



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102313605 A

(43) 申请公布日 2012. 01. 11

(21) 申请号 201110198352. 9

(22) 申请日 2011. 07. 15

(71) 申请人 中国科学院上海光学精密机械研究所

地址 201800 上海市嘉定区 800 - 211 邮政信箱

(72) 发明人 刘军 李闯 冷雨欣 李儒新

(74) 专利代理机构 上海新天专利代理有限公司  
31213

代理人 张泽纯

(51) Int. Cl.

G01J 11/00(2006. 01)

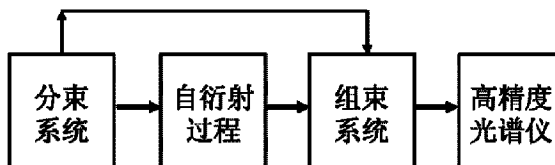
权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 4 页

## (54) 发明名称

自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量方法和装置

## (57) 摘要

一种自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量方法和装置,该方法首先将激光束分成三束,其中两束激光聚焦打在一块非线性透明光学介质上,产生两束一阶自衍射光。将任何一束自衍射光作为参考激光脉冲,此参考脉冲与第三束激光脉冲在空间上共线并调节重合,通过调节延时可以获得激光干涉光谱。通过测量干涉光谱,利用自参考光谱相干方法来可以反演计算获得激光光谱和光谱相位,从而可以测量激光脉冲宽度与脉冲形状。本发明结合了 SRSI 和 FROG 两种方法及其优点,具有速度快、简单和方便的特点,适用于不同脉冲宽度和不同波长的飞秒激光脉冲宽度与脉冲形状的单发测量和实时测量与监测。



1. 一种自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量方法,特征在于该方法包括下列步骤:

1)、利用三阶非线性光学效应产生一阶自衍射激光束:

待测激光束 (1) 经过分束系统分成三束激光,其中一束激光能量为总脉冲能量的 5% 用来测量,称为待测光束,另外两束激光能量相等并以一定的非共线夹角  $2^\circ$  聚焦在透明非线性介质 (12) 上产生一阶自衍射光束,称为参考光束,该参考光束的光强  $I_{sd1}(\omega_{sd1})$  为:

$$I_{sd1}(\omega_{sd1}) \propto \left| \iint d\omega_1 d\omega_{-1} \chi^{(3)} \dot{E}_1^0(z, \omega_1) \dot{E}_{-1}^0(z, \omega_{-1}) \dot{E}_1^0(z, \omega_{sd1} - \omega_{-1} + \omega_1) \sin c(\Delta k_z(\omega_{sd1}, \omega_1, \omega_{-1})L/2) \right|^2 \quad (1)$$

其中:  $\omega_{sd1}$ 、 $\omega_1$  和  $\omega_{-1}$  分别为参考光束,两束入射激光的角频率,  $\Delta k_z(\omega_{sd1}, \omega_1, \omega_{-1})$  为自衍射过程中的相位失配量, L 为非线性介质 (12) 的厚度,

2)、将所述的待测光束和参考光束调节共线并且空间重合地进入所述的高精度光谱仪 (19), 以获得最大调制深度的光谱干涉条纹  $D(\omega, \tau)$  :

$$\begin{aligned} D(\omega, \tau) &= |E_{ref}(\omega) + E(\omega) e^{i\omega\tau}|^2 \\ &= |E_{ref}(\omega)|^2 + |E(\omega)|^2 + f(\omega) e^{i\omega\tau} + f^*(\omega) e^{-i\omega\tau} \end{aligned}$$

其中:  $\omega$  为激光角频率,  $S_0(\omega) = |E_{ref}(\omega)|^2 + |E(\omega)|^2$  是参考光束信号光谱与待测光束信号光谱之和;  $f(\omega) = E_{ref}^*(\omega)E(\omega)$  是参考光束信号光谱与待测光束信号光谱的干涉项;

3)、对所述的光谱干涉条纹  $D(\omega, \tau)$  按下列步骤进行数据处理,获得激光光谱和光谱相位:

①将所述的光谱干涉条纹  $D(\omega, \tau)$  进行傅里叶变换到时域信号,从所述的时域信号中分别提取  $S_0(\tau)$  和  $f(\tau)$ ;

②对所述的  $S_0(\tau)$ ,  $f(\tau)$  分别进行反傅里叶变换分别得到频域  $S_0(\omega)$  和频域  $f(\omega)$ ;

③利用所述的  $S_0(\omega)$ ,  $f(\omega)$ , 采用下列公式求参考光光谱振幅  $|E_{ref}(\omega)|$  :

$$|E_{ref}(\omega)| = 1/2 \left[ \sqrt{(S_0(\omega) + 2|f(\omega)|)} + \sqrt{(S_0(\omega) - 2|f(\omega)|)} \right]$$

和待测激光光谱振幅  $|E(\omega)|$

$$|E(\omega)| = 1/2 \left[ \sqrt{(S_0(\omega) + 2|f(\omega)|)} - \sqrt{(S_0(\omega) - 2|f(\omega)|)} \right]$$

初步的待测激光的光谱  $|E(\omega)|^2$  和参考光的光谱  $|E_{ref}(\omega)|^2$ ;

④对所述的  $f(\omega)$  进行解相运算  $\arg f(\omega)$ , 用下列公式计算待测激光的初步的光谱相位:

$$\varphi(\omega) = \varphi_{ref}(\omega) + \arg f(\omega) + C$$

其中,  $\varphi(\omega)$  和  $\varphi_{ref}(\omega)$  分别为待测激光和参考光光谱相位, 初始参考光光谱相位设为 0, C 是分束片 (16) 等色散光学元件引入的光谱相位常数;

⑤将初步得到的激光光谱和光谱相位进行傅里叶变换, 即得到待测激光脉冲的脉冲形状  $|E(t)|^2$  和脉冲宽度,  $E(t)$  为  $E(\omega)$  的傅里叶变换的值;

⑥由于参考光相位并不一定绝对等于 0, 因此需要按下面的迭代方法进一步进行迭代计算, 优化激光光谱和光谱相位输出, 迭代方法如下:

