将离散傅里叶锁模激光器的自由光谱范围降为原来的 $1/2N$ ,则可以使傅里叶锁模激光器处于 $N$ 次谐波锁模状态,同时通过产生相应的双向脉冲序列间隔和时间偏移来实现。

[0072] 本发明中傅里叶锁模激光器的工作原理是:激光腔内的光信号经过扫频滤波器后进行波长选择,扫频滤波器的透过波长可通过信号发生器产生的周期性电压信号(即第一驱动信号)进行控制,第一驱动信号的重复频率为腔基频整数( $N$ )倍。经过扫频滤波器的扫频信号传输到光放大器进行放大,然后经过光隔离器保证扫频信号单方向传输,再到光分束器分成两部分,分别输出到腔外和返回腔内。返回腔内的扫频信号进入光纤延迟线,此光纤延迟线的长度设置需要经过特别计算,以保证扫频信号在包含此光延迟线的整个光纤环形腔内的传播时间是扫频滤波器调制周期的整数倍。扫频信号从光纤延迟线输出后,经过偏振控制器调节偏振状态,然后进入光强度调制器。通过控制加载在光强度调制器的分组时间脉冲序列获得自由光谱范围相同的单向 $N$ 组(双向 $2N$ 组)频率点不重合的梳状频谱,也

就是说,每个周期获得一把光学频率梳,共 $N$ 把( $2N$ 把)频率梳,每把频率梳的梳齿是按照 $1/N$ ( $1/2N$ )的梳齿间隔互相错开一点的,所有频率梳重叠起来之后,梳齿的密度可以增加 $N$ 倍( $2N$ 倍)。并且,加载在强度调制单元(光强度调制器)的重复频率为腔基频的整数 $N$ 倍。

[0073] 本发明采用的时域调制技术在时域上对扫频信号进行分组斩波,使其在频率上输出较小自由光谱范围相同的分组扫频信号,并且利用时域调制技术对扫频信号的质量进行提高,相比以前的傅里叶锁模激光器技术,具有以下好处:

[0074] 第一、采用时域调制技术对光信号进行斩波调制,当调制脉冲长度低于某个阈值(典型值 $1\text{ns}$ 左右)时,输出脉冲变得规则有序,信号质量得到极大提高。而这种高质量的扫频脉冲信号,可以极大提高相干层析成像的信噪比。

[0075] 第二、提高了傅里叶锁模激光器的扫频速度,当傅里叶锁模激光器处于 $N$ 次谐波锁模状态时(也就是扫频滤波器的重复频率为腔基频 $N$ 倍),扫频速度具有极大的灵活性,且可以提高为原来的 $N$ 倍。

[0076] 第三、通过时域调制的方法对光强度调制器施加单向分组(双向分组)离散的调制信号,使其在频率上输出自由光谱范围相同的 $N$ 组( $2N$ 组)离散信号,从而将自由光谱范围降为原来的 $1/N$ ( $1/2N$ )。时域调制脉冲只依赖于驱动信号,相比采用固态梳状滤波器的方案,具有极大的灵活性。

[0077] 下面列举具体实施例进行说明。

[0078] 实施例一:

[0079] 基于分组跳模时域调制的单向扫频的傅里叶锁模激光器,以3倍频为例进行说明。由于时域信号的可调谐性远强于梳状滤波器的调谐性能,具有明显的灵活性优势,故通过在激光腔引入光强度调制器(MOD)而非梳状滤波器,来对扫频信号进行分组离散化。

[0080] 基于分组跳模时域调制的单向扫频的傅里叶锁模激光器包括:光放大器(OA),光隔离器(ISO),光分束器(BS),光纤延迟线(Delay),偏振控制器(PC),光强度调制器(MOD),扫频滤波器(SF),信号发生器(SG),时钟(CLK)等部件。请参阅图5,图5是设计加载在光强度调制器的单向三组离散的扫频脉冲序列,通过计算准确设计三组扫频脉冲信号对应的时间序列,使其在频谱上输出自由光谱范围相同的离散信号。

