



(21)申请号 201710255847.8

G01N 21/25(2006.01)

(22)申请日 2017.04.19

(56)对比文件

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 107219002 A

CN 104316186 A, 2015.01.28, 全文.

CN 205642620 U, 2016.10.12, 全文.

US 2007/0182966 A1, 2007.08.09, 全文.

US 2011/0261363 A1, 2011.10.27, 全文.

(43)申请公布日 2017.09.29

(73)专利权人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路
1037号

审查员 魏可嘉

(72)发明人 张驰 张新亮 段玉华 陈燎

周海东 周希

(74)专利代理机构 北京众达德权知识产权代理

有限公司 11570

代理人 刘杰

(51)Int.Cl.

G01J 3/45(2006.01)

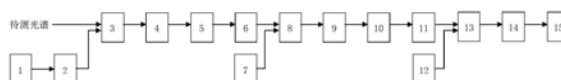
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

一种超高分辨率光谱测量方法及系统

(57)摘要

本发明公开了一种基于全光傅里叶变换及双光学频率梳时域干涉的超高分辨率光谱测量方法及系统,方法为两个光学频率梳光源产生两路具有微小重复频率差的超短脉冲序列;一路超短脉冲通过色散作用得到扫频泵浦脉冲序列,并基于四波混频原理构成时域透镜;利用时域透镜的傅里叶变换功能对待测光信号进行波长到时间的转换;所得携带了待测光谱信息的光信号通过波长统一后与另一路超短脉冲进行干涉叠加;所得干涉信号转换为电信号并经过后续处理即可得到待测光信号的光谱。本发明能实现超高的光谱分辨率,适用于测量任意形式的光信号,且有效地降低了系统成本。



1. 一种超高分辨率光谱测量方法,其特征在于,包括以下步骤:

A、产生两路具有微小重复频率差的超短脉冲序列,一路作为探测脉冲,另一路作为参考脉冲;

B、探测脉冲序列通过色散 Φ_1 作用得到携带时间二次相位的泵浦脉冲序列;

C、所得泵浦脉冲与待测光信号通过四波混频作用并滤出所产生的闲频光;

D、所得的闲频光通过色散 Φ_2 压缩,得到时域上携带待测光谱信息的光信号;

E、利用所述时域上携带待测光谱信息的光信号对一个连续波光信号进行交叉相位调制,从而将光谱信息转换到连续波光信号的相位上,且载波波长统一到所述连续波光信号波长上;

F、所得的相位上携带待测光谱信息的光信号通过光学滤波抑制其载波,得到强度上携带待测光谱信息的光信号;

G、所得的强度上携带待测光谱信息的光信号与步骤A中的所述参考脉冲序列进行叠加干涉;

H、所得的干涉信号转变为电信号后经滤波、校准和定标恢复出待测光谱信息。

2. 根据权利要求1所述的超高分辨率光谱测量方法,其特征在于:所述步骤A中的探测脉冲序列与参考脉冲序列,其脉冲重复频率差与其脉冲重复频率相比小4到5个数量级。

3. 根据权利要求1所述的超高分辨率光谱测量方法,其特征在于:所述步骤B中的色散量 Φ_1 与步骤D中的色散量 Φ_2 满足 $\Phi_2 = -\Phi_1/2$ 。

4. 根据权利要求1所述的超高分辨率光谱测量方法,其特征在于:所述步骤E中的连续波波长与所述步骤A中的参考脉冲序列载波波长的波长间隔小于参考脉冲光谱带宽的一半。

5. 根据权利要求1所述的超高分辨率光谱测量方法,其特征在于:所述步骤E中的交叉相位调制过程中,通过控制光功率使得最大非线性相移小于或等于 π 。

6. 一种超高分辨率光谱测量装置,其特征在于:包括第一光学频率梳光源,色散补偿光纤,第一光耦合器,第一高非线性光纤,第一光学滤波器,单模光纤,连续波光源,第二光耦合器,第二高非线性光纤,第二光学滤波器,光纤布拉格光栅滤波器,第二光学频率梳光源,第三光耦合器,光电探测器和实时示波器;

所述第一光学频率梳光源,用于产生超短脉冲序列作为探测脉冲;

所述色散补偿光纤,用于对探测脉冲进行色散作用,得到携带时间二次相位的泵浦脉冲序列;

