

文章编号: 0258-7025(2010)06-1607-06

基于光纤器件的超短脉冲自相关仪

徐钦峰 刘 琼 叶 青* 潘政清 蔡海文 方祖捷 瞿荣辉

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学开放实验室, 上海 201800)

摘要 为了适应激光工程系统中光纤激光器和光纤器件的应用,设计研制了一种基于光纤器件超短脉冲测量的自相关仪。系统中利用了 1:1 偏振无关光纤分束器、光纤准直器、光纤偏振控制器、不同分束比的光纤耦合器和光纤隔离器等光纤元器件,以及光纤接口光谱仪。重点分析了光纤干涉仪中的光纤偏振效应、倍频器件的偏振要求和光纤准直器耦合效率等因素对自相关测量的影响,并给出了相应的解决方法。实验中对一个非线性偏振旋转光纤锁模激光器的输出脉冲宽度进行了测量,证实了光纤自相关仪的可行性。研究表明光纤自相关仪具有与光纤激光系统连接方便、结构简单、轻巧等诸多优点。

关键词 测量; 光纤自相关仪; 光纤干涉仪偏振性; 光纤锁模激光器

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1607

Auto-Correlator for Ultra-Short Pulse Laser Measurement Based on Optical Fiber Devices

Xu Qinfeng Liu Qiong Ye Qing Pan Zhengqing Cai Haiwen Fang Zujie Qu Ronghui

(Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In order to adapt fiber lasers and fiber devices to the application of laser engineering system, an auto-correlator based on the fiber devices is designed. The 1:1 fiber polarization independent beam splitter, fiber collimator, fiber polarization controller, fiber coupler with different ratios, fiber isolator, and fiber interface spectrometer are used in the system. The influence of fiber polarization effect, polarization requirement of frequency-double crystal, coupling efficiency of fiber collimator on the autocorrelation measurement are analyzed and the corresponding methods of overcoming those defects are introduced. Experimentally the output pulse width of nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser is measured and the auto-correlator is feasible. It is indicated that the fiber auto-correlator has the characteristics of convenient connection with fiber laser systems, simple and light structure and so on.

Key words measurement; fiber auto-correlator; polarization of fiber interferometer; mode-locked fiber laser

1 引 言

随着激光技术的不断发展,它在光通信、精密测量、空间技术、各种工业应用和国防应用等各个领域得到了广泛应用。在许多高技术领域,超短脉冲和超高强度的激光显示出独特的优点,具有不可取代

的应用前景。在脉冲激光技术的研究中,脉冲宽度的测量是一个基本的要求。采用体光学元件的自相关仪^[1~4],技术上已十分成熟,并进入了商品化的阶段。随着光纤技术的发展,光纤作为传输介质已经进入了超短脉冲激光的领域,包括激光核聚变这样

收稿日期: 2009-09-04; 收到修改稿日期: 2009-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(60871067)和中国科学院创新基金(CXJJ-242)资助课题。

作者简介: 徐钦峰(1981—),男,博士研究生,主要从事光纤器件和光纤激光器技术等方面的研究。

E-mail: xuqf5678@163.com

导师简介: 瞿荣辉(1972—),男,研究员,主要从事光纤器件及半导体激光器技术等方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: yeqing@mail.siom.ac.cn

的尖端科学领域。近几年来光纤激光器获得了长足的进展,不仅在输出功率、光束质量方面具有明显的优势,而且在超短脉冲和单频、可调谐等方面显示出重要的发展前景。在高功率激光系统中,人们对高质量的光纤激光器用于主振荡功率放大(MOPA)技术的种子光源寄予厚望^[5~7]。基于超短脉冲激光器和光纤技术的超连续光源,在科学前沿领域发挥了重要的作用^[8~11]。多种锁模光纤激光器及相关技术^[12~15]是近年来激光领域的研究热点之一。

