

# 基于双折射原理的脉冲间隔连续可调的晶体分束方法

孙旭娜<sup>1</sup> 杨晓苹<sup>1</sup> 杨 勇<sup>2\*</sup> 马忠洪<sup>2</sup> 盖 琦<sup>3</sup> 徐振新<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 天津理工大学电子信息工程学院, 天津 300384  
<sup>2</sup> 南开大学现代光学研究所教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300071  
<sup>3</sup> 天津理工大学中环信息学院, 天津 300380

**摘要** 为对飞秒级超快过程进行可调曝光间隔的实时探测,需要获得共线传输的飞秒级脉冲间隔可调的子脉冲串。提出一种基于双折射原理的脉冲间隔连续可调的楔形晶体分束方法,该方法具有子脉冲能量均等、相似度高、分束结构简单紧凑且容易嵌入到光学系统中的优点。数学上推导了子脉冲脉冲间隔与晶体尺寸、结构角及移动距离的精确表达式。在晶体尺寸和结构角确定之后,子脉冲脉冲间隔随晶体移动距离呈线性变化关系。理论分析了误差项和色散等因素对分束结果造成的影响。模拟计算和干涉实验结果验证了基于双折射原理的脉冲间隔连续可调的晶体分束方法的可行性,为实现飞秒级脉冲间隔的多脉冲分束提供了借鉴。

**关键词** 全息;脉冲间隔连续可调;双折射;超短脉冲分束

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0809002

## Sub-Pulse Train Generation with Continuously Adjustable Pulse Interval Based on Birefringent Crystal

Sun Xuna<sup>1</sup> Yang Xiaoping<sup>1</sup> Yang Yong<sup>2</sup> Ma Zhonghong<sup>2</sup> Ge Qi<sup>3</sup> Xu Zhenxin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electronics Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Institute of Modern Optics, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071, China  
<sup>3</sup> College of Zhonghuan Information, Tianjin University of Technology, Tianjin 300380, China

**Abstract** To achieve real-time detection with adjustable exposure interval in ultrafast events, a triple-wedge crystal pulse splitting method with continuously adjustable pulse interval is proposed for obtaining collinear propagated sub-pulses. The generated sub-pulses have the characteristics of equal energy and high similarity. Moreover the compact structure of the triple-wedge crystal makes it easier to be embed into the optical system. The accurate relationship between the pulse interval and the structural angle, dimension and moving distance of the birefringent crystal is mathematically derived. A linear relationship exists between the pulse interval and the moving distance of the crystal at a given structural angle and crystal size. The impacts of error terms and dispersion on the pulse interval are theoretically analyzed. The feasibility of the proposed method is confirmed by mathematical analyzation and experimental results. The results will provide a reference knowledge base for multi-pulse splitting.

**Key words** holography; continuously adjustable pulse interval; birefringence; pulse splitting

**OCIS codes** 090.1995; 140.3538; 260.1440

## 1 引 言

脉冲数字全息术由于具有成像速度快,记录和

再现过程数字化等优点,成为研究超快动态过程的有力工具<sup>[1-5]</sup>。采用立体角分复用技术的脉冲数字

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(61227010)、天津市应用基础及前沿技术研究计划(11JCYBJC01400)

作者简介: 孙旭娜(1989—),女,硕士研究生,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: 835687162@qq.com

导师简介: 杨晓苹(1962—),女,博士,教授,主要从事光信息处理方面的研究。E-mail: yangxiaoping@tsinghua.org.cn

\* 通信联系人。E-mail: yangyong@nankai.edu.cn

全息术<sup>[6]</sup>,能突破超快记录过程中记录工具的帧频限制,真正地实现飞秒级的实时探测,在超快探测中,具有独特的优势。在全息记录过程中,需要将单个脉冲分束成具有飞秒至皮秒量级时间间隔的物光子脉冲序列和同样时间间隔的参考光子脉冲序列。为对飞秒级超快过程进行曝光间隔可调节的实时探测,物光分束系统的设计需要满足能够获得共线传输的飞秒级脉冲间隔可调的子脉冲串的要求。为提高实时探测的精度,需尽可能提高脉冲分束得到的子脉冲的数量。

