



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109802283 A

(43)申请公布日 2019.05.24

(21)申请号 201910030334.6

(22)申请日 2019.01.14

(71)申请人 中国空间技术研究院

地址 100194 北京市海淀区友谊路104号

(72)发明人 王思佳

(74)专利代理机构 中国航天科技专利中心

11009

代理人 徐晓艳

(51)Int.Cl.

H01S 3/067(2006.01)

H01S 3/094(2006.01)

H01S 3/13(2006.01)

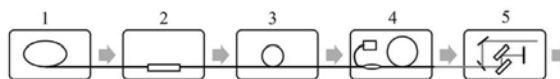
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

## (54)发明名称

一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置和方法

## (57)摘要

本发明提供了一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置和方法,属于超快激光技术领域。所述装置包括光纤被动锁模激光器、负色散啁啾光纤光栅、正色散非线性无源光纤、正色散光纤放大器、色散补偿器。光纤被动锁模激光器产生超短激光脉冲,该脉冲经过负色散啁啾光纤光栅变成带有负啁啾的超短激光脉冲,带有负啁啾的超短激光脉冲耦合进入正色散非线性光纤中,形成三角形窄带超短激光脉冲,三角形窄带超短激光脉冲耦合进入正色散光纤放大器中完成脉冲自相似放大演化,形成抛物线形宽带线性啁啾脉冲,宽带线性啁啾脉冲进入色散补偿器,色散补偿器补偿宽带线性啁啾脉冲在自相似放大过程中积累的正啁啾,获得傅里叶变换极限脉冲质量的飞秒激光。



1. 一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置,其特征包括光纤被动锁模激光器(1)、负色散啁啾光纤光栅(2)、正色散非线性无源光纤(3)、正色散光纤放大器(4)、色散补偿器(5),其中:

光纤被动锁模激光器(1),用于产生超短激光脉冲,并将其作为种子脉冲,该种子脉冲经过负色散啁啾光纤光栅(2)生成带有负啁啾的超短激光脉冲,带有负啁啾的超短激光脉冲耦合进入正色散非线性光纤(3)中,在正色散非线性光纤(3)的正群速度色散和自相位调制效应的共同作用下,带有负啁啾的超短激光脉冲能量向中心波长集中,且在时域和频域同时被压缩和整形,形成三角形窄带超短激光脉冲,之后,三角形窄带超短激光脉冲耦合进入正色散光纤放大器(4)中完成脉冲自相似放大演化,形成抛物线形宽带线性啁啾脉冲,宽带线性啁啾脉冲进入色散补偿器(5),色散补偿器(5)补偿宽带线性啁啾脉冲在自相似放大过程中积累的正啁啾,获得傅里叶变换极限脉冲质量的飞秒激光。

2. 根据权利要求1所述的一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置,其特征在于所述超短激光脉冲平均功率60mW~200mW,重复频率30MHz~100MHz,中心波长1030nm~1050nm,光谱半高全宽度5nm~20nm。

3. 根据权利要求1所述的一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置,其特征在于所述三角形窄带超短激光脉冲的光谱半高全宽度小于正色散光纤放大器增益带宽。

4. 根据权利要求1所述的一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置,其特征在于所述抛物线形宽带线性啁啾脉冲的光谱半高全宽度为20nm~50nm。

5. 根据权利要求1所述的一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置,其特征在于所述光纤被动锁模激光器(1)为光纤非线性偏振旋转锁模激光器、光纤可饱和吸收体锁模激光器或光纤非线性放大环形镜锁模激光器。

6. 根据权利要求1所述的一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置,其特征在于所述负色散啁啾光纤光栅(2)为反射式光纤布拉格光栅。

7. 根据权利要求1所述的一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置,其特征在于所述正色散非线性无源光纤(3)为单模光纤或光子晶体光纤。

8. 根据权利要求1所述的一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置,其特征在于所述正色散光纤放大器(4)为掺镜光纤放大器。

9. 根据权利要求1所述的一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置,其特征在于光栅对色散补偿器(5)为反射式光栅对、透射式光栅对或体布拉格光栅。