(i) 利用步骤 5 获得的脉冲形状信号  $|E(t)|^2$ , 根据公式 (1) 的时域表达式得到参考光的时域电场形状为  $E(t)*|E(t)|^2$ , 对上述电场进行反傅里叶变换得到参考光光谱与参考光光谱相位  $\varphi_{ref}(\omega)$ ;

(ii) 将所述的参考光光谱相位  $\varphi_{ref}(\omega)$  代入公式:

$\varphi(\omega) = \varphi_{ref}(\omega) + \arg f(\omega) + C$ , 得到新的待测激光光谱相位  $\varphi(\omega)$ , 通过傅里叶变换得到新的待测脉冲形状;

(iii)、重复以上迭代步骤 i 和 ii 三次左右, 即可以得到校准的待测激光光谱与光谱相位, 进而得到校准的激光脉冲形状和脉冲宽度。

2. 一种实施权利要求 1 所述的自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量方法的飞秒激光脉冲的实时测量装置, 特征在于其构成包括: 沿待测激光束 (1) 方向依次为第一  $45^\circ$  全反镜 (2)、第一分束片 (3) 和第三  $45^\circ$  全反镜 (8), 在该第三  $45^\circ$  全反镜 (8) 的反射光方向设置第四  $45^\circ$  全反镜 (9), 在该第四  $45^\circ$  全反镜 (9) 方向设置第一凹面反射镜 (11), 在该第一凹面反射镜 (11) 的反射光方向依次设置三阶非线性介质材料 (12) 和挡光板 (14), 所述的三阶非线性介质材料 (12) 置于所述的第一凹面反射镜 (11) 的焦点上, 在所述的三阶非线性介质材料 (12) 的一阶自衍射光束 (13) 方向设有第二凹面反射镜 (15), 在该第二凹面反射镜 (15) 方向设置第三分束片 (16), 所述的一阶自衍射光束 (13) 称为参考光束;

所述的待测激光束 (1) 经第一分束片 (3) 分为透射光束和反射光束, 在该反射光束方向依次是第二分束片 (4) 和第一光束延时器 (5), 在该第一光束延时器 (5) 的输出光束方向设置第五  $45^\circ$  全反镜 (10), 该第五  $45^\circ$  全反镜 (10) 的反射光进入所述的第一凹面反射镜 (11);

在第二分束片 (4) 的反射光束方向设置第二光束延时器 (6), 在第二光束延时器 (6) 的输出光束方向设置第二  $45^\circ$  全反镜 (7), 经该第二  $45^\circ$  全反镜 (7) 的反射光束我们仍称为待测光束, 该待测光束透过所述的第三分束片 (16) 后被第六  $45^\circ$  全反镜 (17) 反射, 在该第六  $45^\circ$  全反镜 (17) 的反射光方向设置小孔光阑 (18) 和高精度光谱仪 (19)。

3. 根据权利要求 2 所述的飞秒激光脉冲的实时测量装置, 其特征在于所述的非线性介质 (12) 为任何透明材料的光学介质。

## 自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量方法和装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及飞秒激光脉冲,特别是一种自参考光谱干涉飞秒激光脉冲(形状和宽度)的实时测量方法和装置。本方法可适用于 200-3000nm 光谱范围内,脉冲宽度在 10-300fs 的飞秒光学系统。本发明不仅可以适用于兆赫兹重复频率的激光脉冲,同时也适用于单发飞秒激光脉冲的脉冲宽度与脉冲形状测量。

### 背景技术

[0002] 随着飞秒激光技术的发展,飞秒激光脉冲在科研、加工、生物、医疗、国防、通信等社会各个领域的应用越来越广泛。在实验室天体物理、X 射线激光、激光电子和质子加速、阿秒激光脉冲产生等强场激光物理、飞秒化学、飞秒非线性光学显微成像等众多重要前沿科学基础研究与应用基础研究都需要飞秒激光脉冲作为工具。在工业和医疗应用上,相对于纳秒和皮秒激光器,飞秒激光加工能够获得更加精细和光滑的表面形状。飞秒激光脉冲最近也被用来进行眼科晶状体的切割手术。在以上所有这些重要基础科学研究与应用中,飞秒激光脉冲宽度是一个重要的光学参量,对它的测量或检测在很多实验中也是十分必要的。因此,一种简单方便有效的激光脉冲宽度测量与监测的方法与装置对于推动飞秒激光技术领域的发展与应用显得非常重要。伴随飞秒激光技术的发展,飞秒激光脉冲宽度测量技术也在不断发展。目前最为常用的方法是自相关法[参见文献 1:R. Trebino, Frequency-Resolved Optical Grating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses, (Kluwer Academic Publishers) (2000)], 频率分辨光栅 (frequency-resolved optical gating, 简称 FROG) 法[参见文献 2:R. Trebino, K. W. DeLong, D. N. Fittinghoff, J. N. Sweetser, M. A. Krumbugel, B. A. Richman, and D. J. Kane, "Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating," Rev. Sci. Instrum. 68(9), 3277-3295(1997)] 和光谱相位相干直接电场重建 (spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction, 简称 SPIDER) 法[参见文献 3:C. Iaconis and I. A. Walmsley, "Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses," Opt. Lett. 23(10), 792-794(1998).]。自相关方法原理和结构简单却不能获得飞秒激光脉冲的相位信息。FROG 和 SPIDER 方法可以获得脉冲相位。但是, FROG 与 SPIDER 方法通常需要较长时间重建脉冲。在 SPIDER 方法中, 通常需要非线性光学晶体来转换产生测量信号。由于非线性光学晶体的相位匹配条件, 这使得每台测量仪器只能适应于特定的光谱范围, 从而限制了这些方法在宽频谱范围内的应用。

[0003] 最近, 一种基于交叉偏振波 (cross-polarized wave, 简称 XPW) [参见文献 4: A. Jullien, L. Canova, O. Albert, D. Boschetto, L. Antonucci, Y. H. Cha, J. P. Rousseau, P. Chaudet, G. Cheriaux, J. Etchepare, S. Kourtev, N. Minkovski, and S. M. Saitiel, "Spectral broadening and pulse duration reduction during cross-polarized wave generation: influence of the quadratic spectral phase," Appl. Phys.