[0081] 激光腔内的光信号经过扫频滤波器后进行波长选择,滤波器的透过波长可通过信号发生器产生的周期性电压信号(第一驱动信号)进行控制,第一驱动信号的重复频率为腔基频的3倍。经过滤波器的扫频信号传输到光放大器(OA)进行放大,然后经过光隔离器保证扫频信号单方向传输,再到光分束器(BS)分成两部分,分别输出到腔外和返回腔内。返回腔内的扫频信号进入光纤延迟线(Delay),此光纤延迟线(Delay)的长度设置需要经过特别计算,以保证扫频信号在包含此光延迟线的整个光纤环形腔内的传播时间是扫频滤波器调制周期的整数倍。扫频信号从光纤延迟线(Delay)输出后,经过偏振控制器(PC)调节偏振状态,然后进入光强度调制器(MOD)。光强度调制器(MOD)由重复频率为腔基频的三组离散的扫频脉冲序列驱动。短脉冲信号的单脉冲长度在 $100\text{ps}$ 至 $100\text{ns}$ 之间。光强度调制器(MOD)在这些短脉冲信号驱动下,将对扫频信号进行斩波,形成波长不同的短脉冲光信号。经过斩波调制的短脉冲光信号将再次进入扫频滤波器(SF),开始下一个循环。上述过程循环反复,从而实现了波长分立的扫频输出。强度调制器(IM)的调制信号由一个时钟信号(CLK)触发信号发生器(SG)产生,时钟信号经过分频后触发AWG产生可调滤波器的调制信号。实验的关键

是根据理论计算找到的合理的工作参数空间,设置与扫频滤波器匹配的单向离散化分组扫频序列使激光器在频谱上输出自由光谱范围相同的扫频信号。另外,三组离散化调制信号与可调滤波器调制信号的同步也是系统设计的关键。

[0082] 实施例二:

[0083] 基于分组跳模时域调制的双向扫频的傅里叶锁模激光器,以3倍频为例。由于时域信号的可调谐性远强于梳状滤波器的调谐性能,具有明显的灵活性优势,除了通过给调制器加单方向的扫频信号实现分组离散的扫频信号,还可以通过给调制器施加正向和反向两个方向的分组离散扫频信号驱动调制器实现自由光谱范围相同的扫频信号输出。如图所示,基于分组跳模时域调制的双向扫频的傅里叶锁模激光器包括:光放大器(OA),光隔离器(ISO),光分束器(BS),光纤延迟线(Delay),偏振控制器(PC),光强度调制器(MOD),扫频滤波器(SF),信号发生器(SG),时钟(CLK)等部件。请参阅图6,图6是设计加载在调制器的双向六组离散的扫频脉冲序列,通过计算准确设计六组扫频脉冲信号对应的时间序列,使其在频谱上输出自由光谱范围相同的离散信号。

[0084] 激光腔内的光信号经过扫频滤波器后进行波长选择,扫频滤波器的透过波长可通过信号发生器产生的周期性电压信号(第一驱动信号)进行控制,第一驱动信号的重复频率为腔基频的3倍。经过滤波器的扫频信号传输到光放大器(OA)进行放大,然后经过隔离器保证扫频信号单方向传输,再到光分束器(BS)分成两部分,分别输出到腔外和返回腔内。返回腔内的信号进入光纤延迟线(Delay),此光纤延迟线(Delay)的长度设置需要经过特别计算,以保证扫频信号在包含此光延迟线的整个光纤环形腔内的传播时间是扫频滤波器调制周期的整数倍。扫频信号从光纤延迟线(Delay)输出后,经过偏振控制器(PC)调节偏振状态,然后进入光强度调制器(MOD)。光强度调制器(MOD)由重复频率为腔基频的六组离散的扫频脉冲序列驱动。短脉冲信号的单脉冲长度在100ps至100ns之间。光强度调制器(MOD)在这些短脉冲信号驱动下,将对扫频信号进行斩波,形成波长不同的短脉冲光信号。经过斩波调制的短脉冲光信号将再次进入扫频滤波器(SF),开始下一个循环。上述过程循环反复,从而实现了波长分立的扫频输出。强度调制器(IM)的调制信号由一个时钟信号(CLK)触发波形发生器(PPG)产生,时钟信号经过分频后触发AWG产生可调滤波器的调制信号。实验的关键是根据理论计算找到的合理的工作参数空间,设置与扫频滤波器匹配的单向离散化分组扫频序列使激光器在频谱上输出自由光谱范围相同的扫频信号。另外,六组离散化调制信号与可调滤波器调制信号的同步也是系统设计的关键。