10. 一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生方法,其特征包括如下步骤:

s1、生成超短激光脉冲;

s2、将步骤s1生成的超短激光脉冲调整成带有负啁啾的超短激光脉冲;

s3、将带有负啁啾的超短激光脉冲能量向中心波长集中,同时在时域和频域内将脉冲波形压缩和整形,形成三角形窄带超短激光脉冲;

s4、将三角形窄带超短激光脉冲进行自相似脉冲放大演化,输出宽带的线性啁啾抛物线激光脉冲;

s5、消除带线性啁啾抛物线激光脉冲在自相似放大过程中积累的正啁啾,最终输出具有变换极限质量的飞秒激光脉冲。

11. 根据权利要求10所述的一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生方法,其

特征在于所述步骤s2采用负色散啁啾光纤光栅(2)实现。

12. 根据权利要求10所述的一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生方法,其特征在于所述超短激光脉冲平均功率60mW~200mW,重复频率30MHz~100MHz,中心波长1030nm~1050nm,光谱半高全宽度5nm~20nm。

13. 根据权利要求10所述的一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生方法,其特征在于所述抛物线形宽带线性啁啾脉冲的光谱半高全宽度为20nm~50nm。

## 一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置和方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置及方法,属于超快激光技术领域。

### 背景技术

[0002] 飞秒( $f_s, 10^{-15}s$ )激光的时间分辨率、相干光谱宽度、峰值功率、时间抖动等性能均优于传统激光技术,可为距离测量、时频传递、精密加工、模数转换等技术带来指标性突破,在地球物理观测、通信、雷达与导航等领域均具有重要应用前景。光纤飞秒激光技术可以克服钛宝石飞秒激光系统泵浦源昂贵、环境要求苛刻、热效应等固有缺陷,是飞秒激光实现广泛商业应用的有效途径。然而光纤细长的波导结构在带来实用化优势的同时,也突出了非线性扰动大、自发辐射放大噪声强等问题,在高增益运转下极易发生激光脉冲畸变甚至分裂。自相似放大是指脉冲在正色散增益光纤中演化成为带有线性啁啾的抛物线形脉冲,脉冲的峰值功率、时域宽度和频谱宽度随光纤长度呈现指数增长,脉冲的形状保持抛物线形不变。不同于飞秒激光直接非线性放大技术和飞秒激光啁啾脉冲放大技术,自相似放大技术主动利用光纤中的非线性效应展宽脉冲光谱,并利用正群速度色散将脉冲放大过程积累的相位线性化,从而使得脉冲光谱可以有效展宽而不发生脉冲畸变和分裂,直接输出高功率的宽光谱线性啁啾抛物线脉冲,只需采用二阶色散补偿就可以有效地压缩脉冲,得到高质量的变换极限飞秒激光脉冲,这是自相似放大技术最突出的优点。自相似放大技术充分利用了光纤作为激光增益介质的优势,是光纤飞秒激光系统性能提升的便利和有效的手段。

[0003] 由于光纤放大器的增益谱形状由反转粒子数分布决定,在放大器增益一定的情况下,受到增益整形作用的影响,脉冲在光纤中自相似放大演化的速度和效果与种子脉冲波长、宽度、啁啾、形状等因素密切相关。为降低增益整形作用对自相似放大演化过程的影响,通常有两种解决方案:一种是采用较长的增益光纤,以此提高光纤放大器的增益带宽,然而当增益光纤过长时,受激拉曼散射效应将影响放大过程中的啁啾积累,进而劣化压缩后的飞秒激光脉冲质量,限制放大输出飞秒激光脉冲能量,并且增益光纤越长,自发辐射放大噪声越大;另一种解决方案是采用输出脉冲光谱形状平滑、谱宽较窄的固体锁模激光振荡器作为种子脉冲源,进而间接减小增益带宽对脉冲自相似放大演化的限制,但是该方案无法实现全光纤化,降低了光纤系统的紧凑性优势。

### 发明内容

[0004] 本发明的技术解决问题是:克服现有技术的不足,提供一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生方法和装置,缩短产生飞秒激光时自相似放大所需增益光纤长度,进而抑制受激拉曼散射效应扰动,同时降低对种子光源的性能要求,实现产生飞秒激光产生装置的全光纤化和小型化。

[0005] 本发明的技术解决方案是:一种基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装

置,该装置包括光纤被动锁模激光器、负色散啁啾光纤光栅、正色散非线性无源光纤、正色散光纤放大器、色散补偿器,其中:

[0006] 光纤被动锁模激光器,用于产生超短激光脉冲,并将其作为种子脉冲,该种子脉冲经过负色散啁啾光纤光栅生成带有负啁啾的超短激光脉冲,带有负啁啾的超短激光脉冲耦合进入正色散非线性光纤中,在正色散非线性光纤的正群速度色散和自相位调制效应的共同作用下,带有负啁啾的超短激光脉冲能量向中心波长集中,且在时域和频域同时被压缩和整形,形成三角形窄带超短激光脉冲,之后,三角形窄带超短激光脉冲耦合进入正色散光纤放大器中完成脉冲自相似放大演化,形成抛物线形宽带线性啁啾脉冲,宽带线性啁啾脉冲进入色散补偿器,色散补偿器补偿宽带线性啁啾脉冲在自相似放大过程中积累的正啁啾,获得傅里叶变换极限脉冲质量的飞秒激光。

[0007] 所述超短激光脉冲平均功率60mW~200mW,重复频率30MHz~100MHz,中心波长1030nm~1050nm,光谱半高全宽度5nm~20nm。

[0008] 所述三角形窄带超短激光脉冲的光谱半高全宽度小于正色散光纤放大器增益带宽。

[0009] 所述抛物线形宽带线性啁啾脉冲的光谱半高全宽度为20nm~50nm。

[0010] 所述光纤被动锁模激光器为光纤非线性偏振旋转锁模激光器、光纤可饱和吸收体锁模激光器或光纤非线性放大环形镜锁模激光器。

[0011] 所述负色散啁啾光纤光栅为反射式光纤布拉格光栅。

[0012] 所述正色散非线性无源光纤为单模光纤或光子晶体光纤。

[0013] 所述正色散光纤放大器为掺镱光纤放大器。

[0014] 所述光栅对色散补偿器为反射式光栅对、透射式光栅对或体布拉格光栅。

[0015] 本发明的另一个技术解决方案是:一种基于三角脉冲被动成型的光纤飞秒激光产生方法,该方法包括如下步骤:

[0016] s1、生成超短激光脉冲;

[0017] s2、将步骤s1生成的超短激光脉冲调整成带有负啁啾的超短激光脉冲;

[0018] s3、将带有负啁啾的超短激光脉冲能量向中心波长集中,同时在时域和频域内将脉冲波形压缩和整形,形成三角形窄带超短激光脉冲;

[0019] s4、将三角形窄带超短激光脉冲进行自相似脉冲放大演化,输出宽带的线性啁啾抛物线激光脉冲;

[0020] s5、消除带线性啁啾抛物线激光脉冲在自相似放大过程中积累的正啁啾,最终输出具有变换极限质量的飞秒激光脉冲。

[0021] 所述超短激光脉冲平均功率60mW~200mW,重复频率30MHz~100MHz,中心波长1030nm~1050nm,光谱半高全宽度5nm~20nm。

[0022] 所述步骤s2采用负色散啁啾光纤光栅实现。

[0023] 所述抛物线形宽带线性啁啾脉冲的光谱半高全宽度为20nm~50nm。

[0024] 本发明与现有技术相比具有如下优点:

[0025] (1)、本发明通过在正色散非线性无源光纤中预先生成窄带的三角形超短激光脉冲,减小增益整形对自相似放大演化的扰动,提高脉冲在光纤放大器中的自相似演化效率,缩短自相似放大所需增益光纤长度,进而抑制受激拉曼散射效应扰动,获得高功率、低噪声

的高质量飞秒激光,同时也可以降低自相似放大器对种子源的要求,实现自相似放大系统的全光纤化和小型化,结构简单,操作方便;

[0026] (2)、本发明放大器增益光纤长度短,可以直接输出脉冲宽度数百飞秒的高能量抛物线脉冲,不需要附加时域压缩环节就可以直接用于在非线性光纤中进行光谱展宽压缩,其抛物线的时域形状可以保证非线性光谱展宽过程中的线性啁啾,压缩后输出高功率、高质量的少周期激光脉冲,提升非线性展宽压缩系统性能指标,同时实现非线性展宽压缩系统的全光纤化;

[0027] (3)、本发明可以为下一级功率放大和能量放大提供稳定的、高线性啁啾度的、光谱平滑的种子激光脉冲,提升光纤飞秒激光啁啾脉冲放大系统的集成度和稳定性。

## 附图说明

[0028] 图1为本发明基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光自相似放大器结构示意图;