光纤传输和光纤激光器在脉冲激光技术中的应用,要求发展一种与之配合的光脉冲宽度测量手段。采用体光学自相关仪,需要配置光束从光纤到透镜光学系统的耦合准直装置,增加了系统的复杂性和不稳定性。在光纤通信产业化的基础上,许多光纤器件已经获得充分的发展,商用光纤器件性能优越,价格低廉,配置方便。尤其是在光纤通信最常用的1300 nm和1550 nm波段。近几年来,由于激光技术和光纤传感技术的应用需求,800 nm波段和980~1100 nm波段的光纤和光纤器件也在发展之

中。因此,在超短脉冲自相关仪中如何利用光纤器件,是一个有意义的课题。本文建立了一个基于光纤器件和倍频(SHG)技术的自相关仪,对光纤器件带来的优缺点进行了分析,并以一个基于偏振交叉调制的锁模光纤激光器为光源,进行了相关的实验研究和性能测量。

2 光纤自相关仪的基本结构

光纤自相关仪的基本原理与体光学的自相关仪一样,基本结构包括一个臂长可调的迈克耳孙干涉仪和一个倍频晶体。图1(a)显示了自相关仪的基本光路,图1(b)为本文研制的光纤自相关仪的结构示意图。其中1:1光纤分束器a取代体光学系统中的半透半反平面镜。光纤准直器 c_1 和 c_2 取代准直透镜。带光纤尾纤的自聚焦镜 f_1 和 f_2 取代SHG前后的光学聚焦系统。由于光纤迈克耳孙干涉仪对光波的偏振态十分敏感,在系统中增加了偏振控制器 b_1 和 b_2 。这是与体光学系统相比有区别的一个重要特点。

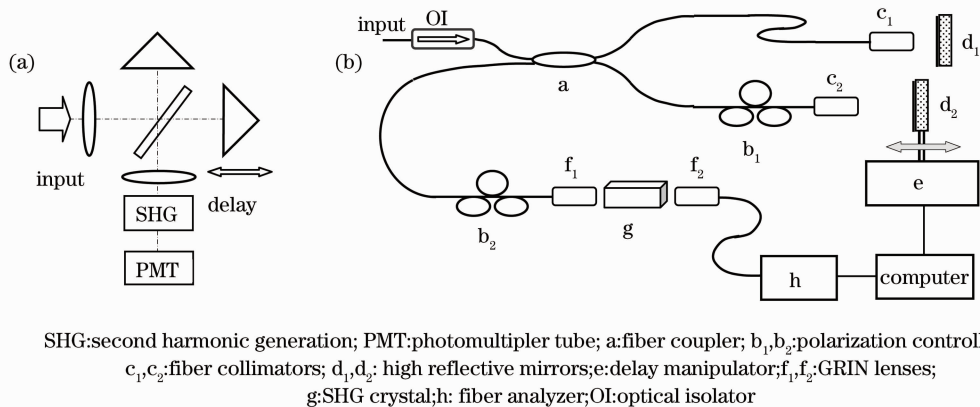


图1 (a)光脉冲自相关仪的基本结构;(b)光纤自相关仪结构示意图

Fig.1 (a) Basic structure of auto-correlator; (b) schematic structure of fiber-based auto-correlator

与体光学系统相比,光纤自相关仪具有一些重要的优点和特点:1)与被测的光纤激光系统有良好的兼容性。被测光信号可以通过光纤熔接,或采用光纤连接器直接与自相关仪相连;可以采用光纤分束器分出少量光能量进行测试、监控;也可以采用多路光开关对多路光信号进行扫描检测。2)体积小、重量轻、光路布局自由度大。常规光纤准直器输出的光束直径大致在0.5 mm量级,因此配用的高反射镜、倍频晶体都可以小型化。3)多种光纤元器件和光纤仪器都已十分成熟。比如光纤光谱仪,体积小、接口配置完备;光纤波分复用(WDM)器、滤波器和隔离器等,也都可以直接利用,且价格低廉,性