B 87(4),595-601(2007)] 用作参考光的自参考光谱干涉 (self-referenced spectral interferometry, 简称 SRSI) 方法 [参见文献 5:T. Oksenhendler, S. Coudreau, N. Forget, V. Crozatier, S. Grabielle, R. Herzog, O. Gobert, and D. Kaplan, "Self-referenced spectral interferometry," Appl. Phys. B 99(1), 7-12(2010).] 被用来测量激光脉冲。在此方法中, 仅仅需要 3 次简单迭代计算就可以很快获得测量激光的光谱和光谱相位。这是目前为止最为简单方便, 并且可以进行脉冲宽度单发测量的方法。然而, 此方法需要光学偏振元件。由于偏振光学元件也只对特定激光波长有效, 并且有一定的光谱带宽, 这样也就限制了这一方法和仪器只能在特定光谱范围内应用。偏振光学元件的色散也使其对 10fs 以下短脉冲测量的有限制。

## 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提出一种基于自衍射效应 [参见文献 6 :J. Liu, K. Okamura, Y. Kida, and T. Kobayashi, "Temporal contrast enhancement of femtosecond pulses by a self-diffraction process in a bulk Kerr medium", Opt. Express 18(21), 22245-22254(2010).] 的自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量方法, 提供一种飞秒激光脉冲形状的实时测量装置。本发明结合了 SRSI 和 FROG 两种方法及其优点, 具有速度快、简单和方便的特点, 适用于不同脉冲宽度和不同波长的飞秒激光脉冲宽度与脉冲形状的单发测量和实时测量与监测。

[0005] 本发明的技术解决方案如下:

[0006] 一种飞秒激光脉冲的实时测量方法, 特征在于该方法包括下列步骤:

[0007] 首先利用三阶非线性光学效应产生一阶自衍射激光束:

[0008] 待测激光束经过分束系统分成三束激光, 其中一束激光能量为总脉冲能量的 5% 用于测量, 另外两束激光能量相等并以一定的非共线夹角 (通常为 2° 左右) 聚焦在一块较薄 (对于石英玻璃通常为 100um) 的克尔透明非线性介质材料上产生一阶自衍射光束, 根据表达式 [参见文献 6]:

[0009]

$$I_{sd1}(\omega_{sd1}) \propto \left| \iint d\omega_1 d\omega_{-1} \chi^{(3)} E_1^*(z, \omega_1) E_{-1}^*(z, \omega_{-1}) E_1(z, \omega_{sd1} - \omega_{-1} + \omega_1) \sin c(\Delta k_z(\omega_{sd1}, \omega_1, \omega_{-1})L/2) \right|^2 \quad (1)$$

[0010] 其中:  $\omega_{sd1}$ 、 $\omega_1$  和  $\omega_{-1}$  分别为一阶自衍射光, 两束入射激光的角频率。  $\Delta k_z(\omega_{sd1}, \omega_1, \omega_{-1})$  为自衍射过程中的相位失配, L 为非线性介质材料厚度。

[0011] 根据表达式 (1), 由于三阶非线性效应, 相比于入射待测激光脉冲, 产生的自衍射激光具有更加光滑和更宽的激光光谱, 因此我们采用此自衍射激光束用作参考光束进行自参考光谱干涉 (SRSI) 飞秒激光脉冲测量 [参见文献 5]。

[0012] 在 SRSI 测量中, 我们首先将待测激光和其中任何一束一阶自衍射光 (之后叫参考光) 调节共线并且空间重合地进入高精度光谱仪。

[0013] 我们首先分别挡住待测光和参考光, 利用高精度光谱仪分别测得参考光或待测激光的单独光谱, 并且使得参考光的强度比待测激光强度强 (最好强 3 倍左右), 并且保存数据文件。

[0014] 之后,调节参考光与待测激光脉冲之间的延时,当时间延时  $\tau$  合适,在光谱仪上可以明显看见两束光的光谱干涉条纹。增大延时可以提高光谱干涉条纹密度,从而提高光谱和光谱相位的测量精度,但是这样需要更高精度光谱仪。这里,通常我们调节延时  $\tau$  使得光谱干涉条纹间隔在 2nm 左右。同时我们优化两束激光空间重合获得最大调制深度的光谱干涉条纹  $D(\omega, \tau)$ , 并且保存数据文件。测得的光谱干涉条纹  $D(\omega, \tau)$  可以表示为 [参见文献 5] :

$$\begin{aligned} [0015] \quad D(\omega, \tau) &= |E_{\text{ref}}(\omega) + E(\omega)e^{i\omega\tau}|^2 \\ [0016] \quad &= |E_{\text{ref}}(\omega)|^2 + |E(\omega)|^2 + f(\omega)e^{i\omega\tau} + f^*(\omega)e^{-i\omega\tau} \quad (2) \end{aligned}$$

[0017] 其中,  $\omega$  为激光角频率,  $S_0(\omega) = |E_{\text{ref}}(\omega)|^2 + |E(\omega)|^2$  是待测激光与一阶自衍射光信号的光谱之和;  $f(\omega) = E_{\text{ref}}^*(\omega)E(\omega)$  是两束激光的光谱干涉项。

[0018] 由于我们假设参考光谱相位已知,因此待测激光光谱和光谱相位可以通过如图 1 的傅里叶变换和迭代计算程序获得。其中,  $S_0(\tau), f(\tau)$  分别为  $S_0(\omega), f(\omega)$  傅里叶变换在时域的值。由图 1 可见,激光光谱和光谱相位的获得需要以下几个步骤:

[0019] 1、将测得的干涉光谱信号  $D(\omega, \tau)$  利用傅里叶变换到时域;

[0020] 2、采用合适的窗函数(如超高斯函数)将  $S_0(\tau), f(\tau)$  从步骤 1 得到的时域信号中分别提取出来;

[0021] 3、将步骤 2 得到的  $S_0(\tau), f(\tau)$  分别反傅里叶变换到频域分别得到  $S_0(\omega), f(\omega)$ ;