[0085] 实施例一的实验结果:

[0086] 请参阅图7,图7为光谱仪上观察到的基于单向三组离散化扫频序列驱动的激光器输出光谱。可看出实验得到的扫频范围为17nm。实线代表的是傅里叶锁模激光器工作在基频锁模状态,通过施加一组离散的扫频序列信号给调制器,实现自由光谱范围为2.4nm的扫频输出。当傅里叶锁模激光器工作在三倍频锁模状态,通过施加三组离散的扫频序列给调制器实现分组跳模时域调制,可以得到自由光谱范围为0.8nm的扫频输出,实现了频谱上自由光谱范围更小的扫频输出。自由光谱范围可以通过设计扫频序列间隔实现灵活调节。

[0087] 请参阅图8,图8为高速示波器上基于单向三组离散化扫频序列驱动的激光器输出时域谱,可看出实验得到的扫频光源的扫频频率为142.935kHz。图8上面表格的实线和下面表格的实线分别对应傅里叶锁模激光器工作在基频和三倍频模式的扫频输出信号。可以观

察到,基于分组跳模时域调制的傅里叶锁模激光器输出的时域信号质量较好,高频噪声小。

[0088] 本发明还提供了一种傅里叶锁模激光器,其中,包括通过光纤连接构成光回路的扫频滤波单元、光放大单元、光分束单元、光延迟单元、偏振控制单元和强度调制单元;

[0089] 所述扫频滤波单元用于接入第一驱动信号,并受所述第一驱动信号驱动工作在N次谐振值,对激光腔内的光信号进行滤波,得到扫频信号;

[0090] 所述强度调制单元用于同步接入第二驱动信号,所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列或双向2N组脉冲序列,其中,N为正整数;

[0091] 所述光放大单元用于对扫频信号进行放大;

[0092] 所述光分束单元用于对扫频信号进行不同比例的分束;

[0093] 所述光延迟单元用于对返回腔内的扫频信号进行延时;

[0094] 所述偏振控制单元用于对扫频信号调节偏振状态;

[0095] 所述强度调制单元还用于受所述第二驱动信号驱动,对调节偏振状态后的扫频信号进行分组斩波;

[0096] 当所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列时,所述强度调制单元用于根据所述单向N组脉冲序列产生自由光谱范围相同的单向N组扫频信号,所述单向N组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/N$ ;

[0097] 当所述第二驱动信号中具有双向2N组脉冲序列时,所述强度调制单元用于根据所述双向2N组脉冲序列产生自由光谱范围相同的双向2N组扫频信号,所述双向2N组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/2N$ ;具体如上所述。

[0098] 进一步地,所述傅里叶锁模激光器还包括:分别与所述扫频滤波单元和所述强度调制单元电连接的信号发生单元,所述信号发生单元用于产生第一驱动信号和第二驱动信号;具体如上所述。

[0099] 本发明还提供了一种存储介质,其中,所述存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序能够被执行以用于实现如上所述的分组跳模时域调制方法的步骤;具体如上所述。

[0100] 综上所述,本发明公开的一种分组跳模时域调制方法,所述傅里叶锁模激光器包括:通过光纤连接构成光回路的扫频滤波单元、光放大单元、光分束单元、光延迟单元、偏振控制单元和强度调制单元;所述分组跳模时域调制方法包括:扫频滤波单元接入第一驱动信号,强度调制单元同步接入第二驱动信号,所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列或双向2N组脉冲序列,其中,N为正整数;所述第一驱动信号驱动扫频滤波单元工作在N次谐振值,对激光腔内的光信号进行滤波,得到扫频信号;光放大单元对所述扫频信号进行放大,放大后的扫频信号经光分束单元后,返回腔内的扫频信号进入光延迟单元进行延时;扫频信号从所述光延迟单元输出,经偏振控制单元调节偏振状态,进入强度调制单元,所述第二驱动信号驱动所述强度调制单元对调节偏振状态后的扫频信号进行分组斩波;当所述第二驱动信号中具有单向N组脉冲序列时,所述强度调制单元根据所述单向N组脉冲序列产生自由光谱范围相同的单向N组扫频信号,所述单向N组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/N$ ;当所述第二驱动信号中具有双向2N组脉冲序列时,所述强度调制单元根据所述双向2N组脉冲序列产生自由光谱范围相同的双向2N组扫频信号,所述双向2N组扫频信号的自由光谱范围为原来自由光谱范围的 $1/2N$ 。本发明通过对强度调制单元施加单向N组脉冲序列或双向2N组脉冲序列对应的离散信号,将自由光谱范围将为原来的 $1/N$ 或 $1/2N$ ,获得