能稳定可靠。

3 光纤自相关仪的特性分析

基于光纤器件的自相关仪虽然具有吸引人的优点和特点,但是也有一些特殊的效应和问题需要研究和克服。这些效应可能对体光学系统影响不大,而对光纤系统却影响比较大。

3.1 光纤迈克耳孙干涉仪的偏振效应

光纤干涉仪中光波通过光纤传送,带来了光路连接的自由度。但是光波的偏振态在光纤中不可避免地会发生变化。光纤干涉仪的偏振效应是一个必须分析和解决的问题。假设待测的光脉冲是一个完

全偏振光,入射光脉冲可表示为

$$\mathbf{E}_0 = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \exp(i\delta) \sin \theta \end{pmatrix} A(t) \exp\{-i[\omega t + \phi(t)]\}, \quad (1)$$

式中 θ 代表光波偏振面在实验室坐标系中的方向, δ 为椭圆偏振相位角, $\phi(t)$ 为相位, $A(t)$ 为脉冲振幅包络。假设所用的光纤分束器是一个无损耗、偏振无关的定向耦合器,它对于光波场幅度的分束比记为 $i\sqrt{\kappa}$: $\sqrt{1-\kappa}$, κ 为定向耦合器的耦合系数。入射光波经耦

合器后的二路输出分别为 $\mathbf{E}_1 = i\sqrt{\kappa}\mathbf{E}_0$ 和 $\mathbf{E}_2 = \sqrt{1-\kappa}\mathbf{E}_0$ 。一般在光纤布局时避免小半径弯曲引起的双折射效应。但光纤扭转引起的偏振面旋转是难以避免的,而且它对于光波干涉的影响是直接的。考虑在迈克耳孙干涉仪两臂的偏振面旋转,及两反射镜光路的延时,并且考虑由于光路延时导致光纤准直器耦合损耗的变化,经反射后回到耦合器的光波可以表示为

$$\mathbf{E}'_1 = i\sqrt{\kappa} \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} r_1 A(t + \tau_1) \exp\{i[\omega t + \omega\tau_1 + \phi(t + \tau_1)]\}, \quad (2)$$

$$\mathbf{E}'_2 = \sqrt{1-\kappa} \begin{pmatrix} \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 \\ \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} r_2 A(t + \tau_2) \exp\{i[\omega t + \omega\tau_2 + \phi(t + \tau_2)]\}, \quad (3)$$

在光纤耦合器处,两光束相加。经过耦合器进入接收器的光波为

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = i\sqrt{\kappa(1-\kappa)}\{r_1 \mathfrak{R}_1 \Theta A(t) + r_2 \mathfrak{R}_2 \Theta A(t + \tau) \exp[i(\omega\tau + \Delta\phi)]\} \exp\{i[\omega t + \phi(t)]\}, \quad (4)$$

式中 r_1 和 r_2 代表干涉仪两反射镜的反射率和光纤准直器的耦合损耗,并且包含由于反射镜平移带来的随空间距离的变化。 Θ 为入射脉冲的琼斯矩阵, \mathfrak{R}_1 和 \mathfrak{R}_2 为两臂光纤光路上偏振面的旋转矩阵。 $\tau = \tau_2 - \tau_1$, $\Delta\phi = \phi(t + \tau_2) - \phi(t + \tau_1) = \phi(t + \tau_2 - \tau_1) - \phi(t) = \Delta\phi(\tau)$ 。干涉仪两臂的时延 $\tau = 2\Delta L/c$, ΔL 为反射镜平移距离。输出光波的强度为

$$|\mathbf{E}_{\text{out}}|^2 = \kappa(1-\kappa) \Theta \{r_1 \mathfrak{R}_1 A_1 + r_2 \mathfrak{R}_2 A_2 \exp[-i(\omega\tau + \Delta\phi)]\} \{r_1 \mathfrak{R}_1 A_1 + r_2 \mathfrak{R}_2 A_2 \exp[i(\omega\tau + \Delta\phi)]\} \Theta = \kappa(1-\kappa) \Theta \{r_1^2 A_1^2 \tilde{\mathfrak{R}}_1 \mathfrak{R}_1 + r_2^2 A_2^2 \tilde{\mathfrak{R}}_2 \mathfrak{R}_2 + r_1 r_2 A_1 A_2 [\tilde{\mathfrak{R}}_1 \mathfrak{R}_2 \exp[i(\omega\tau + \Delta\phi)] + \tilde{\mathfrak{R}}_2 \mathfrak{R}_1 \exp[-i(\omega\tau + \Delta\phi)]]\} \Theta. \quad (5)$$