所述第一光耦合器,用于将待测光信号与泵浦脉冲耦合到一起;

所述第一高非线性光纤,用于待测光信号与泵浦脉冲四波混频过程的非线性介质;

所述第一光学滤波器,用于将四波混频过程产生的闲频光滤出;

所述单模光纤,用于对产生的闲频光进行色散压缩,实现波长到时间的转换;

所述连续波光源,用于产生单一波长的连续波光信号;

所述第二光耦合器,用于将单模光纤输出的光信号与连续波光信号耦合到一起;

所述第二高非线性光纤,用于单模光纤输出光信号与连续波光信号交叉相位调制过程的非线性介质;

所述第二光学滤波器,用于滤出交叉相位调制后的连续波光信号波长处的光信号;

所述光纤布拉格光栅滤波器,用于抑制所述第二光学滤波器输出光信号的载波,实现相位信息到强度信息的转换;

所述第二光学频率梳光源,用于产生超短脉冲序列作为参考脉冲;

所述第三光耦合器,用于将光纤布拉格光栅滤波器的输出与参考脉冲耦合到一起,进行叠加干涉;

所述光电探测器,用于将干涉光信号的强度包络转换为电信号;

所述实时示波器,用于对光电探测器输出的电信号进行采样和模数转换得到数字信号,并实时显示。

7.根据权利要求6所述的超高分辨光谱测量装置,其特征在于:所述第一光学频率梳光源与第二光学频率梳光源,其重复频率分别锁定到两个稳定的射频频率上,两个射频频率的差值与其绝对频率相比小4到5个数量级。

8.根据权利要求6所述的超高分辨光谱测量装置,其特征在于:所述色散补偿光纤的色散量大小为所述单模光纤的两倍。

9.根据权利要求6所述的超高分辨光谱测量装置,其特征在于:所述连续波光源的波长与第二光学频率梳光源的中心波长之间的波长间隔小于第二光学频率梳光源光谱带宽的一半。

10.根据权利要求6所述的超高分辨光谱测量装置,其特征在于:所述光电探测器、实时示波器均为小带宽器件,其带宽与光学频率梳光源的重复频率相比拟。

一种超高分辨率光谱测量方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及光谱测量技术领域,特别涉及一种基于全光傅里叶变换及双光学频率梳时域干涉的超高分辨率光谱测量方法及系统。

背景技术

[0002] 光谱测量在化学分析、生物医学、光纤通信等诸多领域都有着广泛的应用。传统的基于空间色散的光谱分析仪需要利用色散元件的机械旋转或者线阵CCD来采集由于空间色散而分布于不同空间位置的波长信息。由于运动速度的限制,机械旋转的采集方式使得光谱测量的速度相对较慢;而线阵CCD的采集方式虽然可以大大提高测量速度,但往往会使得其测量精度有所下降。因此,传统的光谱分析仪并不适用于一些需要对光谱进行快速且精细测量的应用场合。为满足实际应用的需求,近年来许多新型的光谱测量方法相继被提出,例如大色散实时傅里叶变换(ADFT)、双光梳光谱测量、基于时域透镜波长-时间映射功能的参量光谱分析仪(PASTA)等。ADFT利用大色散光纤将输入光谱信息直接映射到时间上,并通过光探测器和实时示波器在时间轴上进行实时的测量。其结构简单且具有超快的测量特性,但由于输入信号仅限于短脉冲以及长光纤带来的巨大损耗,使得ADFT在实际应用中受到了限制。虽然结合分布式拉曼放大技术可以补偿光纤损耗,但是由于在色散作用下功率是一个发散的过程,因此其测量灵敏度较低。另一方面,随着光频梳技术的发展成熟,光频梳的模式间距以及绝对频率均可通过锁相稳定,因此其在高精度频谱测量领域得到了越来越多的应用,例如近年来受到广泛关注的双光梳光谱测量方法。双光梳光谱测量利用两路存在微小重复频率差的光学频率梳作为光源,其中一路作为探测光与样品作用后与另一路作为参考信号的光梳进行干涉,通过提取干涉信号并做傅里叶变换可以读出探测光梳光谱幅度以及相位的变化。这种光谱测量方法在测量速度、光谱分辨率、以及探测灵敏度等方面都体现出了独特的优势,并且没有色散元件的参与。但是其仅适用于测量样品的吸收光谱,因此实际应用范围具有很大的局限性。PASTA光谱分析系统利用时域透镜实现波长到时间的映射,将输入信号不同的波长分量汇聚到不同的时间位置,并利用光探测器和实时示波器探测输出脉冲从而得到输入的光谱信息。PASTA系统适用于任意波形的输入信号,且由于其波长-时间的映射是一个能量汇聚的过程,其测量灵敏度相比于ADFT得到了很大的提高。在测量速度方面,PASTA的帧速率取决于时域透镜中扫频泵浦脉冲的重复频率,典型的如100MHz;在测量精度方面,PASTA的频谱分辨率首先取决于扫频泵浦的光谱带宽以及泵浦色散大小,但最终由于光探测器以及实时示波器的带宽限制,使得PASTA的分辨率被严重劣化。此外,由于要求大带宽的探测器以及实时示波器,PASTA光谱分析系统的成本较高,其实用性受到了较大的限制。