目前对飞秒激光超短脉冲进行分束的方法中,常用的器件有分光平片<sup>[7]</sup>、分光棱镜<sup>[8]</sup>、光栅分束器<sup>[9-10]</sup>、光纤光脉冲延迟器<sup>[11]</sup>、双折射激光分束器<sup>[12]</sup>等。分光平片和分光棱镜在光学实验系统中应用广泛,使用分光平片或分光棱镜搭建延迟光路可实现分束功能,但是难以获得共线传输的子脉冲串,并且光路复杂度高、稳定性差、占用空间大、不利于嵌入到光学系统中,且能量损失较严重,另外对于分光棱镜,材料引起的色散较大。光栅分束器,利用衍射光栅实现分束,由于飞秒激光器发射的激光带宽较大,各衍射级能量分布的均匀性很难保证<sup>[13]</sup>,并且不同衍射级中由色散引起的时间和空间啁啾会随着衍射级的增大越来越大<sup>[14]</sup>。光纤光脉冲延迟器通过精确光纤长度和其他补偿方法来对光脉冲的延迟和幅度进行控制,实现难度较大<sup>[15]</sup>。现有的基于双折射原理的分束方法,是利用了晶体的双折射现象制成各种偏光棱镜,如沃拉斯顿棱镜<sup>[16]</sup>、双洛匈棱镜<sup>[17]</sup>、尼科耳棱镜<sup>[18]</sup>等,分别以不同结构实现了具有一定分束角的分束功能,但该类棱镜无法实现脉冲间隔的连续可调。

本文提出一种基于双折射原理的脉冲间隔连续

可调的飞秒激光脉冲分束方法,并且设计了一种三片楔形双折射晶体组合的分束结构,通过连续改变晶体的有效厚度,从而实现子脉冲脉冲间隔在飞秒量级连续可调。分束后得到共线传输且偏振方向在互相垂直的两个方向上的子脉冲串。该方法可实现脉冲间隔连续可调,且具有子脉冲能量均等、相似度高、结构简单紧凑、容易嵌入到光学系统中等优点。

## 2 原 理

根据双折射原理,一束线偏振光垂直入射到双折射晶体表面,当晶体光轴垂直于入射面且与入射光的偏振方向成 $45^\circ$ 角时,在晶体内部分解为两束能量相等、偏振方向互相垂直的线偏振光 $o$ 光和 $e$ 光。 $o$ 光和 $e$ 光传播方向相同,但是在晶体内的传输速度不同,因此从晶体出射后产生了与晶体厚度相关联的时间延迟<sup>[19]</sup>。

基于双折射原理的超短脉冲分束原理如图1所示。单个超短脉冲入射到第一片双折射晶体 $D_1$ 后,分束为偏振方向分别为沿着光轴的方向和垂直于光轴的方向的 $o$ 光和 $e$ 光,两脉冲脉冲间隔为 $T_1$ 。第二片双折射晶体 $D_2$ 的光轴沿顺时针旋转 $45^\circ$ 角,便能使经过第一片晶体分束后的两个脉冲进入第二片晶体再进行分束,再分束后的两个子脉冲脉冲间隔为 $T_2$ ,从而得到四个子脉冲。利用这种方法,将多片双折射晶体级联排列,可以将一个超短脉冲分成 $2^n$ 个( $n$ 为级联晶体个数)偏振方向分布在互相垂直的两个方向上的子脉冲,且有 $D_i = 2^{i-1} D_1$ 和 $T_i = 2^{i-1} T_1$ , $D_i$ 为第 $i$ 片双折射晶体的厚度, $T_i$ 为第 $i$ 次分束后得到的两个子脉冲的脉冲间隔, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

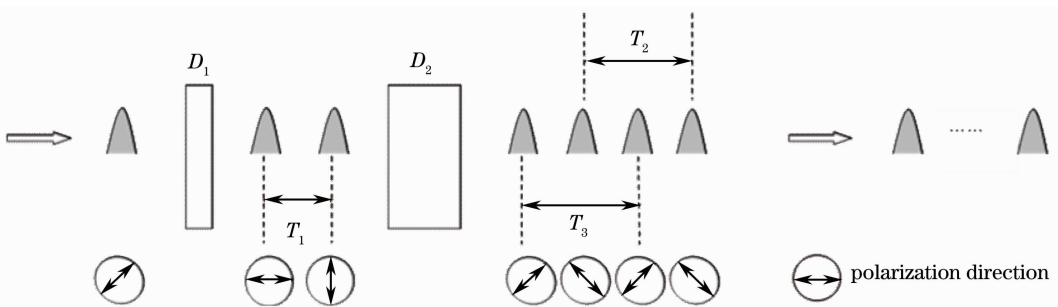


图1 脉冲分束原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulse splitting principle