由转动矩阵的性质可得: $\tilde{\mathfrak{R}}_1 \mathfrak{R}_1 = \tilde{\mathfrak{R}}_2 \mathfrak{R}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $\tilde{\mathfrak{R}}_1 \mathfrak{R}_2 = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} = \widetilde{(\mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_1)}$, 其中 $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ 为两臂光波偏振面之间夹角。并有 $\Theta \Theta = 1$ 。可得倍频前的光强

$$|\mathbf{E}_{\text{out}}|^2 = \kappa(1-\kappa) [r_1^2 A^2(t) + r_2^2 A^2(t + \tau) + 2r_1 r_2 A(t) A(t + \tau) \cos \varphi \cos(\omega\tau + \Delta\phi)]. \quad (6)$$

干涉仪输出的光波在倍频晶体上产生的二次谐波,其强度正比于入射光强的平方,

$$I_{\text{SHG}} \propto [r_1^2 A^2(t) + r_2^2 A^2(t + \tau) + 2r_1 r_2 A(t) A(t + \tau) \cos \varphi \cos(\omega\tau + \Delta\phi)]^2 = r_1^4 A^4(t) + r_2^4 A^4(t + \tau) + 2r_1^2 r_2^2 A^2(t) A^2(t + \tau) [1 + 2\cos^2 \varphi \cos^2(\omega\tau + \Delta\phi)] + 4r_1 r_2 [r_1^2 A^2(t) + r_2^2 A^2(t + \tau)] A(t) A(t + \tau) \cos \varphi \cos(\omega\tau + \Delta\phi), \quad (7)$$

当自相关仪时延步长比激光波长大得多时,需对(7)式中的干涉项作平均,得到强度自相关函数,

$$I_{\text{SHG}} \propto r_1^4 A^4(t) + r_2^4 A^4(t + \tau) + 2r_1^2 r_2^2 A^2(t) A^2(t + \tau) (1 + \cos^2 \varphi). \quad (8)$$

由(6)~(8)式可见,光纤耦合器的分束比影响干涉信号的平均光强,最佳分束比为 $\kappa = 0.5$ 。干涉仪信号的对数度与两臂平衡有关,两路光强相等可获得最佳的干涉对数度。显然,两臂偏振一致性对于相关信号有直接的影响。当两臂偏振正交时,干涉自相关信号将消失,强度自相关信号明显降低。为此在时延装置中安排了偏振控制器 b_1 , 以获得两臂一致的偏振方向。在采用偏振无关光纤耦合器的情况下,入射光偏振面相对于实验室坐标的偏振方向 θ , 以及偏振的椭圆度,对自相关信号没有影响。

偏振无关耦合器目前已经成为一种成熟的商用产品,为构建光纤自相关仪提供了条件。

由分析可见,干涉仪还有另外一路输出,将返回原入射光路。为了防止其对激光器工作状态的影响,需在干涉仪入射端口加接一个光隔离器(OI)。一般的光纤隔离器也已经商用化。

3.2 倍频晶体的偏振效应

实验采用具有高非线性系数的 KTP 晶体做倍频器件。器件外形尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$; 其晶向已经根据晶体性质和 II 类相位匹配的要求切割。入