[0022] 4、利用步骤 3 得到的  $S_0(\omega), f(\omega)$ , 采用下面公式将待测激光光谱振幅  $|E(\omega)|$  与参考光光谱振幅  $|E_{\text{ref}}(\omega)|$  直接线性表示出来 [参见文献 5] :

$$[0023] \quad |E_{\text{ref}}(\omega)| = 1/2g \left( \sqrt{(S_0(\omega) + 2|f(\omega)|)} + \sqrt{(S_0(\omega) - 2|f(\omega)|)} \right) \quad (3)$$

[0024] 和

$$[0025] \quad |E(\omega)| = 1/2g \left( \sqrt{(S_0(\omega) + 2|f(\omega)|)} - \sqrt{(S_0(\omega) - 2|f(\omega)|)} \right) \quad (4)$$

[0026] 从而可以初步得到待测激光的光谱  $|E(\omega)|^2$  和参考光的光谱  $|E_{\text{ref}}(\omega)|^2$ ;

[0027] 5、通过对  $f(\omega)$  进行解相运算 ( $\arg f(\omega)$ ), 待测激光的初步的光谱相位用下面公式迭代计算出来:

$$[0028] \quad \varphi(\omega) = \varphi_{\text{ref}}(\omega) + \arg f(\omega) + C \quad (5)$$

[0029] 其中,  $\varphi(\omega)$  和  $\varphi_{\text{ref}}(\omega)$  分别为待测激光和参考光的光谱相位(初始假设为 0)。C 是分束片等色散光学元件引入的光谱相位常数,可以直接计算得到。

[0030] 6、将初步得到的激光光谱和光谱相位进行傅里叶变换,即得到待测激光脉冲的脉冲形状  $|E(t)|^2$  和脉冲宽度,  $E(t)$  为  $E(\omega)$  的傅里叶变换的值。

[0031] 7、由于参考光相位并不一定绝对等于 0,因此需要根据下面的迭代方法进一步对以上步骤进行迭代计算,优化激光光谱和光谱相位输出。迭代方法如下:

[0032] (i) 利用步骤 6 获得的脉冲形状信号,根据公式 (1) 的时域表达式得到参考光的时域电场形状为  $E(t) * |E(t)|^2$ , 对它进行反傅里叶变换即可得到参考光光谱  $|E_{\text{ref}}(\omega)|^2$  与光谱相位  $\varphi_{\text{ref}}(\omega)$ ;

[0033] (ii) 所述的参考光光谱相位代入  $\varphi(\omega) = \varphi_{ref}(\omega) + \arg f(\omega) + C$ , 即可以得到新的待测激光光谱相位, 通过对待测激光光谱相位进行傅里叶变换, 即得到待测激光脉冲的脉冲形状  $|E(t)|^2$  和脉冲宽度;

[0034] (iii) 重复步骤 (i) 和 (ii), 即得到校准的待测激光光谱与光谱相位, 进而得到校准的激光光谱, 激光脉冲形状和脉冲宽度。

[0035] 本发明飞秒激光脉冲的实时测量方法的秒激光脉冲的实时测量装置主要包括:

[0036] (a) 分束系统: 将待测激光分成三束, 其中两束用作自衍射光的产生, 另外较弱的一束光作为待测光。

[0037] (b) 自衍射过程系统: 两束激光聚焦到三阶非线性介质产生自衍射光的系统。

[0038] (c) 组束系统: 产生的自衍射光与待测激光在空间准直重合系统。

[0039] (d) 光谱测量系统: 高精度光谱仪用于测量激光光谱和干涉光谱。

[0040] 本发明飞秒激光脉冲的实时测量装置的结构为: 沿待测激光束方向依次为第一  $45^\circ$  全反镜、第一分束片和第三  $45^\circ$  全反镜, 在该第三  $45^\circ$  全反镜的反射光方向设置第四  $45^\circ$  全反镜, 在该第四  $45^\circ$  全反镜方向设置第一凹面反射镜, 在该第一凹面反射镜的反射光方向依次设置三阶非线性介质材料和挡光板, 所述的三阶非线性介质材料置于所述的第一凹面反射镜的焦点上, 在所述的三阶非线性介质材料的一阶自衍射光束方向设有第二凹面反射镜, 在该第二凹面反射镜方向设置第三分束片, 所述的一阶自衍射光束称为参考光束;

[0041] 所述的待测激光束经第一分束片分为透射光束和反射光束, 在该反射光束方向依次是第二分束片和第一光束延时器, 在该第一光束延时器的输出光束方向设置第五  $45^\circ$  全反镜, 该第五  $45^\circ$  全反镜的反射光进入所述的第一凹面反射镜;

[0042] 在第二分束片的反射光束方向设置第二光束延时器, 在第二光束延时器的输出光束方向设置第二  $45^\circ$  全反镜, 经该第二  $45^\circ$  全反镜的反射光束我们仍称为待测光束, 该待测光束透过所述的第三分束片后被第六  $45^\circ$  全反镜反射, 在该第六  $45^\circ$  全反镜的反射光方向设置小孔光阑和高精度光谱仪。高精度光谱仪, 用来测量激光光谱与干涉光谱。

[0043] 本发明具有以下显著的特点:

[0044] (a) 本发明, 获得的干涉激光光谱利用 SRSI 方法 [参见文献 5] 的线性计算公式 (3) (4) (5) 经过计算机编写的程序软件计算, 只需经过约三次的迭代计算就可以获得待测激光脉冲的激光光谱、光谱相位、脉冲形状和脉冲时域相位的信息。与在先技术相比, 本发明显著地提高了飞秒激光脉冲测量的光谱和脉冲宽度的适应范围、并且同时提高了计算速度, 可以实时监测激光脉冲形状。

[0045] (b) 本发明采用自参考光谱方法来测量激光脉冲, 响应速度快, 可以用作飞秒激光脉冲脉冲宽度的单发测量和实时监测。

[0046] (c) 本发明采用了自衍射效应产生的一阶自衍射光作为参考光, 因此可以运行在 200-3000nm 宽带范围和 10-300fs 脉冲宽度范围。

[0047] (d) 本发明还可以同时用于 SD-FROG 方法进行激光脉冲测量, 拓展了其应用范围。

## 附图说明

[0048] 图 1 是飞秒激光脉冲形状, 激光光谱和光谱相位的计算方法流程图。

- [0049] 图 2 为本发明自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量装置的系统结构框图。
- [0050] 图 3 本发明自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量装置的一个实例的光路结构图。
- [0051] 图 4 是本发明装置测量 800nm 中心波长 55fs 激光脉冲实验结果图。
- [0052] 图 5 是实例装置测量 400nm 中心波长 8fs 激光脉冲实验结果图。