了较小的自由光范围,同时将傅里叶锁模激光器的扫频速度提高N倍。

[0101] 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。

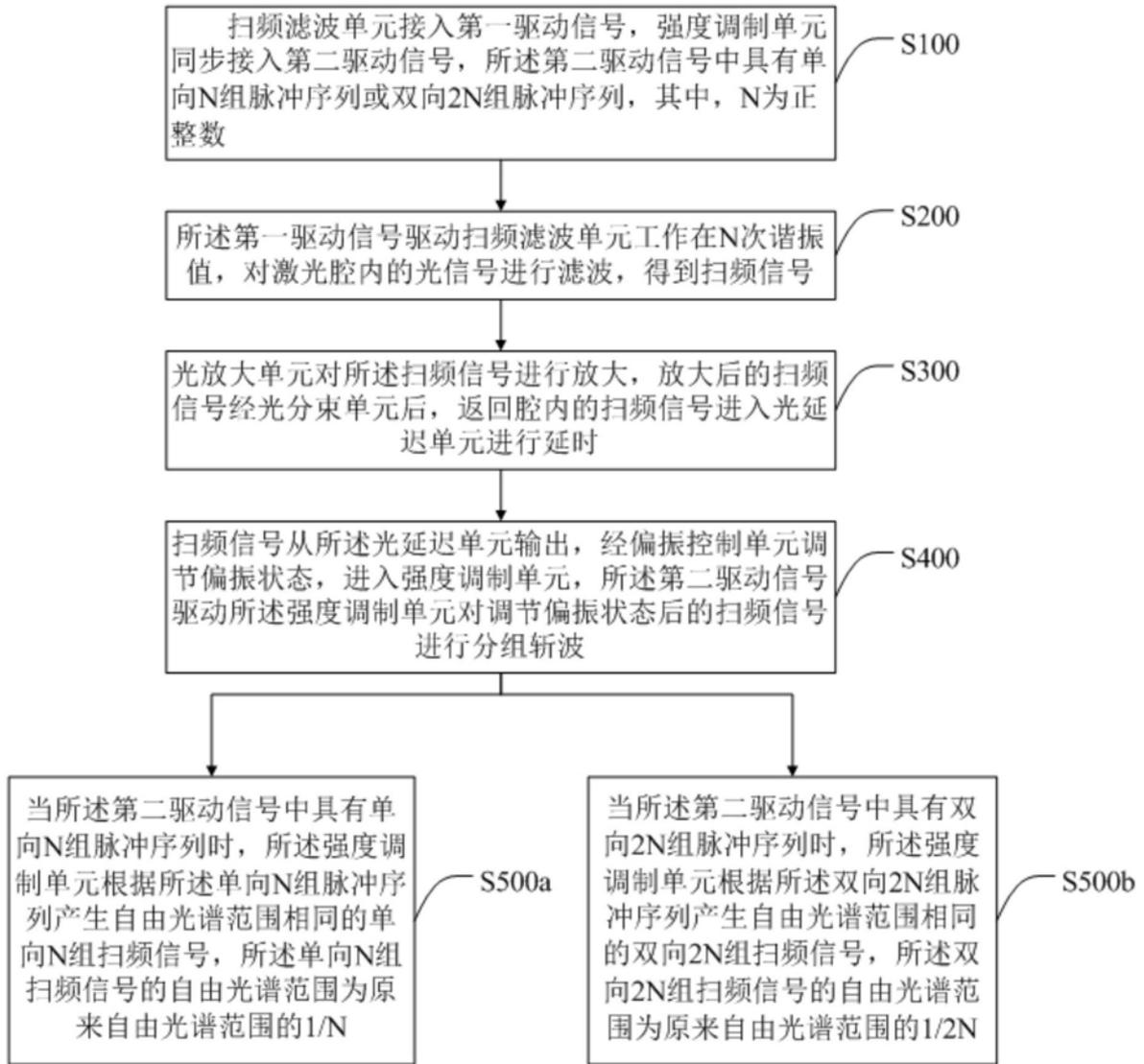


图1

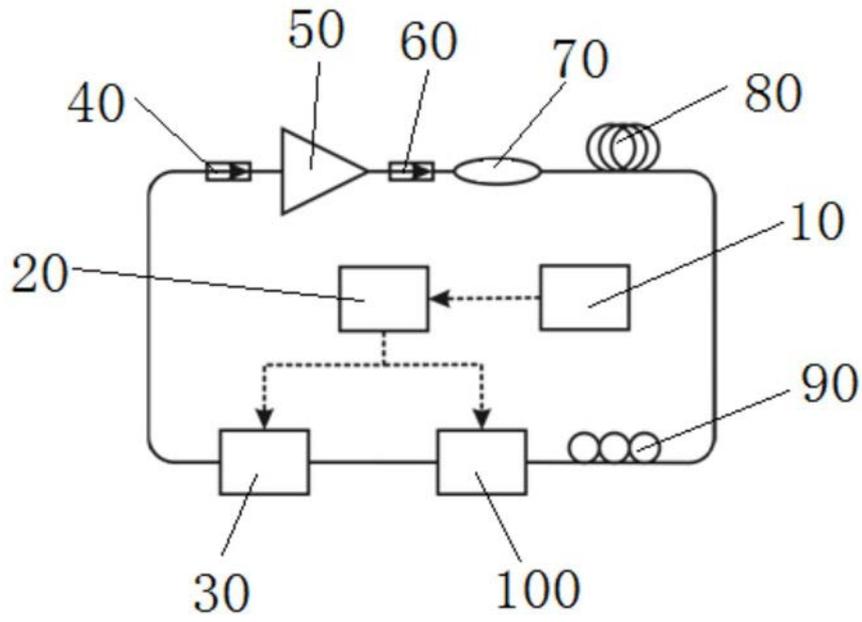