射面对待测光脉冲的波长增透,在本实验中为 1550 nm 波段。出射面对倍频光波长(775 nm 波段)增透。II 类相位匹配要求入射光脉冲的偏振方向在晶体分解为强度相等的 o 光和 e 光。因此入射到 KTP 晶体上的光波的偏振方向需要调节,使入射的 $\omega(o)$ 和 $\omega(e)$ 两分量 $I_o = I \cos^2 \beta, I_e = I \sin^2 \beta$ 相等,即 $\beta = 45^\circ$ 。当待测的输入脉冲为椭圆偏振光或圆偏振光时,满足入射光的 o 光和 e 光两分量相等的比例将随椭圆率的降低而减小,使倍频效率降低。为此,本系统中接入了偏振控制器 b_2 ,使入射到倍频晶体 g 的光波转换成一个好的线偏振光,并且调整其方向以满足 $\beta = 45^\circ$ 的要求。当然实际操作时可以直接以倍频光的强度作为调节时的度量。

虽然 KTP 元件可以小型化,但是还需要同光纤耦合。因此在倍频器件的两端,采用了光纤准直器。在这种情况下,光波在晶体中基本上平行传输。倍频效率直接与光功率密度有关。采用一定的聚焦光学元件使光波在晶体内会聚,如带 GRIN-lens 的光纤可以提高倍频效率。但是其焦距要与晶体的尺度匹配,需要特殊设计加工。

3.3 光纤准直器的性能及影响和数据修正

在(6)式中引入的两臂参数 r_1 和 r_2 , 包含有反射镜的反射率和光纤准直器的耦合损耗两个因素。一般反射镜的反射率可以做到接近于 1。自相关仪光程时延量决定了脉冲宽度测量的范围。假如要求测量从亚皮秒到百皮秒的脉冲宽度,干涉仪移动臂的移动距离要在 10 cm 以上。常规的光纤准直器有一定的工作距离限制,超过该距离,损耗将明显增大。在工作距离范围内,耦合损耗的变化也将直接影响自相关的信号。因此,移动臂的损耗随时延变化的性质是必须考虑的因素。这一损耗变化形式与准直器所采用微光学镜头的设计和工艺有关,需要具体标定。一般地考虑,用准直的发散角衡量,这一损耗大致与工作距离 l 平方的倒数成比例。设 r_2 为移动臂,定性可表示为

$$r_2^2 \propto \frac{1}{(l+l_0)^2} \propto \frac{1}{(\tau+\tau_0)^2}, \quad (9)$$

式中 l_0 (τ_0) 是表征能保持最佳耦合效率工作距离的参数。系统设计希望干涉仪移动臂的变化范围小于 l_0 。但是实际使用距离往往会超过这一距离,这就必须考虑传输损耗的修正。(9) 式显示,耦合损耗对于两臂的相对时延不具有对称性。这一性质将使原本对称的自相关波形变为不对称。在测量比较宽的脉冲时,影响尤其明显。需要指出的是,在自相关基频光功率

[(6) 式] 和倍频光强[(7) 式] 中含有 r_2 的一次方和三次方。因此这一不对称性不能简单地用自相关波形左右作算术平均来消除。为此需要对调整好的干涉仪用连续波或宽脉冲光波进行标定,将数据存储在计算机中,然后在测试超短脉冲时逐点进行数据修正。图 2 为光纤自相关仪移动臂的光纤准直器实测的耦合损耗修正因子,其中以等臂长为参考,修正因子取为 1,可以由此修正所记录的自相关信号波形。

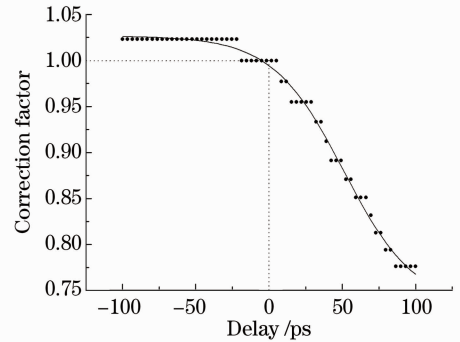
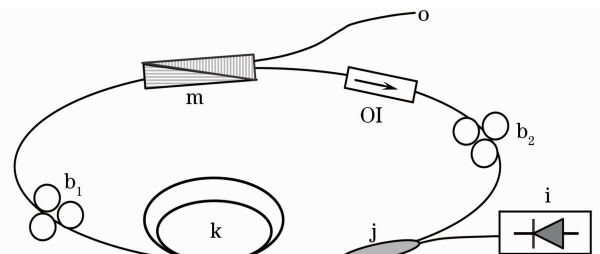