### 具体实施方式

[0053] 下面结合实施例和附图对本发明作进一步说明,但不应以此限制本发明的保护范围。

[0054] 先请参阅图 1,本发明自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量方法,包括下列步骤:

[0055] 1)、利用三阶非线性光学效应产生一阶自衍射激光束:

[0056] 待测激光束 1 经过分束系统分成三束激光,其中一束激光能量为总脉冲能量的 5% 用来测量,称为待测光束,另外两束激光能量相等并以一定的非共线夹角  $2^\circ$  聚焦在透明非线性介质 12 上产生一阶自衍射光束,称为参考光束,该参考光束的光强  $I_{sd1}(\omega_{sd1})$  为:

[0057]

$$I_{sd1}(\omega_{sd1}) \propto \left| \iint d\omega_1 d\omega_{-1} \chi^{(3)} E_1^{\omega_1}(z, \omega_1) E_{-1}^{\omega_{-1}}(z, \omega_{-1}) E_1^{\omega_{sd1} - \omega_{-1} + \omega_1}(z, \omega_{sd1} - \omega_{-1} + \omega_1) \sin c(\Delta k_z(\omega_{sd1}, \omega_1, \omega_{-1})L/2) \right|^2 \quad (1)$$

[0058] 其中:  $\omega_{sd1}$ 、 $\omega_1$  和  $\omega_{-1}$  分别为参考光束,两束入射激光的角频率,  $\Delta k_z(\omega_{sd1}, \omega_1, \omega_{-1})$  为自衍射过程中的相位失配量,  $L$  为非线性介质 12 的厚度,

[0059] 2)、将所述的待测光束和参考光束调节共线并且空间重合地进入所述的高精度光谱仪 (19), 以获得最大调制深度的光谱干涉条纹  $D(\omega, \tau)$ :

[0060]  $D(\omega, \tau) = |E_{ref}(\omega) + E(\omega)e^{i\omega\tau}|^2$

[0061]  $= |E_{ref}(\omega)|^2 + |E(\omega)|^2 + f(\omega)e^{i\omega\tau} + f^*(\omega)e^{-i\omega\tau}$

[0062] 其中:  $\omega$  为激光角频率,  $S_0(\omega) = |E_{ref}(\omega)|^2 + |E(\omega)|^2$  是参考光束信号光谱与待测光束信号光谱之和;  $f(\omega) = E_{ref}^*(\omega)E(\omega)$  是参考光束信号光谱与待测光束信号光谱的干涉项;

[0063] 3)、对所述的光谱干涉条纹  $D(\omega, \tau)$  按下列步骤进行数据处理,获得激光光谱和光谱相位:

[0064] ①将所述的光谱干涉条纹  $D(\omega, \tau)$  进行傅里叶变换到时域信号,从所述的时域信号中分别提取  $S_0(\tau)$  和  $f(\tau)$ ;

[0065] ②对所述的  $S_0(\tau)$ ,  $f(\tau)$  分别进行反傅里叶变换分别得到频域  $S_0(\omega)$  和频域  $f(\omega)$ ;

[0066] ③利用所述的  $S_0(\omega)$ ,  $f(\omega)$ , 采用下列公式求参考光光谱振幅  $|E_{ref}(\omega)|$ :

[0067]  $|E_{ref}(\omega)| = 1/2 \left[ \sqrt{(S_0(\omega) + 2|f(\omega)|)} + \sqrt{(S_0(\omega) - 2|f(\omega)|)} \right]$

[0068] 和待测激光光谱振幅  $|E(\omega)|$

[0069]  $|E(\omega)| = 1/2 \left[ \sqrt{(S_0(\omega) + 2|f(\omega)|)} - \sqrt{(S_0(\omega) - 2|f(\omega)|)} \right]$



[0070] 初步的待测激光的光谱  $|E(\omega)|^2$  和参考光的光谱  $|E_{ref}(\omega)|^2$ ;

[0071] ④对所述的  $f(\omega)$  进行解相运算  $\arg f(\omega)$ , 用下列公式计算待测激光的初步的光谱相位:

[0072]

$$\varphi(\omega) = \varphi_{ref}(\omega) + \arg f(\omega) + C$$

[0073] 其中,  $\varphi(\omega)$  和  $\varphi_{ref}(\omega)$  分别为待测激光和参考光光谱相位, 初始参考光光谱相位设为 0, C 是分束片 (16) 等色散光学元件引入的光谱相位常数;

[0074] ⑤将初步得到的激光光谱和光谱相位进行傅里叶变换, 即得到待测激光脉冲的脉冲形状  $|E(t)|^2$  和脉冲宽度,  $E(t)$  为  $E(\omega)$  的傅里叶变换的值;

[0075] ⑥由于参考光相位并不一定绝对等于 0, 因此需要按下面的迭代方法进一步进行迭代计算, 优化激光光谱和光谱相位输出, 迭代方法如下:

[0076] (i) 利用步骤 5 获得的脉冲形状信号  $|E(t)|^2$ , 根据公式 (1) 的时域表达式得到参考光的时域电场形状为  $E(t) * |E(t)|^2$ , 对上述电场进行反傅里叶变换得到参考光光谱与参考光光谱相位  $\varphi_{ref}(\omega)$ ;

[0077] (ii) 将所述的参考光光谱相位  $\varphi_{ref}(\omega)$  代入公式:

[0078]  $\varphi(\omega) = \varphi_{ref}(\omega) + \arg f(\omega) + C$ , 得到新的待测激光光谱相位  $\varphi(\omega)$ , 通过傅里叶变换得到新的待测脉冲形状;