以第一片晶体为例,单个脉冲分解为两个脉冲,这两个脉冲的光程差为

$$\Delta = D_1 |n_o - n_e|, \quad (1)$$

式中 $D_1$ 为第一片晶体的厚度, $n_o$ 和 $n_e$ 分别为双折射晶体中 $o$ 光和 $e$ 光的主折射率。从(1)式可看出对某种双折射晶体,脉冲间隔与晶体厚度是线性关

系,即脉冲间隔随着晶体有效厚度的增加(或减小)呈线性变化,因此,通过改变晶体的有效厚度可实现分束后子脉冲的脉冲间隔连续可调。分束原理和分光光路如图 2 所示,图 2(a)为分束原结构图,图中  $h$  为通光孔径, $C$  表示晶体的光轴方向,该结构可实现脉冲间隔连续可调,但两晶体的接触面易磨损从而

影响使用。为了避免接触面的磨损,两片楔形双折射晶体中应有一空气间隙,如图 2(b)所示。然而此空气隙会使  $o$  光和  $e$  光在竖直方向上有一定的错位量  $\Delta h$ ,且主折射率之差越大的双折射晶体,产生的错位量越大,使分束后子脉冲无法实现共线传输。

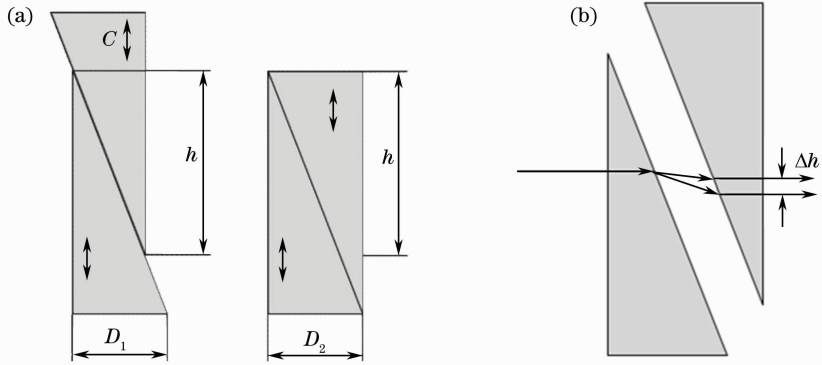


图 2 分束结构和分光光路示意图。(a)晶体厚度变化的分束结构图;(b)分光光路产生错位量的示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of pulse splitting structure. (a) Changes in the thickness of the crystal;  
(b) offsets generated by this splitting structure

为克服这一问题,获得严格共线传输的飞秒级脉冲间隔可调的子脉冲串,提出了一种基于双折射原理的脉冲间隔连续可调的飞秒激光脉冲分束方法,并且设计了一种三片楔形双折射晶体组合的分束结构,其分束结构和原理如图 3 所示,该结构分为完全相同的固定部分 1 和 3,以及可调部分 2,三个部分晶体光轴方向一致且垂直于入射面,沿着  $x$  轴方向移动部分 2 连续改变晶体的有效厚度,即可实现脉冲间隔的连续可调。 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$  是分束晶体的工作面, $S_2$  和  $S_3$ 、 $S_4$  和  $S_5$  分别互相平行, $\theta$  是晶体的结构角, $D$  是部分 1 的厚度, $H$  是部分 2 的高度, $L$  是该结构的半宽度。调节过程中,部分 2 沿  $x$  轴方向由实线位置移动到虚线位置(最大移动量为  $X$ )的过程是晶体有效厚度由最小到最大的变化过程,即  $o$  光和  $e$  光光程差由最小到最大的过程。单个超短脉冲从  $S_1$  表面垂直入射,经过部分 1,2 和 3 以及它们之间的空气间隙,从  $S_6$  表面出射,由于该结构对称,出射后的  $o$  光和  $e$  光为共线传输的子脉冲串,且三部分晶体的工作面互相分离,避免了工作面间的磨损。采用对称结构,能实现晶体有效厚度的连续变化,从而获得严格共线传输且脉冲间隔连续可调的子脉冲串。同时该结构简单紧凑、容易调整,易于嵌入到光学系统中。