图 2 光纤准直器修正因子的实测结果

Fig. 2 Correction factor of a fiber collimator measured experimentally

4 实验结果及讨论

对建立的基于光纤器件的自相关仪,利用一个非线性偏振旋转锁模光纤激光器产生的超短脉冲进行了实验。激光器的框图如图 3 所示。该激光器采用一个光纤偏振分束器 m 作为起偏器,并兼作输出耦合器。器件中设计、熔接了一定长度的常规单模光纤,与掺铒光纤 k 的色散相抵消,使环形光路总色散接近于零。仔细调节两个偏振控制器 b_1 和 b_2 , 获得最佳的非线性偏振交叉调制效果,可获得良好的锁模工作状态。图 4(a) 为响应速率 1 GHz 的光电探测器得到的脉冲波形。可见锁模脉冲重复频率



i: 980 nm pump; j: 980/1550 nm WDM; k: erbium-doped fiber; m: polarization coupler; o: laser output

图 3 非线性偏振旋转光纤锁模激光器示意图

Fig. 3 Schematic structure of nonlinear polarization rotation fiber mode-locked laser

为11.555 MHz。图 4(b)为典型的输出光谱,3 dB 线宽为 2.04 nm,其傅里叶变换极限在 2 ps 左右。

用光电探测器直接测量难以获得准确的时间信息,必须采用自相关方法。输出平均功率为 6 mW。

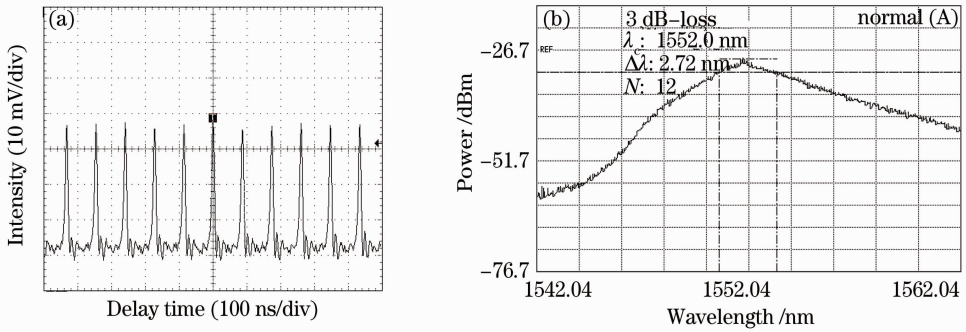


图 4 (a)输出脉冲波形;(b)输出脉冲光谱

Fig.4 Waveform (a) and spectrum (b) of output pulse

通过分析可知,激光器输出脉冲的偏振状态,对于光纤自相关仪的使用有很大影响。为此对输出激光脉冲的偏振特性进行了测量,结果如图 5(a)所示。可以看到偏振对比度为 8.2/3。用一个光纤偏