发明内容

[0003] 本发明所要解决的技术问题是:如何低成本地实现适用于任意形式输入光信号的高精度快速光谱测量。

[0004] 为解决上述技术问题,本发明首先提出一种基于全光傅里叶变换及双光学频率梳时域干涉的超高分辨率光谱测量方法,包括以下步骤:

[0005] A、产生两路具有微小重复频率差的超短脉冲序列,一路作为探测脉冲,另一路作为参考脉冲;

[0006] B、探测脉冲序列通过色散 Φ_1 作用得到携带时间二次相位的泵浦脉冲序列;

[0007] C、所得泵浦脉冲与待测光信号通过四波混频作用并滤出所产生的闲频光,实现时域透镜功能;

[0008] D、所得闲频光通过色散 Φ_2 压缩实现波长到时间的映射,得到时域上携带待测光谱信息的光信号;

[0009] E、时域上携带待测光谱信息的光信号对一个连续波光信号进行交叉相位调制,从而将光谱信息转换到连续波光信号的相位上,且载波波长统一到所述连续光波长上;

[0010] F、所得相位上携带待测光谱信息的光信号通过光学滤波抑制其载波,实现相位信息到强度信息的转换,得到强度上携带待测光谱信息的光信号;

[0011] G、所得光信号与步骤A所述参考脉冲序列进行叠加干涉;

[0012] H、所得干涉信号转变为电信号后经滤波、校准、定标恢复出待测光谱信息;

[0013] 其中,步骤A中的探测脉冲序列与参考脉冲序列的脉冲重复频率差与其脉冲重复频率相比小4到5个数量级;

[0014] 其中,步骤B中的色散量 Φ_1 与步骤D中的色散量 Φ_2 满足 $\Phi_2 = -\Phi_1/2$ 。

[0015] 其中,步骤E中的连续波波长与步骤A中的参考脉冲序列的载波波长的波长间隔小于参考脉冲光谱带宽的一半;

[0016] 其中,步骤E中的交叉相位调制过程通过控制光功率使得最大非线性相移小于或等于 π 。

[0017] 本发明同时提出了一种基于全光傅里叶变换及双光学频率梳时域干涉的超高分辨率光谱测量装置,包括第一光学频率梳光源,色散补偿光纤,第一光耦合器,第一高非线性光纤,第一光学滤波器,单模光纤,连续光光源,第二光耦合器,第二高非线性光纤,第二光学滤波器,光纤布拉格光栅滤波器,第二光学频率梳光源,第三光耦合器,光电探测器和实时示波器;

[0018] 所述第一光学频率梳光源,用于产生超短脉冲序列作为探测脉冲;

[0019] 所述色散补偿光纤,用于对探测脉冲进行色散作用,得到携带时间二次相位的泵浦脉冲序列;

[0020] 所述第一光耦合器,用于将待测光信号与泵浦脉冲耦合到一起;

[0021] 所述第一高非线性光纤,用于待测光信号与泵浦脉冲四波混频过程的非线性介质;

[0022] 所述第一光学滤波器,用于将四波混频过程产生的闲频光滤出;

[0023] 所述单模光纤,用于对产生的闲频光进行色散压缩,实现波长到时间的转换;

[0024] 所述连续波光源,用于产生单一波长的连续波光信号;

[0025] 所述第二光耦合器,用于将单模光纤输出的光信号与连续波光信号耦合到一起;