图2

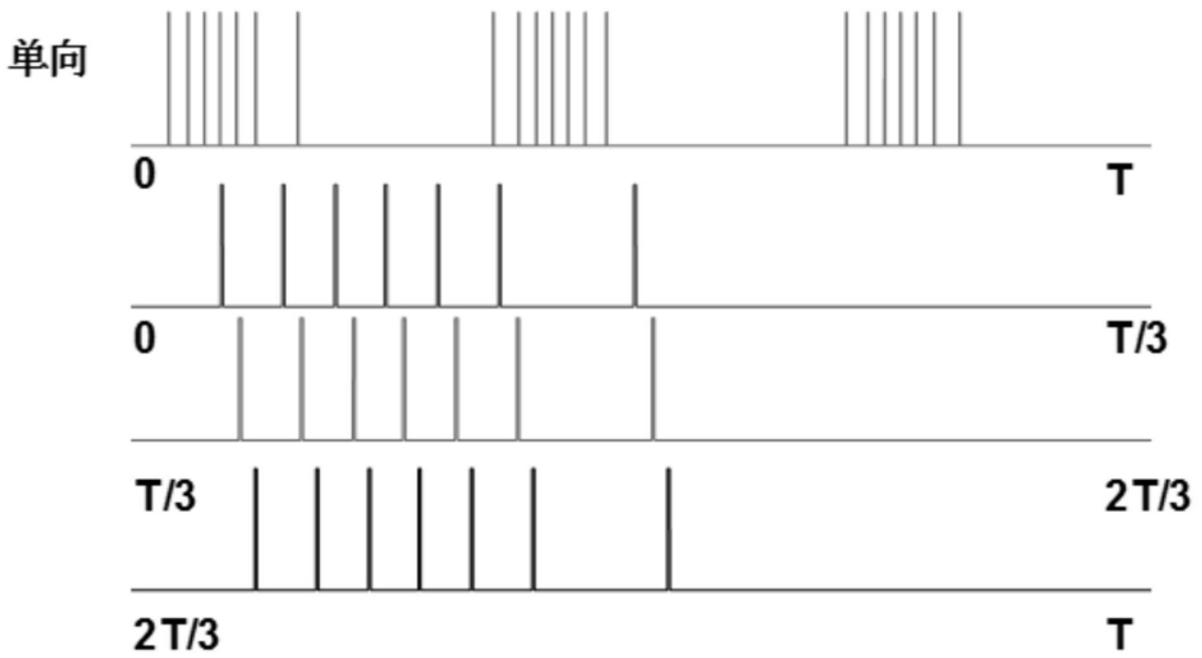


图3

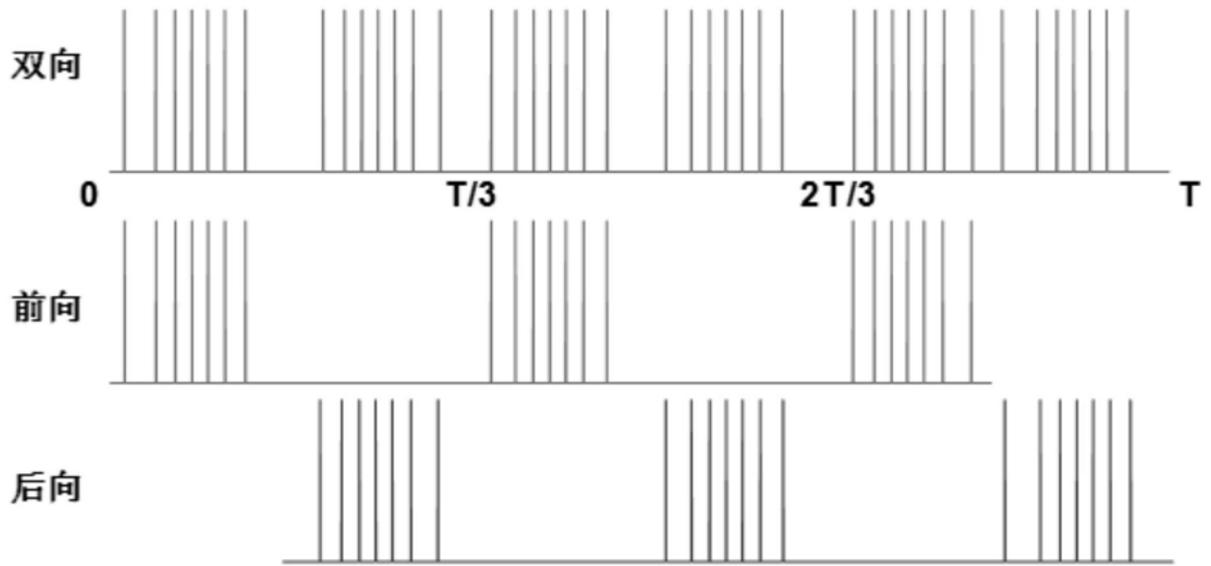