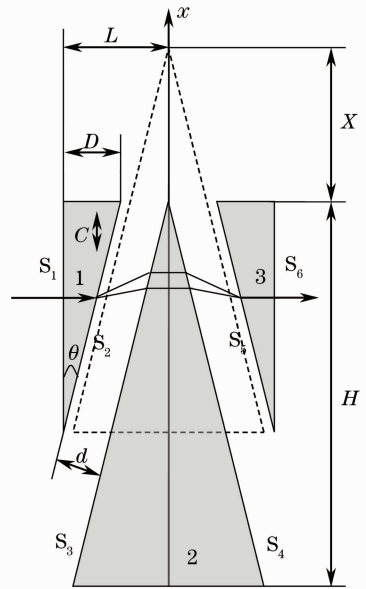


图 3 分束结构和原理示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of pulse splitting structure

相对于入射光的偏折角。由折射定律, $\theta_1$  和  $\theta_2$  可分别表示为

$$\theta_1 = \arcsin(n_o \sin \theta), \quad (2)$$

$$\theta_2 = \arcsin(n_e \sin \theta). \quad (3)$$

在分束结构中, $o$  光和  $e$  光的总光程  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  分别为

设  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为  $o$  光和  $e$  光在通过  $S_2$  表面时

$$\Delta_1 = 2 \left\{ \frac{d}{\cos \theta_1} + n_o [D + d \sin \theta (\tan \theta - \tan \theta_1) + x \tan \theta] \right\}, \quad (4)$$

$$\Delta_2 = 2 \left\{ \frac{d}{\cos \theta_2} + n_e [D + d \sin \theta (\tan \theta - \tan \theta_2) + x \tan \theta] \right\}, \quad (5)$$

式中  $d$  为部分 1,2(或者部分 2,3)间空气间隙的厚度,可由  $\theta$ 、 $D$  和  $L$  将其表示出来:

$$d = \cos \theta (L - D - x \tan \theta). \quad (6)$$

因此 o 光与 e 光的光程差  $\Delta$  为

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2. \quad (7)$$

经分束结构出射的 o 光子脉冲和 e 光子脉冲的脉冲间隔为

$$\Delta t = \frac{\Delta}{c}, \quad (8)$$

式中  $c$  为光速。

将(4)~(7)式代入(8)式可得分束后的脉冲间隔与晶体移动距离  $x$  的关系:

$$\Delta t = kx + b, \quad (9)$$

式中

$$k = \frac{1}{c} \left[ \sin 2\theta (n_o - n_e) + 2 \sin^2 \theta (n_o \tan \theta_1 - n_e \tan \theta_2) + 2 \sin \theta \left( \frac{1}{\cos \theta_2} - \frac{1}{\cos \theta_1} \right) \right], \quad (10)$$

$$b = \frac{2}{c} [(n_o - n_e)(D \cos^2 \theta + L \sin^2 \theta) + \cos \theta (L - D)(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)]. \quad (11)$$

由(9)~(11)式可见,脉冲间隔  $\Delta t$  与晶体的结构角  $\theta$  和尺寸(部分 1 的厚度  $D$  和结构半宽度  $L$ ),以及部分 2 晶体移动距离  $x$  有关。当晶体的结构角  $\theta$  和尺寸( $D$  和  $L$ ) 确定之后,脉冲间隔  $\Delta t$  随晶体移动距离  $x$  呈线性变化关系。

### 3 实验结果与分析

高温相偏硼酸钡晶体( $\alpha$ -BBO)是一种新型的双折射晶体,适用光波范围较宽,且在 520 nm 附近透过率高,吸收色散小,因此采用  $\alpha$ -BBO 晶体作为分束晶体材料。实验中使用中心波长为 1040 nm 的飞秒脉冲激光器,经倍频后的中心波长为  $\lambda=520$  nm,此波长处  $\alpha$ -BBO 晶体的主折射率为  $n_o = 1.6787$ ,  $n_e = 1.5542$ 。图 4 为实验光路,分束镜  $BS_1$  将入射的单个飞秒激光脉冲分成两个,其中一个脉冲通过反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  后进入所设计的分束结构 D,另外一个作为参考光进入延迟光路。利用精密平移台控制,可使参考光脉冲与两个物光子脉冲依次进行干涉。经合束镜  $BS_2$  合束后,通过 CCD 采集干涉图样,并记录干涉时延迟光路的位置,即精密平移台的读数。