[0026] 所述第二高非线性光纤,用于单模光纤输出光信号与连续波光信号交叉相位调制过程的非线性介质;

- [0027] 所述第二光学滤波器,用于滤出交叉相位调制后的连续光波长处的光信号;
- [0028] 所述光纤布拉格光栅滤波器,用于抑制第二滤波器输出光信号的载波,实现相位信息到强度信息的转换;
- [0029] 所述第二光学频率梳光源,用于产生超短脉冲序列作为参考脉冲;
- [0030] 所述第三光耦合器,用于将光纤布拉格光栅滤波器的输出与参考脉冲耦合到一起,进行叠加干涉;
- [0031] 所述光电探测器,用于将干涉光信号的强度包络转换为电信号;
- [0032] 所述实时示波器,用于对光电探测器输出的电信号进行采样和模数转换得到数字信号,并实时显示;
- [0033] 其中,所述第一光学频率梳光源与第一光学频率梳光源,其重复频率分别锁定到两个稳定的射频频率上,两个射频频率的差值与其绝对频率相比小4到5个数量级。
- [0034] 其中,所述色散补偿光纤的色散量为所述单模光纤的两倍。
- [0035] 其中,所述连续波光源的波长与第二光学频率梳光源的中心波长之间的波长间隔小于第二光学频率梳光源光谱带宽的一半。
- [0036] 其中,所述光探测器、实时示波器均为小带宽器件,其带宽与光学频率梳光源的重复频率相比拟。
- [0037] 本发明通过光纤中的时域傅里叶变换过程将光信号的光谱信息映射为超短光脉冲的时间位置信息,超短光脉冲精细的时间尺度保证了对待测光信号较高的光谱分辨率;而利用双光梳时域干涉技术对时间轴进行了大尺度的拉伸,从而可以通过低带宽的探测器和实时示波器对待测光谱信息直接进行探测、显示,从而大大降低了系统成本、提高了光谱分辨率。

附图说明

- [0038] 下面结合附图和具体实施方式对本发明的技术方案作进一步详细说明;但本发明的超高分辨率光谱测量方法及装置不局限于实施例。
- [0039] 图1为本发明具体实施的超高分辨率光谱测量装置结构示意图。
- [0040] 图2(a)为具有微小重复频率差且中心波长相同的两列光梳脉冲时域叠加干涉并低通滤波的结果。
- [0041] 图2(b)为其中一列光梳脉冲进行一定延时后两者的时域叠加干涉并低通滤波的结果。
- [0042] 图3(a)为待测光信号直接进行傅里叶变换得到的光谱图。
- [0043] 图3(b)为待测光信号通过本发明的测量装置得到的仿真输出结果。

具体实施方式

- [0044] 本发明的超高分辨率光谱测量方法采用如图1所示的超高分辨率光谱测量装置来具体实施,该装置包括第一光学频率梳光源1,色散补偿光纤2,第一光耦合器3,第一高非线性光纤4,第一光学滤波器5,单模光纤6,连续光光源7,第二光耦合器8,第二高非线性光纤9,第二光学滤波器10,光纤布拉格光栅滤波器11,第二光学频率梳光源12,第三光耦合器13,光电探测器14,实时示波15。

[0045] 本发明具体实施的超高分辨率光谱测量方法具体包括如下步骤:

[0046] 1) 第一光学频率梳光源采用锁模光纤激光器,产生脉宽为1ps左右、脉冲重复频率为 $f_1=100\text{MHz}$ 的超短脉冲序列。

[0047] 2) 由于第一光频梳光源产生的超短脉冲光谱带宽较大,其经过色散光纤(色散量大小为 1.1ns/nm)后的幅度响应可近似看做常数,因此色散补偿光纤输出的泵浦脉冲时域表达式可写为 $E_p(\tau) = \exp(-i\tau^2/2\Phi_1)$,其中 Φ_1 为色散补偿光纤的群时延色散。

[0048] 3) 泵浦脉冲与待测光信号 $E_{in}(\tau)$ (频域上为 $U_{in}(\omega)$)在第一非线性光纤中通过四波混频作用产生闲频光光场为 $E_i(\tau) = E_{in}^*(\tau) E_p^2(\tau) = E_{in}^*(\tau) h(\tau)$,其中 $h(\tau) = \exp(-i\tau^2/2\Phi_f)$ (傅里叶变换为 $H(\omega)$)即为时域透镜的传递函数, $\Phi_f = \Phi_1/2$ 为时域透镜的焦距色散。