图4

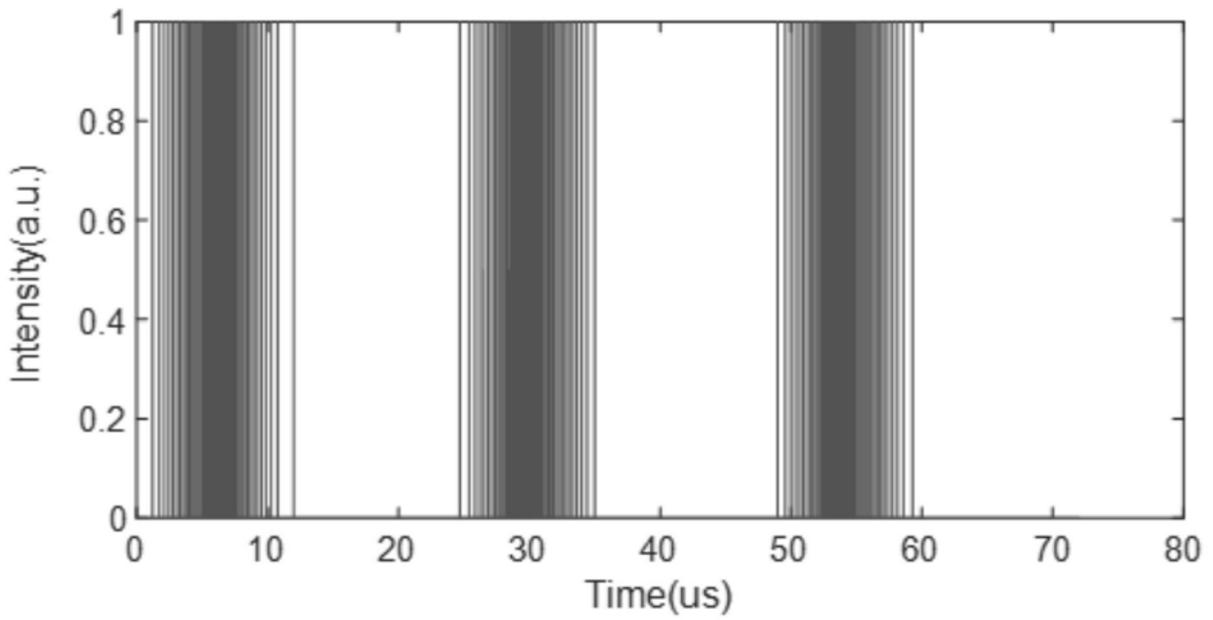


图5

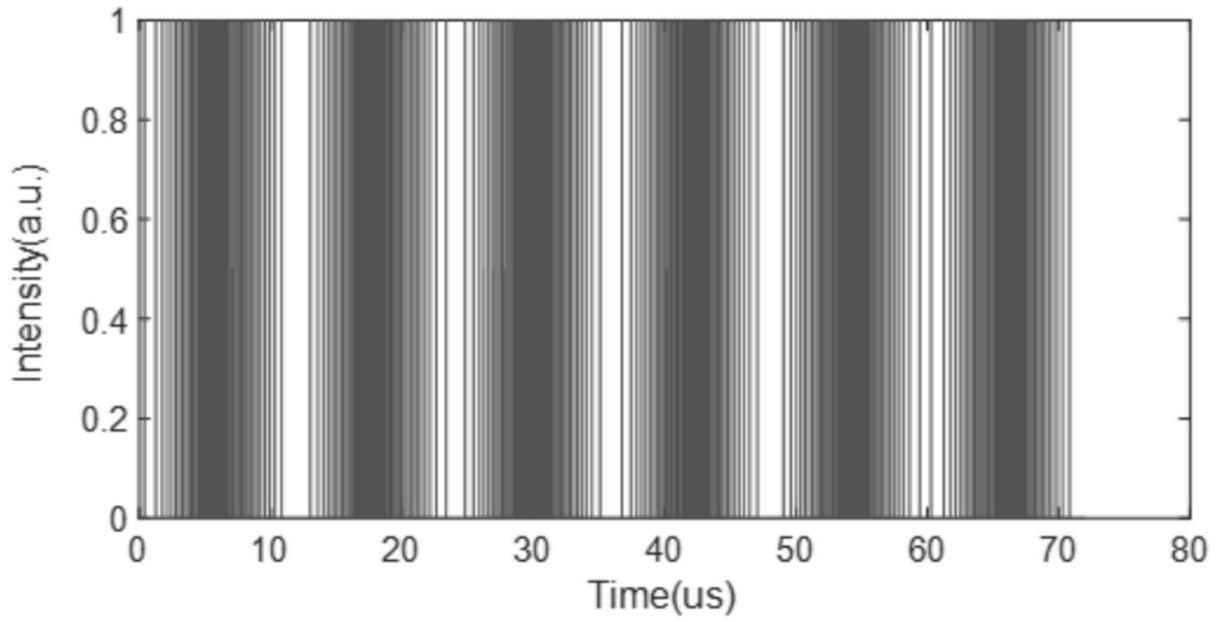


