

文章编号 1004-924X(2011)02-0470-05

采用光克尔快门提升激光脉冲对比度

贺俊芳¹, 吴登科¹, 王屹山¹, 朱长军², 吴真¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 西安工程大学 物理系, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了有效地提升激光脉冲对比度, 提出采用光克尔快门技术对激光主脉冲进行选通来消除主脉冲前后的噪声。将激光脉冲分成两束, 一束作为快门光控制光克尔快门, 另一束作为待选通的光脉冲, 这两束光在光克尔介质中空间交叉。调节光克尔快门的打开时间使其针对激光主脉冲进行选通, 使在光克尔快门之外的光均被阻挡, 由此有效地提升激光脉冲对比度。实验结果显示, 光克尔快门持续时间为 570 fs, 选通效率为 17%, 激光脉冲对比度提升了大约 10^4 倍, 表明采用光克尔快门选通技术能够有效地提升激光脉冲对比度。

关键词: 光克尔快门; 激光脉冲; 对比度; 选通

中图分类号: TN243 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0470

Improvement of laser pulse contrast by optical Kerr shutter

HE Jun-fang¹, WU Deng-ke¹, WANG Yi-shan¹, ZHU Chang-jun², WU Zhen¹

(1. *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of*

Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. Department of Physics, School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to improve the laser pulse contrast, an optical Kerr shutter was used to select the main pulse to restrain the noise of the main pulse. The laser was split into two beams. One of them was used as a gate light to control the optical Kerr shutter, and the other was to be cleaned. The two beams were spacial crossed in optical Kerr materials. The open time of the optical Kerr shutter was controlled to select the main pulse, while the light outs of the shutter were blocked. Therefore, the laser pulse contrast was enhanced. The experiment result showed that the duration and the transmission ratio of the optical Kerr shutter are about 570 fs and 17%, respectively and the pulse contrast has been enhanced by 10^4 times. The conclusion is that the optical Kerr shutter technology can efficiently enhance laser pulse contrast.

Key words: optical Kerr shutter; laser pulse; contrast; selection

1 引言

超短脉冲激光为人类提供了一种崭新的,与传统光源的亮度、相干性、功率密度无法比拟的光源,人类利用这种新型工具,广泛开展了激光与物质相互作用及其应用的研究,这些研究又促进了超短激光脉冲技术的飞速发展。目前,该项技术已在很多领域得到了广泛应用,如超精细加工、微光子器件制造、医学精密手术、高密度三维光存储、纳米生物工程、纳米医学等^[1-3]。激光应用的拓展对激光性能提出了更高的要求,其中激光脉冲对比度就是一个很重要的参数,例如在激光打靶实验中,需要稳定、高对比度的激光脉冲,如果激光脉冲“不纯”,相对主脉冲很小的预脉冲或者次脉冲就会在主脉冲到达之前造成靶的破裂和预电离,对实验结果产生严重的影响。过去认为只有在强场物理领域应用时,激光脉冲对比度才很重要;但最近发现,即使在中等功率密度的应用,如飞秒激光微加工,激光脉冲对比度对实验结果的影响也非常明显,也需要“干净”的超短激光。因此,科学家们一直在探索获得高对比度的“干净”激光脉冲的方法,如利用晶体产生交叉偏振波的方法^[4-7]、双啁啾脉冲放大技术^[8]以及利用光在气体填充的中空波导中传输时非线性椭圆旋转的方法^[9]等均可将激光脉冲对比度提升几个数量级。本文提出采用光克尔快门技术来提高激光脉冲对比度。

早在1964年Mayer和Gires首次观察到光克尔效应^[10],1969年Duguay等人发明了超短脉冲激光驱动的光克尔快门^[11],由于光克尔效应在各种介质中都能够发生,并且不受光谱的限制,而且光克尔快门结构简单,因此受到了科学家们的青睐。现今光克尔快门已经广泛应用到超快现象研究中,如瞬时光学、光吸收、光电导、光成像等^[10-14]。本文采用CS₂作为光克尔介质,研究了光克尔快门的持续时间和选通效率,实验验证了采用光克尔快门技术能够有效地提升激光脉冲对比度。

2 实验研究

2.1 光克尔快门工作原理

1964年,Mayer和Gires提出,大功率的偏振

光脉冲入射到玻璃上可以产生线性双折射。假设有一束频率为 ω 的光波场作用在介质上的同时还有另一束频率 ω' 的强光作用在该介质,那么 ω' 的光会影响介质对 ω 的作用。这是因为通过三阶非线性效应,在频率 ω 上产生了与频率为 ω' 的光的场强平方有关的三阶非线性电极化强度。