实验中使用的  $\alpha$ -BBO 晶体的结构角  $\theta=8.5^\circ$ ,部分 1 的厚度  $D=0.8$  mm,结构半宽度  $L=9$  mm,分别代入到(9)~(11)式计算得到  $k=1.59 \times 10^{-12}$ ,  $b=663$  fs。如图 3 所示,当可调部分 2 的移动距离  $x=0$ 、7.5、15 mm 时,可求得脉冲间隔分别为 663、1606、2549 fs。实验中,依次改变移动距离  $x$ ,调整延迟光路 Delay,使得参考光子脉冲分别与 e 光和 o

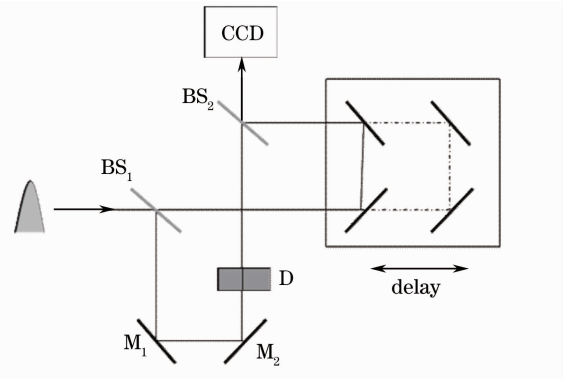


图 4 实验光路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup  
光子脉冲干涉,采集干涉图样,记录平移台读数  $S_i$  ( $i=1, 2$ )。用 CCD 记录了  $x$  取以上三个不同值时参考光脉冲分别与两个物光子脉冲的干涉结果,即三个不同的分束间隔时的六幅干涉图样,如图 5 所示。由图 5 可见,干涉图样清晰规则,说明干涉效果好。

当分束结构中部分 2 移动距离  $x=0$ 、7.5、15 mm 时,o 光和 e 光子脉冲光程差可由延迟光路移动量获得,分别为 0.75、0.48、0.198 mm,对应的物光子脉冲的脉冲间隔分别为 2500、1600、660 fs。考虑到晶体加工厚度与理论厚度有较小的偏差,实测结果与理论计算保持了良好的一致性。由实验结果可见,本文提出的分束方法可以获得共线传输的飞秒级脉冲间隔连续可调的子脉冲串。

实验中,通过分束结构 D 得到的 e 光和 o 光子脉冲的偏振方向互相垂直,且与参考光脉冲的偏振

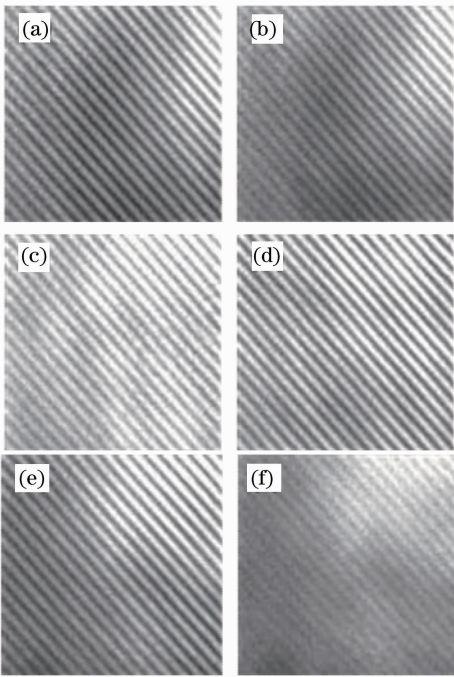


图5 实验结果。(a)  $x=0$  时,  $S_1=6.980$  mm; (b)  $x=0$  时,  $S_2=5.480$  mm; (c)  $x=7.5$  mm 时,  $S_1=6.415$  mm; (d)  $x=7.5$  mm 时,  $S_2=5.455$  mm; (e)  $x=15$  mm 时,  $S_1=6.115$  mm; (f)  $x=15$  mm 时,  $S_2=5.719$  mm