[0049] 4) 产生的闲频光场经过一段色散为 $\Phi_2 = -\Phi_f$ 的单模光纤(频域传递函数为 $G_2(\omega) = \exp(i\Phi_2\omega^2/2)$)实现波长到时域的映射,得到输出光场为

[0050]

$$\begin{aligned} E_{out}(\tau) &= \mathfrak{F}^{-1}\{U_{in}^*(-\omega) \otimes H(\omega) \cdot G_2(\omega)\} \\ &= \frac{\sqrt{-i2\pi\Phi_f}}{2\pi} \times U_{in}^*\left(\frac{\tau}{\Phi_f}\right) \exp\left(\frac{i\tau^2}{2\Phi_f}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

[0051] 输出光强度为

[0052]

$$I_{out}(\tau) \propto \left| U_{in}\left(\frac{\tau}{\Phi_f}\right) \right|^2 \quad (2)$$

[0053] 从上式可以看到,输入光信号的光谱强度包络被映射到输出光信号的时域光强上,波长与时间的映射关系为

$$[0054] \quad \tau = 2\pi c \Phi_f / \lambda_0 \quad (3)$$

[0055] 其中 λ_0 为探测光梳脉冲的中心波长。因此只需要用光探测器和实时示波器就可以从时间上分辨出输入的波长信息。然而由于输出光场的光谱带宽远远超出了目前光探测器以及实时示波器的带宽范围。直接利用大带宽光探测器和实时示波器进行探测的方案一方面会使得系统分辨率劣化,同时会使得系统成本较高,而本发明利用双光梳时域干涉的原理可解决此问题。事实上,当待测光信号为单波长信号时,单模光纤将输出一个重复频率为 100MHz 的超短脉冲序列;当待测信号为多波长信号时,单模光纤将对应输出多个重复频率为 100MHz 且具有相对延时的超短脉冲序列,相对延时量则对应不同波长之间的波长差。若引入另一路重复频率为 $f_1 - \Delta f$ ($\Delta f = f_1/10^5 \sim f_1/10^4$)的光梳脉冲作为参考脉冲序列与上述输出信号进行叠加干涉,则类似于线性采样的过程,可对时间轴进行大尺度的拉伸,从而可以通过低速的探测器和实时示波器进行直接探测。如图2(a)所示为重复频率分别为 $f_1 = 100\text{MHz}$ 和 $f_2 = 99.999\text{MHz}$ 、中心波长相同的两列光梳脉冲时域叠加并低通滤波的结果,图2(b)为光梳脉冲序列1进行一定的延时后的干涉叠加并低通滤波的结果。可以看到,时间轴相当于被放大了 $f_1/\Delta f = 10^4 \sim 10^5$ 倍。

[0056] 5) 由于对于不同的待测波长,单模光纤输出的脉冲序列具有不同的中心波长。因此需要首先对单模光纤的输出信号进行波长转换,将其转换到统一的波长上。具体做法是

将单模光纤的输出信号的光强通过第二高非线性光纤中的交叉相位调制过程转换到一个连续波光光源产生的1560nm的连续光的相位上,控制光功率可以使得最大非线性相移小于或等于 π 。用中心波长在1560nm的第二光学带通滤波器滤波,并利用光纤布拉格光栅滤波器抑制掉1560nm的载波进行相位信息到强度信息的转换,从而将单模光纤的输出光信号的载波波长统一到1560nm。

[0057] 6) 第二光学频率梳光源采用锁模光纤激光器,产生脉宽为1ps左右、脉冲重复频率为 $f_2=99.999\text{MHz}$ (即 $\Delta f=1\text{kHz}$)、中心波长为1560nm的超短脉冲序列,作为参考光梳脉冲。参考脉冲与上述进行了波长统一后的光信号进行叠加干涉并用低速探测器探测干涉信号,进行低通滤波后用小带宽的实时示波器即可实时显示。

[0058] 图3(a)为待测光信号直接进行傅里叶变换得到的光谱图,图3(b)为通过本发明的测量装置得到的仿真输出结果。可以看出,本发明的一种超高精度光谱测量方法及装置可将输入波长映射为输出时间,从而对输入光谱进行准确的测量,其波长分辨率优于8pm,测量帧速率为 $\Delta f=1\text{kHz}$,同时使用小带宽的光探测器及实时示波器即可实现,系统成本大大降低。