[0079] (iii)、重复以上迭代步骤 i 和 ii 三次左右, 即可以得到校准的待测激光光谱与光谱相位, 进而得到校准的激光脉冲形状和脉冲宽度。

[0080] 请参阅图 2 和图 3, 图 2 为本发明自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量装置的系统结构框图。图 3 为本发明自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量装置的一个实例的光路结构图。由图可见, 本发明所述的自参考光谱干涉飞秒激光脉冲的实时测量装置的构成包括: 沿待测激光束 1 方向依次为第一 45° 全反镜 2、第一分束片 3 和第三 45° 全反镜 8, 在该第三 45° 全反镜 8 的反射光方向设置第四 45° 全反镜 9, 在该第四 45° 全反镜 9 方向设置第一凹面反射镜 11, 在该第一凹面反射镜 11 的反射光方向依次设置三阶非线性介质材料 12 和挡光板 14, 所述的三阶非线性介质材料 12 置于所述的第一凹面反射镜 11 的焦点上, 在所述的三阶非线性介质材料 12 的一阶自衍射光束 13 方向设有第二凹面反射镜 15, 在该第二凹面反射镜 15 方向设置第三分束片 16, 所述的一阶自衍射光束 13 称为参考光束;

[0081] 所述的待测激光束 1 经第一分束片 3 分为透射光束和反射光束, 在该反射光束方向依次是第二分束片 4 和第一光束延时器 5, 在该第一光束延时器 5 的输出光束方向设置第五 45° 全反镜 10, 该第五 45° 全反镜 10 的反射光进入所述的第一凹面反射镜 11;

[0082] 在第二分束片 4 的反射光束方向设置第二光束延时器 6, 在第二光束延时器 6 的输出光束方向设置第二 45° 全反镜 7, 经该第二 45° 全反镜 7 的反射光束我们仍称为待测光束, 该待测光束透过所述的第三分束片 16 后被第六 45° 全反镜 17 反射, 在该第六 45° 全反镜 (17) 的反射光方向设置小孔光阑 (18) 和高精度光谱仪 (19)。

[0083] 所述的非线性介质 12 为任何透明材料的光学介质。

[0084] 在本实施例中, 采用如图 3 所示的装置, 对商用飞秒激光脉冲进行了脉冲宽度测量。在具体实施光路中, 待测的激光光束 1 的重复频率为 1kHz, 中心波长为 800nm。通过

1mm 厚的第一分束片 3 和第二分束片 4 后,两束分束的激光通过  $R = -700\text{mm}$  的第一镀银凹面反射镜 11 聚焦在 0.1mm 厚的熔石英玻璃 12 上。其中一束产生的一阶自衍射光 13 经过  $R = -1000\text{mm}$  的第二镀银凹面反射镜准直后,入射到第三片 1mm 厚的分束片 16 与另外一束待测激光空间重合。两束重合激光经过全反射镜 17 和小孔光阑 18 进入高精度光谱仪 19 测量激光光谱和干涉激光光谱。图 4(a) 干涉光谱(细实线)为待测激光与参考激光时间延时为 1.25ps 时测得的光谱,中间的粗实线为一阶自衍射光(参考光)的激光光谱,下面的点线为待测激光的光谱。利用测得的干涉光谱数据,采用发明内容中图 1 所示的计算方法与流程,可以计算得到待测脉冲的激光光谱与光谱相位。图 4(b) 点加空心圆圈线为光谱仪测得的待测激光光谱,粗实线为此 SD-SRSI 方法得到的激光光谱,短线为此 SD-SRSI 方法得到的激光光谱相位。

[0085] 采用类似如图 3 所示的实验装置,采用此方法对空心光纤压缩的 400nm 中心波长  $\sim 7.5\text{fs}$  的激光脉冲 [见文献 7: J. Liu, K. Okamura, Y. Kida, T. Teramoto, and T. Kobayashi, "Clean sub-8-fs pulses at 400nm generated by a hollow fiber compressor for ultraviolet ultrafast pump-probe spectroscopy," *Opt. Express* 18(20), 20645-20650 (2010).] 进行了脉冲宽度测量实验。图 5(a) 是(细实线)为待测激光与参考激光的时间延时为 400fs 时测得的干涉光谱,中间的粗实线为一阶自衍射光(参考光)的光谱,下面的点线为待测激光的光谱。所有光谱均利用 Ocean Optics 公司的 USB4000 光谱仪测得;利用测得的干涉光谱数据,采用发明内容中图 1 所示的计算方法与流程,可以计算得到待测脉冲的激光光谱与光谱相位。图 5(b) 粗实线为此 SD-SRSI 方法得到的激光光谱,短线为此 SD-SRSI 方法得到的激光光谱相位,傅里叶变换得到脉冲宽度为 7.5fs。