[0029] 图2为实验测得的本发明实施例在普通单模光纤中被动成形的三角形脉冲光谱强度曲线;

[0030] 图3为实验测得的本发明实施例在普通单模光纤中被动成形的三角形脉冲强度自相关曲线;

[0031] 图4为根据图2和图3数据还原得到的本发明实施例在普通单模光纤中被动成形的三角形脉冲强度曲线和拟合的三角形脉冲强度曲线;图中:8为普通单模光纤中被动成形的三角形脉冲时域强度曲线,9为拟合的三角形脉冲强度曲线;

[0032] 图5为实验测得的本发明实施例掺镱光纤放大器输出脉冲光谱强度曲线;

[0033] 图6为实验测得的本发明实施例光栅对色散补偿器输出的脉冲强度自相关曲线;

[0034] 图7为根据图3和图4数据还原得到的本发明实施例光栅对色散补偿器输出的脉冲强度曲线和对应的傅里叶变换极限脉冲强度曲线。图中:12为光栅对色散补偿器输出的脉冲强度曲线,13为傅里叶变换极限脉冲强度曲线。

## 具体实施方式

[0035] 以下结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0036] 如图1所示,本发明提供的基于三角脉冲被动成形的光纤飞秒激光产生装置包括:光纤被动锁模激光器1、负色散啁啾光纤光栅2、正色散非线性无源光纤3、正色散光纤放大器4、色散补偿器5。各部件的连接关系为:光纤被动锁模激光器1输出耦合端尾纤直接与负色散啁啾光纤光栅2输入端熔接,负色散啁啾光纤光栅2的输出端与正色散非线性无源光纤3熔接,正色散非线性无源光纤3的输出端直接与正色散光纤放大器4的信号输入端熔接,正色散光纤放大器4输出信号耦合进入色散补偿器5。

[0037] 光纤被动锁模激光器1,用于产生超短激光脉冲,并将其作为种子脉冲,该种子脉冲经过负色散啁啾光纤光栅2生成带有负啁啾的超短激光脉冲,带有负啁啾的超短激光脉冲耦合进入正色散非线性光纤3中,在正色散非线性光纤3的正群速度色散和自相位调制效应的共同作用下,带有负啁啾的超短激光脉冲能量向中心波长集中,且在时域和频域同时被压缩和整形,形成三角形窄带超短激光脉冲,之后,三角形窄带超短激光脉冲耦合进入正色散光纤放大器4中,在正色散光纤放大器的增益、自相位调制效应和正群速度色散的

作用下,完成脉冲自相似放大演化,形成抛物线形宽带线性啁啾脉冲,宽带线性啁啾脉冲进入色散补偿器5,色散补偿器5补偿宽带线性啁啾脉冲在自相似放大过程中积累的正啁啾,在时域压缩脉冲,获得傅里叶变换极限脉冲质量的飞秒激光。

[0038] 在实际使用过程中光纤被动锁模激光器1可以选择光纤非线性偏振旋转锁模激光器、光纤可饱和吸收体锁模激光器或光纤非线性放大环形镜锁模激光器。负色散啁啾光纤光栅2可以选择反射式光纤布拉格光栅。正色散非线性无源光纤3可以选择普通单模光纤或光子晶体光纤。正色散光纤放大器4可以选用掺镱光纤放大器。光栅对色散补偿器5可以选用反射式光栅对、透射式光栅对或体布拉格光栅。

[0039] 本发明提供了一种基于三角脉冲被动成型的光纤飞秒激光产生方法,该方法包括如下步骤:

[0040] (1)、生成超短激光脉冲;所述超短激光脉冲平均功率60mW~200mW,重复频率30MHz~100MHz,中心波长1030nm~1050nm,光谱半高全宽度5nm~20nm。

[0041] (2)、将步骤(1)生成的超短激光脉冲调整成带有负啁啾的超短激光脉冲;该步骤采用负色散啁啾光纤光栅(2)实现。

[0042] (3)、将带有负啁啾的超短激光脉冲能量向中心波长集中,同时在时域和频域内将脉冲波形压缩和整形,形成三角形窄带超短激光脉冲;该三角形窄带超短激光脉冲的光谱半高全宽度小于正色散光纤放大器增益带宽。