[0059] 以上具体实施例仅用来进一步说明本发明的一种超高精度光谱测量方法及装置,本发明并不局限于实施例。应当指出,对本领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明技术原理的前提下,还可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

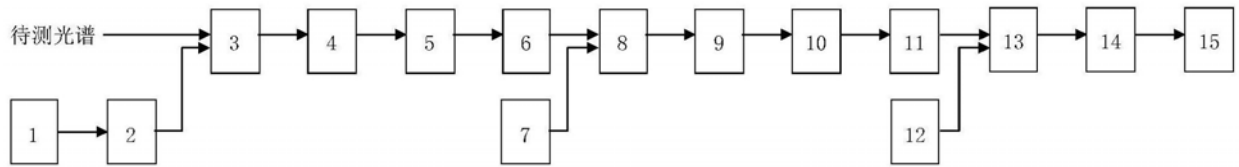


图1

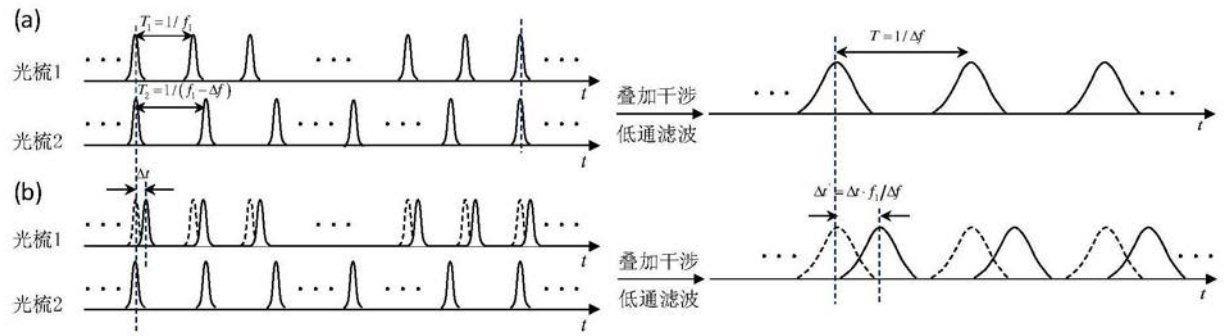


图2

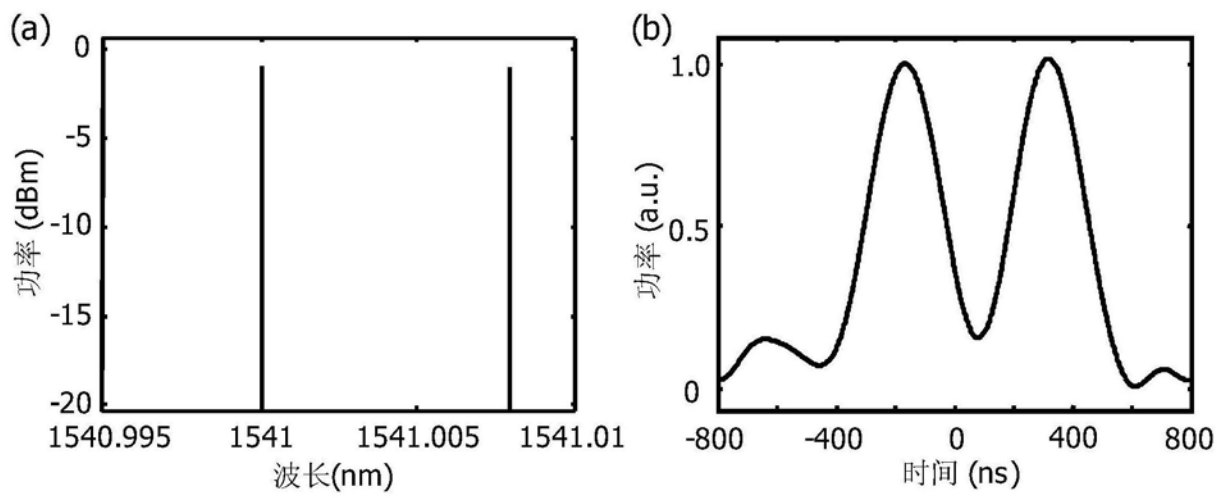


图3