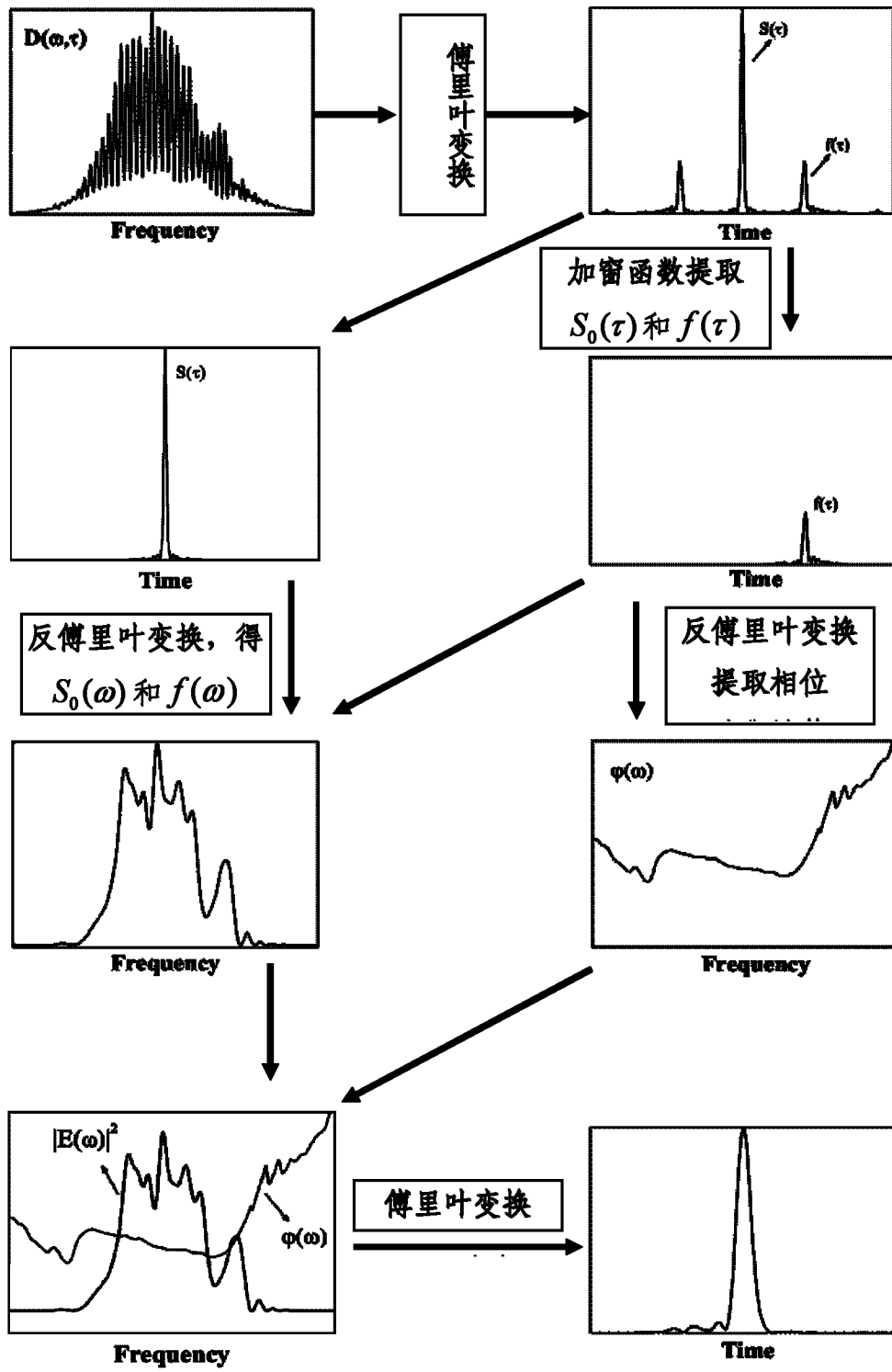


图 1

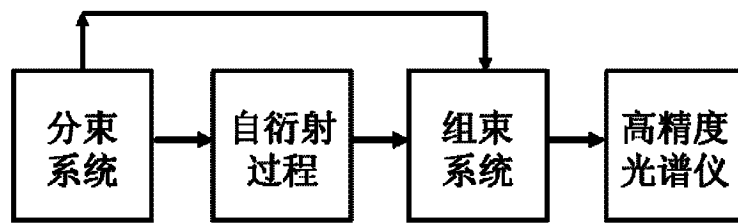


图 2

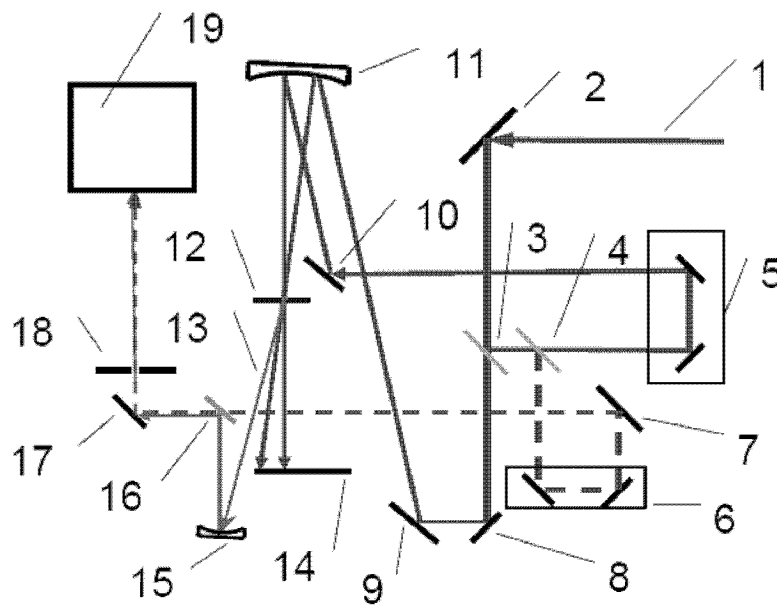