[0043] (4)、将三角形窄带超短激光脉冲进行自相似脉冲放大演化,输出宽带的线性啁啾抛物线激光脉冲;

[0044] (5)、消除带线性啁啾抛物线激光脉冲在自相似放大过程中积累的正啁啾,最终输出具有变换极限质量的飞秒激光脉冲。

[0045] 实施例:

[0046] 光纤被动锁模激光器1采用光纤非线性放大环形镜锁模激光器,输出平均功率~100mW的超短激光脉冲序列,重复频率~50MHz,中心波长 1030nm~1040nm,光谱半高全宽度10nm~15nm。负色散啁啾光纤光栅2采用反射式光纤布拉格光栅,二阶色散0.15ps/nm~0.35ps/nm,光纤非线性放大环形镜锁模激光器输出耦合端尾纤与反射式光纤布拉格光栅输入端熔接,光纤非线性放大环形镜锁模激光器输出的超短激光脉冲经过反射式光纤布拉格光栅后生成带有负啁啾的超短激光脉冲。正色散非线性无源光纤3采用1m~1.5m 普通单模光纤,普通单模光纤的输入端与反射式光纤布拉格光栅的输出端熔接,反射式光纤布拉格光栅输出的负啁啾超短激光脉冲在普通单模光纤的正群速度色散和自相位调制效应的共同作用下,脉冲能量向中心波长集中,脉冲在频域和时域同时被压缩和整形,实验测得的普通单模光纤输出脉冲光谱强度曲线和强度自相关曲线分别如图2和图3所示,根据该实验数据利用PICASO(Phase and Intensity from Correlation and Spectrum only)算法还原得到相应的脉冲时域强度曲线如图4中8所示,与拟合的三角形脉冲曲线9的一致性说明脉冲在普通单模光纤中完成了三角脉冲的被动成型过程。正色散光纤放大器4采用掺镱光纤放大器,增益介质为1.5m~2.5m单模偏振型双包层掺镱光纤,纤芯模场直径10 $\mu$ m,泵浦激光源为976nm光纤耦合输出激光二极管,采用波分复用器将泵浦激光和三角脉冲耦合进入掺镱光纤放大器,控制泵浦激光源输出功率,在放大器增益达到~20dB时放大器输出的脉冲光谱强度曲线如图5所示。光栅对色散补偿器5采用600line/mm的反射光栅对压缩放大后

的脉冲,输出的压缩脉冲强度自相关曲线如图6所示。利用PICASO算法还原得到相应的压缩脉冲时域强度曲线如图7中12所示,脉冲宽度 $\sim 60\text{fs}$ 。根据放大器输出脉冲光谱强度曲线图5可以拟合得到相应的傅里叶变换极限脉冲时域强度曲线13,曲线13与曲线12的一致性,说明脉冲在掺镜光纤放大器中只积累了线性啁啾,这是抛物线形脉冲放大最典型的特征,说明脉冲实现了自相似放大,最终输出了具有变换极限脉冲质量的飞秒激光。