与 ω' 光偏振方向相平行和垂直的 ω 光的折射率 $\eta(\omega)$ 的改变量分别为 $\Delta\eta_{//}(\omega)$, $\Delta\eta_{\perp}(\omega)$,表示如下:

$$\Delta\eta_{//}(\omega) = \frac{3\omega}{4kc} E^2(\omega') \chi_{yyyy}^3(\omega, \omega', -\omega'), \quad (1)$$

$$\Delta\eta_{\perp}(\omega) = \frac{3\omega}{4kc} E^2(\omega') \chi_{xxyy}^3(\omega, \omega', -\omega'), \quad (2)$$

这两束光通过介质时会产生相位差:

$$\delta = 2\pi l(\Delta\eta_{//} - \Delta\eta_{\perp})/\lambda. \quad (3)$$

式中 $E(\omega')$, k , c , l , λ 分别为 ω' 光的场强、玻尔兹曼常数、真空光速、在光克尔介质中 ω 和 ω' 光的作用长度、 ω 光对应的波长; $x_{yyyy}^3(\omega, \omega', -\omega')$ 和 $\chi_{xxyy}^3(\omega, \omega', -\omega')$ 是三阶电极化张量。因此 ω 光通过介质后它的偏振方向发生了改变,从式(1)到式(3)可以看出,对于给定频率的 ω 光,相位差与 $E(\omega')$ 和 l 有关。

1969年Duguay等人发明了超短脉冲激光驱动的光克尔快门,它是将一个光克尔介质置于偏振方向垂直的两个偏振器之间构成的,其选通工作原理如图1。信号光经过起偏器1成为线偏振光,透过光克尔介质,再经过一个检偏器(偏振方向与起偏器1的偏振方向正交),起偏器1、光克尔介质、检偏器就构成了一个光克尔快门;一个强的快门光经过起偏器2成为线偏振光,偏振方向与起偏器1的偏振方向成45°,入射到光克尔介质,并与信号光在介质内空间交叉。当没有快门光的时候,因为信号光经过两个正交放置的偏振器,因此没有光通过光克尔快门;当有快门光时,信号光的偏振方向发生变化,由线偏振光变成椭圆偏振光,这样就有一部分光通过检偏器。

如果采用超短激光脉冲作为快门光,光克尔快门就是一个瞬时快门,这样只有在光克尔快门瞬间打开时信号光能够通过,其余的光都被抑制了。

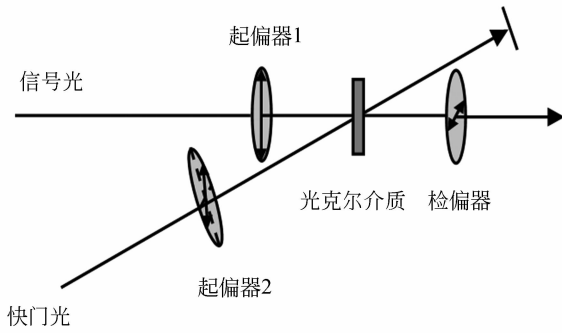


图 1 光克尔快门工作示意图

Fig. 1 Diagram of optical Kerr shutter

2.2 激光脉冲对比度提高的实验研究

根据上面的光克尔快门工作原理分析,建立了基于光克尔快门技术提升激光脉冲对比度的实验系统,如图 2 所示。再生放大器(Spectra Physics Inc.)输出的 800 nm, 300 mW, 1 kHz, 260 fs 激光脉冲通过一个 10 : 1 的分束镜分成两束:较弱的一束作为信号光,通过起偏器 1、反射镜 1 和 2 后,由透镜聚焦到 1 mm 厚的光克尔介质 CS_2 上,再经过检偏器到达探测器,起偏器 1 和检偏器的偏振方向相互垂直;另一束为快门光,经过起偏器 2、光延时线、反射镜 3,同样由透镜聚焦到 CS_2 上,随后的透射光到达挡光板,起偏器 2 与起偏器 1 的偏振方向成 45° 。这两束光在 CS_2 介质内空间交叉,光克尔快门开启时间由光延时线控制。