图6

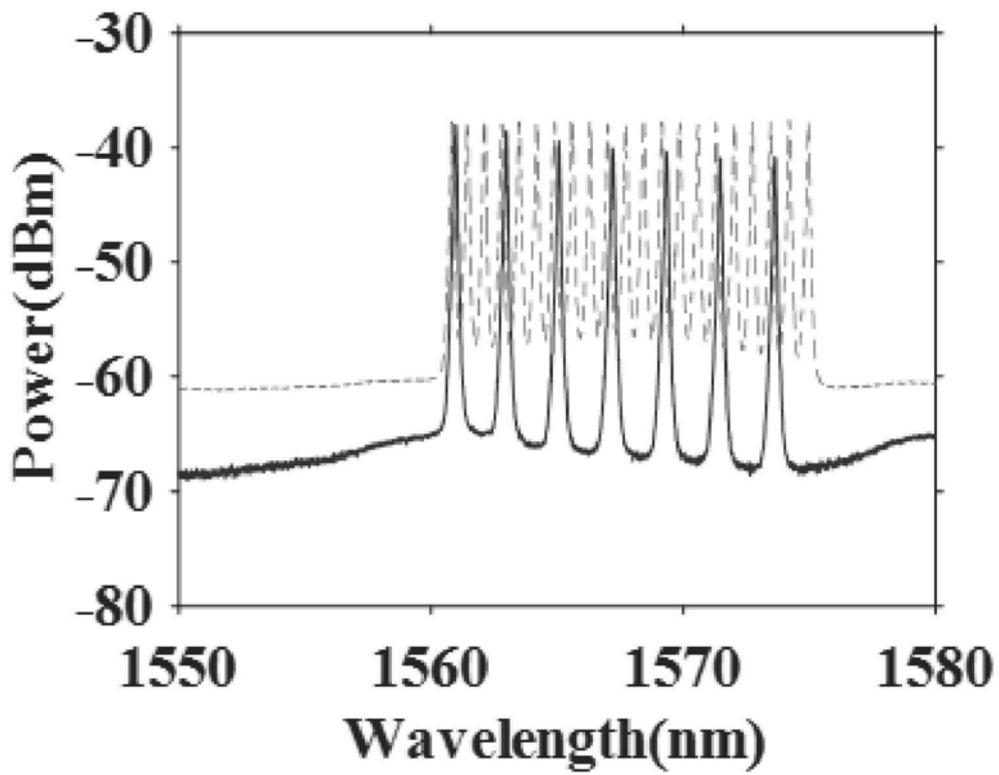


图7

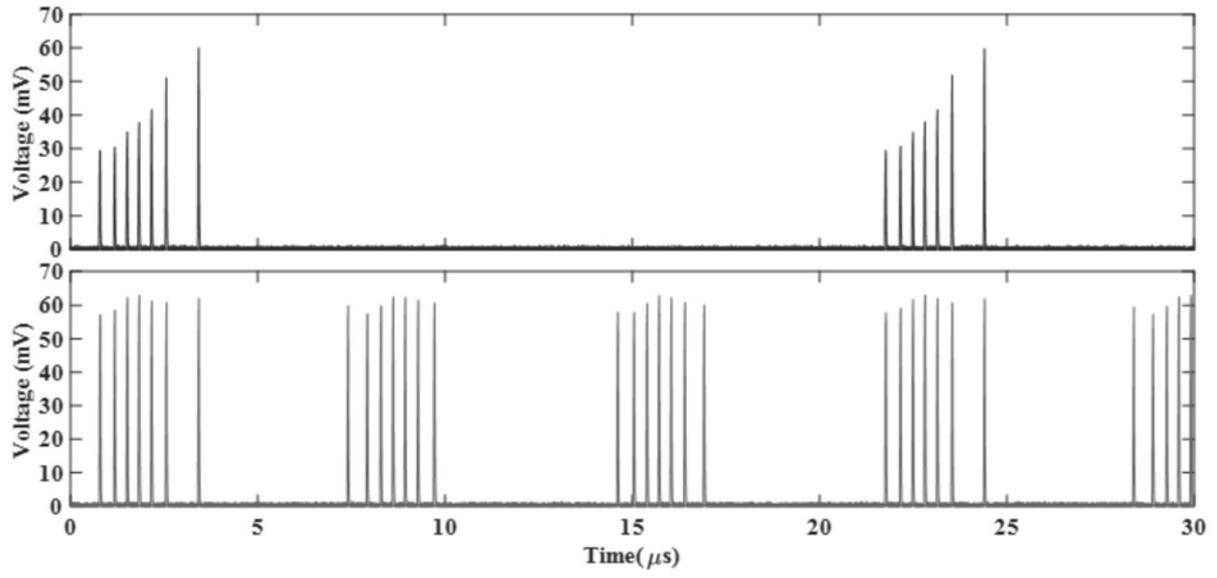


图8