[0047] 本发明说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员公知的现有技术。



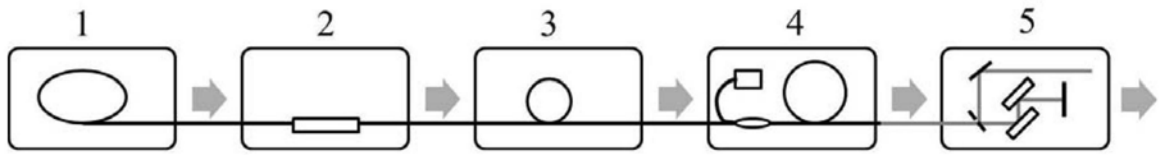


图1

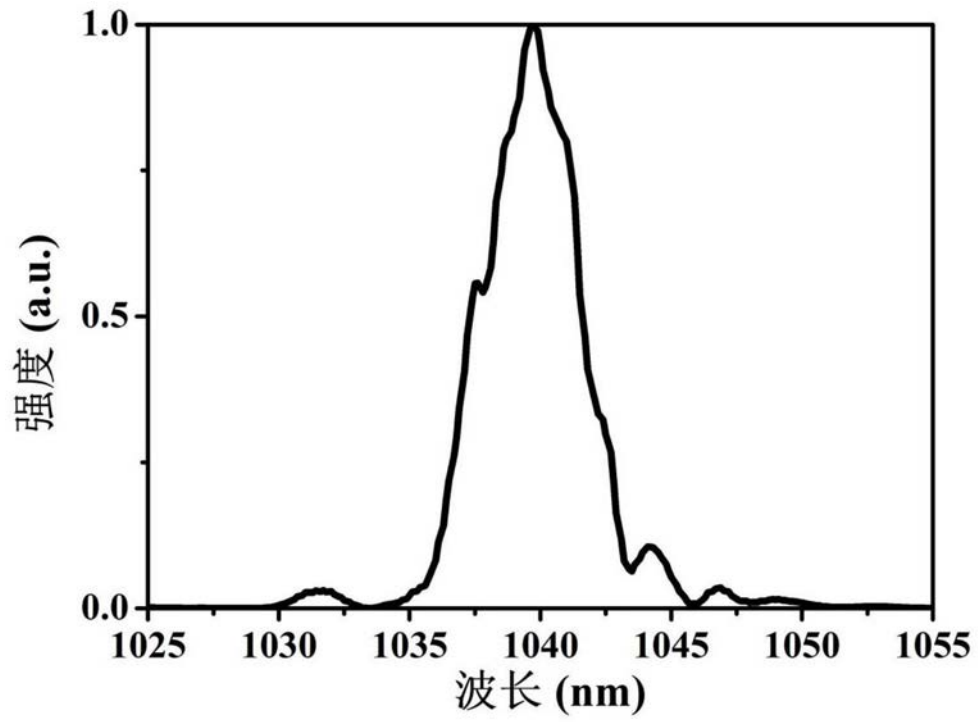


图2

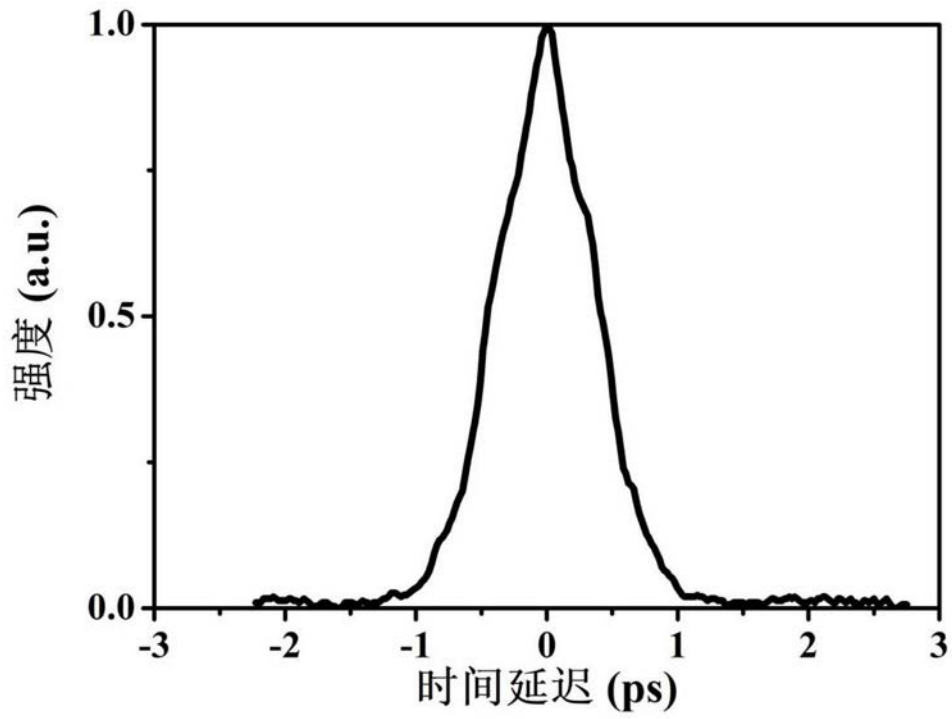


图3

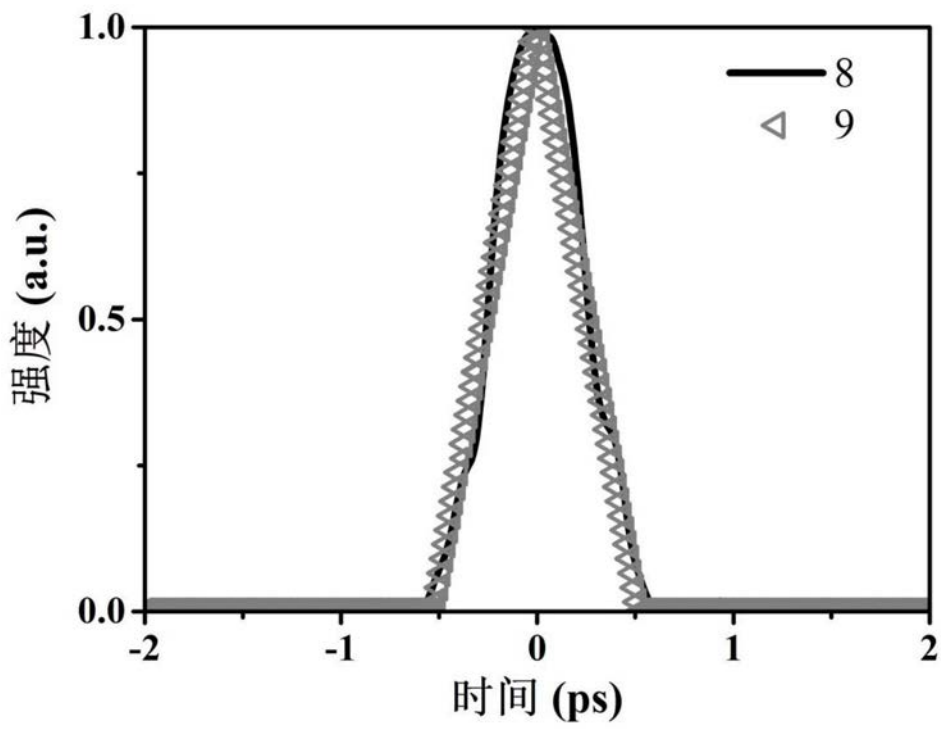


图4