振控制器调节其偏振特性,可以得到很高的偏振对比度,检偏器正交时的输出趋于 0,如图 5(b)的曲线。这说明激光输出是一个偏振度(DOP)接近 1 的椭圆偏振光。

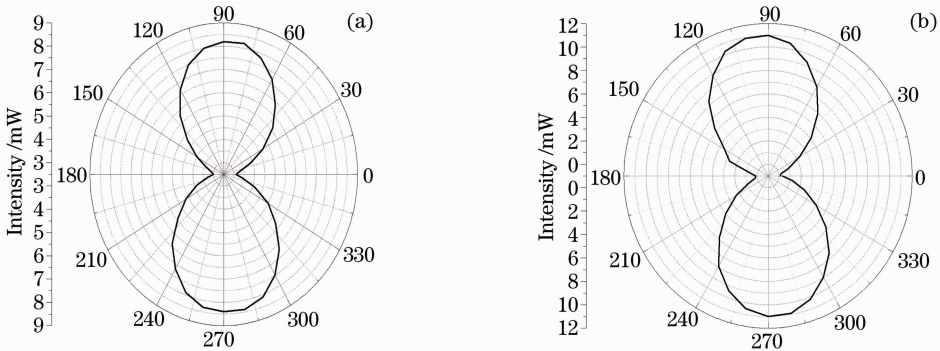


图 5 (a)输出脉冲的偏振性;(b)经过偏振控制器调整后的偏振性

Fig.5 Polarization (a) and adjusted polarization (b) of output pulse by polarimeter

利用建立的自相关仪对上述激光输出进行了测量。输出激光光谱表明,从端口 o 输出的光波中包含有很高功率的抽运光成分。为避免其对测量的影响,采用两级分束比 20 dB 的 980/1550WDM 进行分光,有效地抑制了剩余抽运光。倍频光强直接输入光纤光谱仪。将光谱仪的波长锁定在倍频波长上,可以进一步压低剩余抽运光和其他杂散光的干扰。该光谱仪配备了高灵敏度、低噪声的 CCD 探测器,并提供了计算机接口,可以对选定波长的信号进行数据处理。

形。根据波形拟合,可读出激光脉冲宽度为 1.7 ps。测量得到的自相关波形,与干涉自相关的 8:1,强度自相关的 3:1的理想情况有所偏离,这主要是由于干涉仪两臂的传输损耗尚未调整到平衡所致。

用所构建的光纤自相关仪测量了锁模激光器输出脉冲的宽度。图 6(a)给出了一个典型的自相关波形。干涉仪扫描步长为 0.001 mm,得到了干涉自相关的波形。图 6(b)显示了峰值附近的干涉波形。图 7 为扫描步长为 0.1 mm 时的强度自相关波

以上实验结果表明,光纤自相关仪可以实现超短脉冲的测量。在测量系统中利用了光纤器件,当测量脉冲的峰值功率比较高时,可以引起光纤器件的非线性效应。实验中测量的锁模光纤激光器的输出功率属于低功率的水平,没有发现非线性效应的影响。当激光脉宽进一步降低、平均功率水平提高时,可以接入光纤可调衰减器,避免光纤自相关仪本身的非线性效应对脉冲宽度测量的影响。对于自相关仪中设计的光纤器件的非线性效应的理论分析和实验研究正在进行中。

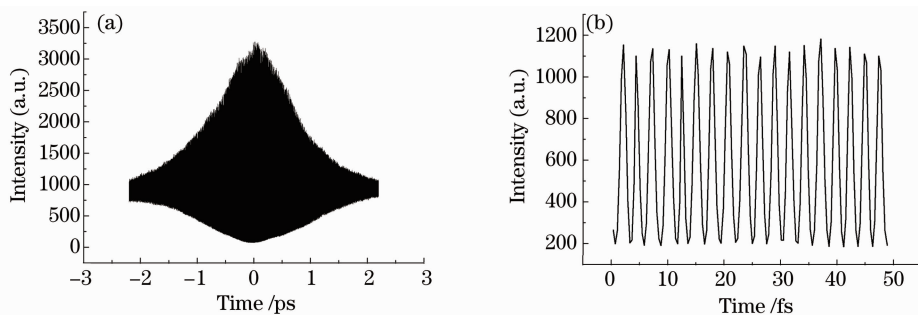


图6 (a)干涉自相关波形;(b)峰值附近的干涉条纹

Fig. 6 (a) Interference autocorrelation waveform; (b) interference waveform near peak value