图 3

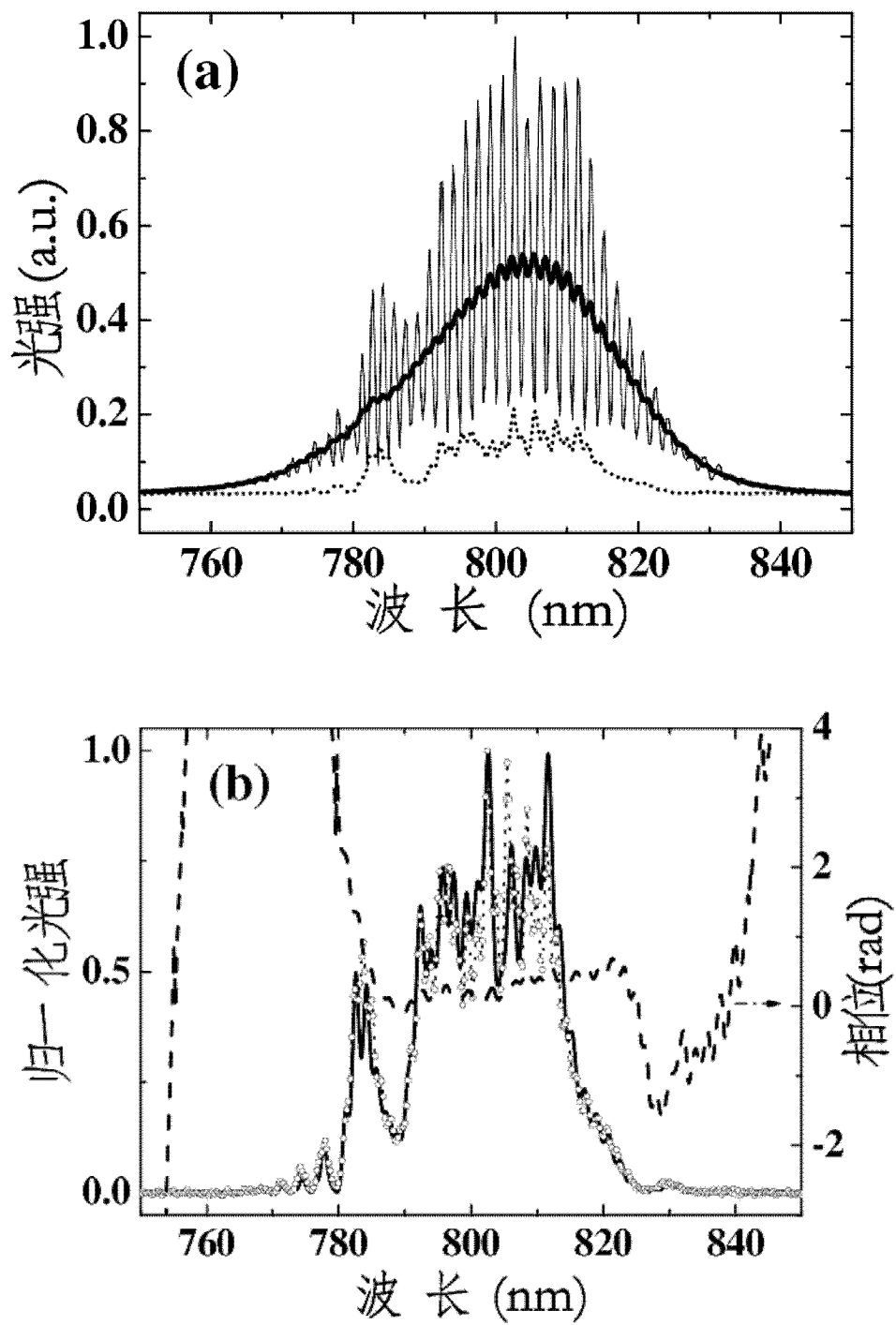


图 4

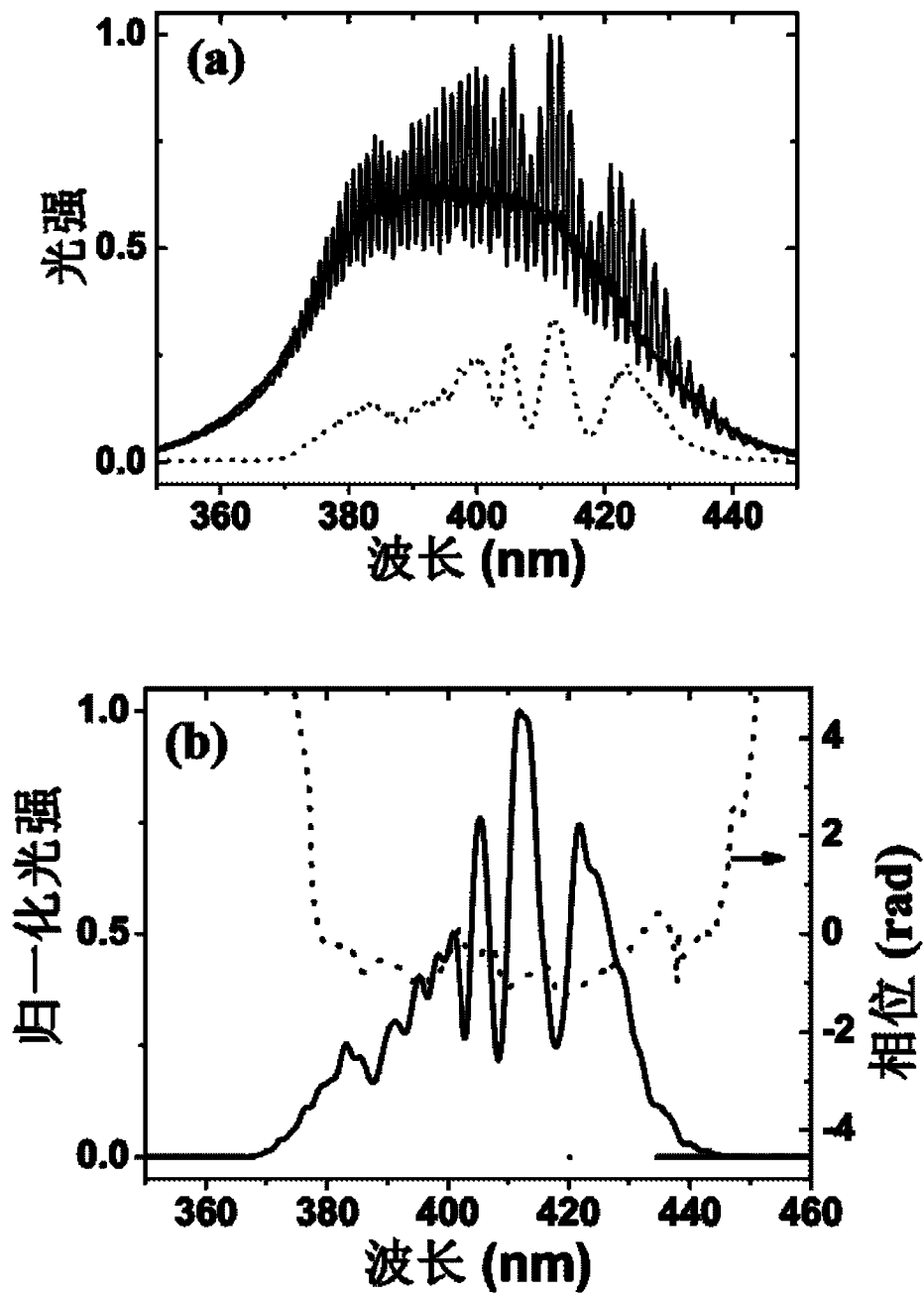


图 5