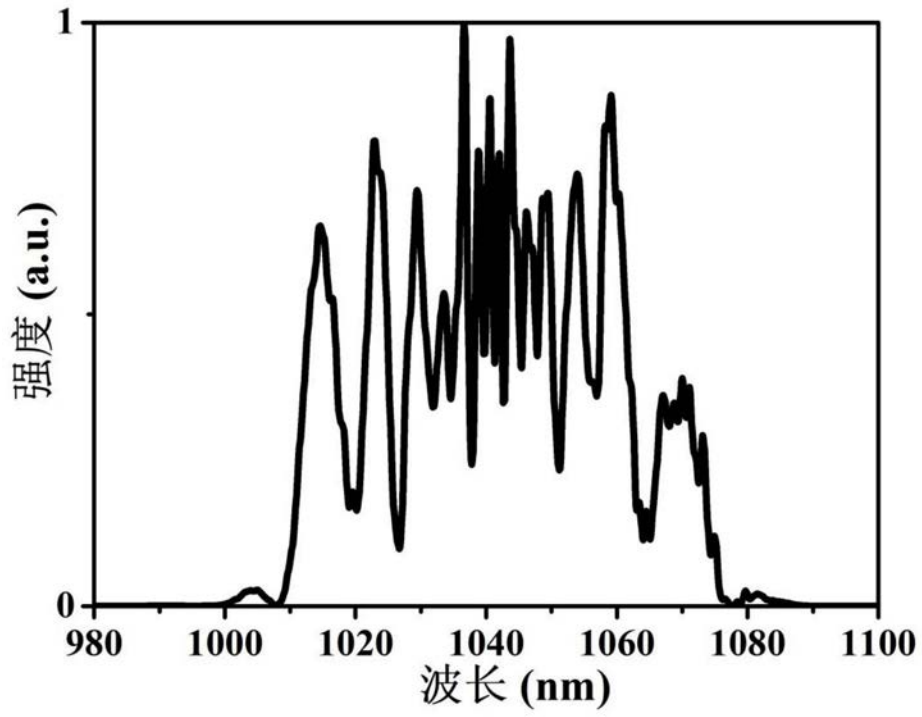


图5

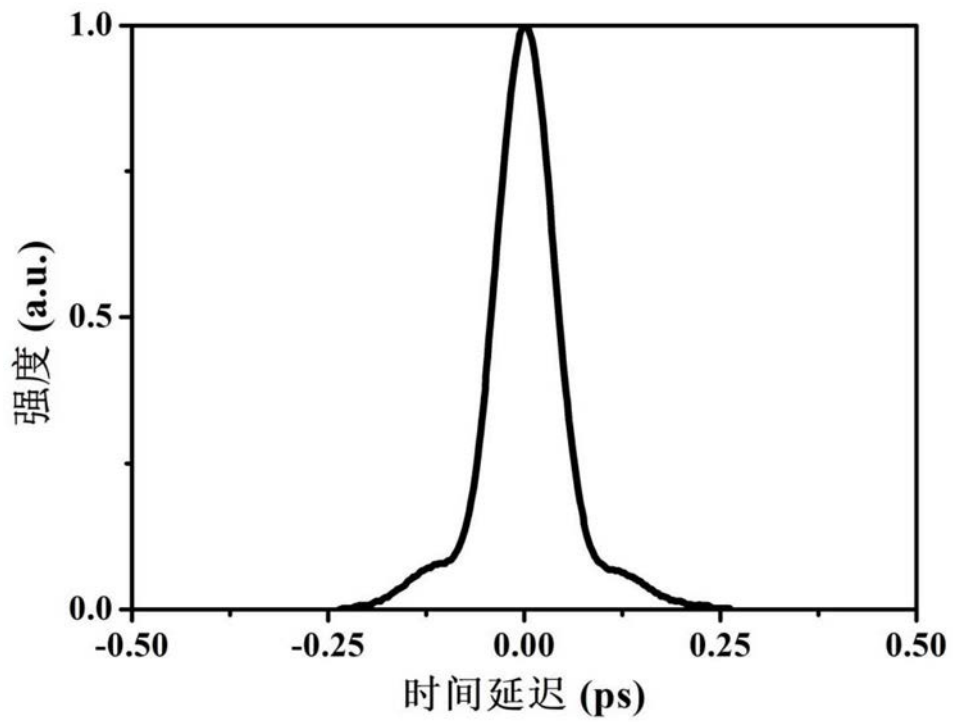


图6

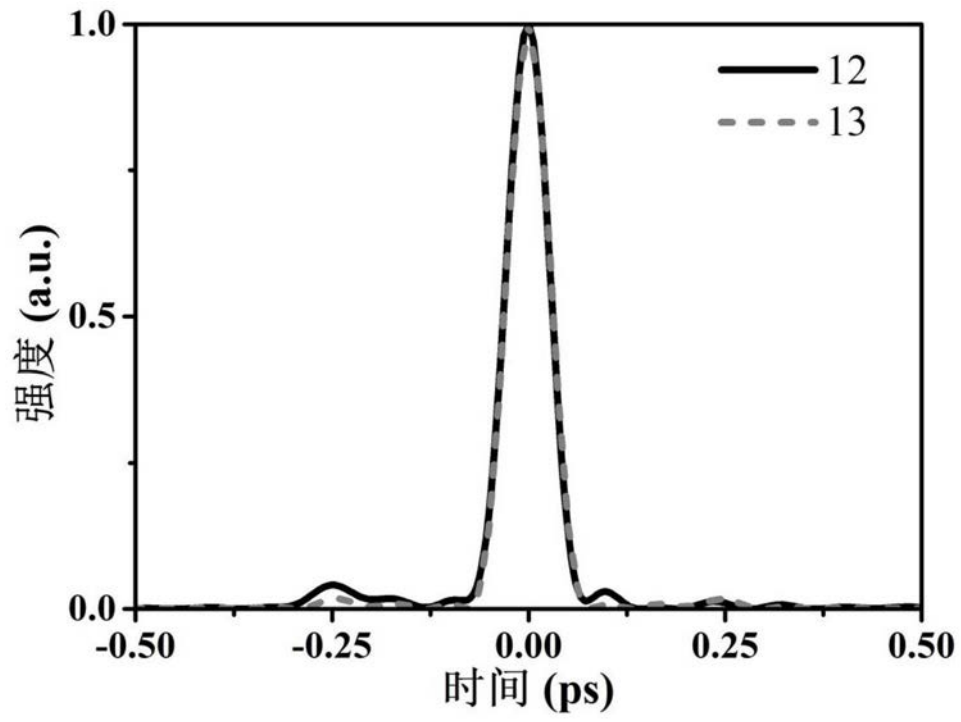


图7