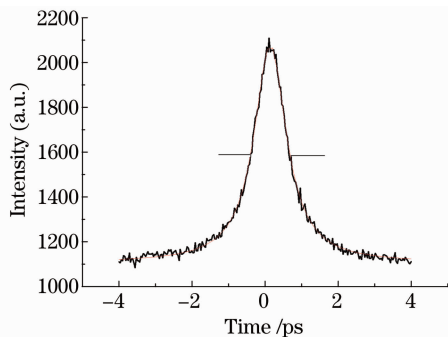


图7 强度自相关波形

Fig. 7 Intensity auto-correlation waveform

5 结 论

报道了一种基于光纤器件的自相关仪,其中利用了1:1偏振无关光纤分束器、光纤准直器、光纤偏振控制器、不同分束比的光纤耦合器和光纤隔离器等光纤元器件,以及光纤接口光谱仪。分析了光纤干涉仪的偏振效应、倍频器件的偏振要求和光纤准直器耦合效率等因素对自相关测量的影响;提出了克服这些问题的措施。利用构建的光纤自相关仪,对一个非线性偏振旋转光纤锁模激光器的输出激光脉冲进行了测量。实验表明该装置作为中低功率、皮秒和亚皮秒范围的激光脉冲的脉宽测量是可行的。该装置具有小型、灵活、与光纤激光系统兼容的优点,为以后对超短脉冲光纤激光器的超短脉冲测量提供了参考方案。同时,对测量数据进行了分析,可以得到产生脉冲的相位信息等。

参 考 文 献

- Jean-Claude M. Diels, Joel J. Fontaine, Lan C. McMichael *et al.*. Control and measurement of ultrashort pulse shapes (in amplitude and phase) with femtosecond accuracy [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(9): 1270~1283
- F. Hache, T. J. Driscoll, M. Cavallari *et al.*. Measurement of ultrashort pulse durations by interferometric autocorrelation; influence of various parameters[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(18): 3230~3236
- Wang Xingtao, Yin Dingjun, Shuai Bin *et al.*. Measure ultrashort pulse width with total reflection second-order autocorrelator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 1018~1020
- 王兴涛,印定军,帅斌等. 应用全反射二阶自相关仪测量超短脉冲脉宽[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 1018~1020
- Jinendra K. Ranka, Alexander L. Gaeta, Andrius Baltuska *et al.*. Autocorrelation measurement of 6-fs pulses based on the two-photon-induced photocurrent in a GaAsP photodiode [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(17): 1344~1346
- Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(5): 239~241
- M. Hofer, M. E. Fermann, A. Galvanauskas *et al.*. High-power 100-fs pulse generation by frequency doubling of an erbium-ytterbium-fiber master oscillator power amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(23): 1840~1842
- Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Single-mode, plane-polarized ytterbium-doped large-core fiber laser with 633-W continuous-wave output power [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(9): 955~957
- G. P. Lees, T. P. Newson. Diode pumped high power simultaneously Q-switched and self-mode-locked erbium doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(4): 332~333
- A. Hinduer, T. Chartier, M. Brunel *et al.*. Generation of high energy femtosecond pulses from a side-pump Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(21): 3389~3391
- Y. Jeong, C. Alegria, J. K. Sahu *et al.*. A 43 W C-band tunable narrow-linewidth erbium-ytterbium codoped large-core fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3): 756~758
- B. C. Collings, K. Bergman. Stable multigigahertz pulse-train formation in a short-cavity passively harmonic mode-locked erbium/ytterbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(2): 123~125
- E. A. Kuzin, B. Ibarra Escamilla, D. E. Garcia-Gomez. Fiber laser mode locked by a sagnac interferometer with nonlinear polarization rotation [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(20): 1559~1561
- Eiji Yoshida, Yasuo Kimura, Masataka Nakazawa. Laser diode-pumped femtosecond erbium-doped filter laser with a sub-ring cavity for repetition rate control [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(8): 932~934
- Zhengqing Pan, Li Meng, Qing Ye *et al.*. Repetition rate stabilization of the BBS Q-switched fiber laser by external injection [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3124~3129
- Gu Qingyuan, Hou Jing, Cheng Xiang'ai *et al.*. All-fiber passive mode-locked laser realized by semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 655~659
- 谷庆元,侯静,程湘爱等. 利用半导体可饱和吸收镜实现的全光纤被动锁模激光器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 655~659