Fig. 5 Experimental results. (a)  $x=0$ ,  $S_1=6.980$  mm; (b)  $x=0$  mm,  $S_2=5.480$  mm; (c)  $x=7.5$  mm,  $S_1=6.415$  mm; (d)  $x=7.5$  mm,  $S_2=5.455$  mm; (e)  $x=15$  mm,  $S_1=6.115$  mm; (f)  $x=15$  mm,  $S_2=5.719$  mm

方向的夹角均为  $45^\circ$ 。因此,当调整延迟光路 Delay 改变参考光光程,使参考光脉冲与 e 光和 o 光子脉冲的光程分别相等时,物光子脉冲与参考光脉冲在该偏振方向上的分量的光强差最小,干涉条纹对比度最高,从而得到清晰规则的干涉图样。

实验中使用的飞秒激光器的带宽为 10 nm,当脉宽为 100 fs 的单个超短脉冲通过分束结构中的  $\alpha$ -BBO 晶体时,由色散引起的脉冲展宽量为 19 fs。脉冲展宽较小,不会引起干涉结果叠加。选定分束晶体材料后,分束结构要求晶体的三部分光轴一致,由于晶体制作过程中,可能会出现晶体的不同部分间晶体光轴存在偏差,但是当晶体光轴偏差不大时(小于  $3^\circ$ ),分束后透射比所受影响可以忽略<sup>[20]</sup>。

## 4 结 论

提出一种基于双折射原理的脉冲间隔连续可调的飞秒激光超短脉冲分束方法,该方法采用三片楔

形双折射晶体的组合结构,既可以获得严格共线传输且脉冲间隔连续可调的子脉冲串,又可以将晶体工作面分开,以防止磨损。 $\alpha$ -BBO 晶体实际制作了分束器,并进行了干涉实验。实验结果表明这一分束方法能够获得共线传输的飞秒级脉冲间隔连续可调的子脉冲串。

提出的分束方法,具有分束子脉冲能量均等、相似度高、结构简单紧凑、容易嵌入到光学系统中等优点,并且由晶体材料引起的脉冲展宽较小。将这种结构级联,可实现多脉冲分束,在超快过程探测和激光加工等领域具有很大的应用潜力。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Xiaolei, Wang Yi, Zhai Hongchen, *et al.*. Pulsed digital holographic recording of ultra-fast process of the femto-second order [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 55(9): 4613-4617.  
王晓雷,王毅,翟宏琛,等.记录飞秒级超快动态过程的脉冲数字全息技术[J].*物理学报*, 2006, 55(9): 4613-4617.
- 2 Hu Haofeng, Wang Xiaolei, Li Zhilei, *et al.*. Ultra-fast pulsed digital holographic diagnosis of ejected material in femtosecond laser ablation of aluminum [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(11): 7662-7667.  
胡浩丰,王晓雷,李智磊,等.飞秒激光烧蚀铝靶产生喷射物的超快脉冲数字全息诊断[J].*物理学报*, 2009, 58(11): 7662-7667.
- 3 Z W Liu, M Centurion, G Panotopoulos, *et al.*. Holographic recording of fast events on a CCD camera [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(1): 22-24.
- 4 Zhang Nan, Yang Jinghui, Zhu Xiaonong. Investigation of the ultrafast process of femtosecond laser ablation of highly oriented pyrolytic graphite [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0503002.  
张楠,杨景辉,朱晓农.飞秒激光烧蚀高定向热解石墨的超快过程研究[J].*中国激光*, 2012, 39(5): 0503002.
- 5 Zhang Baohui, Xu Jun, Yang Qihong, *et al.*. New process of ultrafast and ultraintense lasers based on Ti:sapphire [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 040003.  
张宝辉,徐军,杨秋红,等.基于钛宝石的超快超强激光新进展[J].*激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 040003.
- 6 Wang Xiaolei, Zhai Hongchen, Wang Yi, *et al.*. Spatially angular multiplexing in ultra-short pulsed digital holography [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(3): 1137-1142.  
王晓雷,翟宏琛,王毅,等.超短脉冲数字全息术中的立体角分复用技术[J].*物理学报*, 2006, 55(3): 1137-1142.
- 7 Hou Bixue, Chen Guofu, Fen Shan, *et al.*. Electronic holography using ultrashort laser-pulse for imaging through highly scattering media [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(3): 315-320.  
侯比学,陈国夫,丰善,等.超短脉冲激光通过高散射介质的电子学全息成像技术研究[J].*光学学报*, 1999, 19(3): 315-320.
- 8 Wang Haidong, Ma Weigang, Zhang Xin, *et al.*. Measurement of the thermal wave in metal films using femtosecond laser thermoreflectance system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(6): 3856-3862.  
王海东,马维刚,张兴,等.飞秒激光热反射系统测量金属薄膜中的热波[J].*物理学报*, 2010, 59(6): 3856-3862.
- 9 Li Guowei, Zhou Changhe, Dai Enwen. Splitting of femtosecond laser pulses by using a Dammann grating and compensation gratings [J]. *J Opt Soc Am A*, 2005, 22(4): 767-772.

- 10 Yan Xiaoyuan, Yan Xiaona, Dai Ye, *et al.*. Generation of femtosecond double pulses by two-layer volume holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1205003.  
闫晓媛, 阎晓娜, 戴 晔, 等. 利用双层体光栅产生飞秒双脉冲 [J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1205003.
- 11 Chen Yuxiao, Feng Da, Li Zheng, *et al.*. Study on the fiber-optic periodic pulse replication techniques [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(6): 604–607.  
陈宇晓, 酆 达, 李 铮, 等. 光脉冲光纤周期复制技术研究 [J]. *激光技术*, 2005, 29(6): 604–607.
- 12 Liu Xiaojun, Song Hao, Wang Yimin, *et al.*. A novel laser beam splitter [J]. *J Applied Optics*, 2008, 29(1): 31–34.  
刘晓军, 宋 浩, 王益民, 等. 一种激光平行分束器的设计 [J]. *应用光学*, 2008, 29(1): 31–34.
- 13 You Kaiming, Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Study on modulation property of broadband laser propagation in free space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 965–970.  
游开明, 文双春, 范滇元. 宽频带激光自由空间传输的调制特性研究 [J]. *光学学报*, 2006, 26(7): 965–970.
- 14 Li Guowei, Zhou Changhe, Dai Enwen. Splitting femtosecond laser pulses by using a Damman grating [C]. *SPIE*, 2004, 5642: 412–417.
- 15 Feng Da, Li Zheng, Chen Yuxiao. An optical pulse splitting-delaying device based on optical fiber and its optimization [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(2): 216–220.  
酆 达, 李 铮, 陈宇晓. 光纤光脉冲分路-延迟器及其优化研究 [J]. *中国激光*, 2005, 32(2): 216–220.
- 16 Zhu Huafeng, Nan Yujie, Yun Maojin, *et al.*. Precise analysis of the intensity splitting ratio of double wollaston prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0623002.  
朱华凤, 南玉杰, 云茂金, 等. 双沃拉斯顿棱镜光强分束比精确分析 [J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0623002
- 17 Jiang Linlin, Wu Fuquan, Xue Lin, *et al.*. Design and performance analysis of Double Rochon prism [J]. *Laser Journal*, 2011, 32(4): 1–2.  
蒋琳琳, 吴福全, 薛 林, 等. 双洛匈棱镜的设计及性能分析 [J]. *激光杂志*, 2011, 32(4): 1–2.
- 18 Wang Tao, Wu Fuquan, Ma Lili, *et al.*. Effects of Nicol prism on the intensity distribution of single-mode Gaussian light beam [J]. *Physics Experiment Ation*, 2008, 28(4): 1–5.  
王 涛, 吴福全, 马丽丽, 等. 尼科耳棱镜对单模高斯光束光强分布的影响 [J]. *物理实验*, 2008, 28(4): 1–5.
- 19 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics* [M]. Beijing: Peking University Press, 2008. 165–177.  
赵凯华, 钟锡华. *光学(下册)* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2008. 165–177.
- 20 Hao Zhaorong, Wu Fuquan, Qi Xin. Influence of optical axis vertical divergence on beam splitting property in Wollaston prism [J]. *Laser Journal*, 2011, 32(5): 8–9.  
郝兆荣, 吴福全, 齐 欣. Wollaston 棱镜晶体光轴的垂直偏差对分束特性影响分析 [J]. *激光杂志*, 2011, 32(5): 8–9.

栏目编辑: 何卓铭