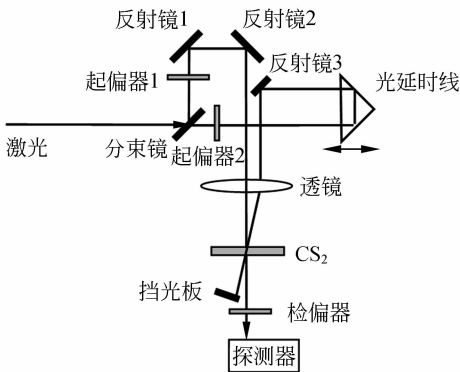
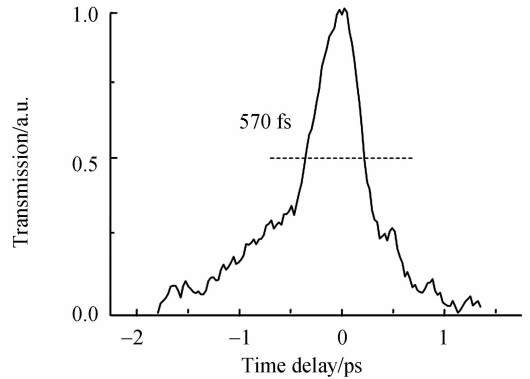


图 2 基于光克尔快门提升激光脉冲对比度的实验示意图

Fig. 2 Experiment scheme of enhancing laser pulse contrast based on optical Kerr shutter

由于实验中采用超短激光脉冲作为快门光,光克尔快门是瞬间打开的,这样就只有这一瞬间

到达光克尔介质的信号光可以透过检偏器,因此透过的信号光受到光克尔快门持续时间和选通效率的影响,这个持续时间由 CS_2 线性折射率弛豫时间和激光脉冲宽度决定。采用泵浦探测的方法探测 CS_2 的线性折射率弛豫时间,如图 3 所示,曲线的半高全宽是 570 fs,而激光脉宽为 260 fs,因此光克尔快门的持续时间为 570 fs。由式(1)到式(3)可知,透过的信号光受到快门光强的影响,图 4 给出了光克尔快门选通效率与快门光强的关系,选通效率是透过光克尔快门前、后的信号光强度之比。从图 4 看出,随着快门光的增强,选通效率呈线性增加,当到达光克尔介质的快门光增加到 55 mW 时,透过信号光趋于饱和。实验观察发现,这时快门光在 CS_2 产生了多种非线性效应,并产生“白光”,因此实际上虽然快门光增强了,但是用以产生光克尔效应的这部分光强并没有增大,而是被以其他形式的非线性效应消耗了。这可能是由于飞秒光脉冲峰值功率密度高造成的,对于皮秒光脉冲应该有更高的饱和阈值。

图 3 CS_2 线性折射率弛豫动力学(半高全宽 570 fs)
Fig. 3 Relaxation dynamic of linear refraction of CS_2
(FWHM is 570 fs)

为了验证光克尔快门提升激光脉冲对比度的性能,本文针对激光主脉冲进行选通来提升激光脉冲对比度,人为地在信号光的主脉冲前引入一个“噪声”。在信号光路中插入两片反射率为 50% 的反射镜,这样就在主脉冲之前产生了一个较弱的脉冲。用二阶相关仪对光克尔快门选通前、后的激光脉冲进行探测,探测时将选通前的激光功率加衰减片衰减到与选通后功率一样。实验结果如图 5 所示,实线、虚线分别是选通前、后的激光脉冲,实线中间的脉冲为主脉冲,前面的脉冲是噪声脉冲,后面的脉冲是相关仪产生的,并不是

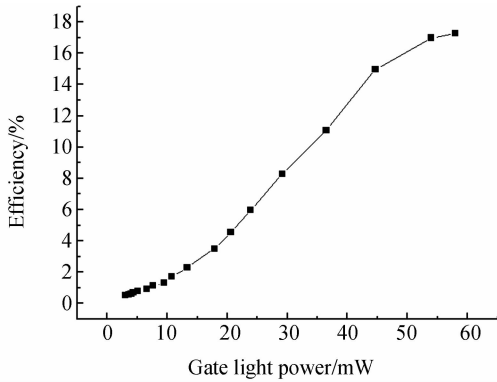


图4 光克尔快门选通效率和快门光的关系

Fig. 4 Relation between the gated efficiency of optical Kerr shutter and gate light power

激光脉冲本身有的;选通后的激光脉冲噪声脉冲完全探测不到了,说明激光脉冲经过光克尔快门瞬时选通后有了很大的改善。实验中偏振器的消光比为 2×10^5 ,光克尔快门的选通效率为 17%,因此理论计算激光脉冲消光比可以提升 10^4 倍。但是因为采用的二阶相关仪的动态范围是 10^3 ,所以无法把更高对比度的激光脉冲真实地反映出来,图 5 中显示虚线,除了主脉冲,其余的完全是相关仪本身的电噪声,光噪声没有探测到。更高动态范围的探测仪器能够更真实地反映选通后激光脉冲的对比度,但无论如何,实验结果和理论分

析都说明光克尔快门技术能够有效提升激光脉冲对比度。

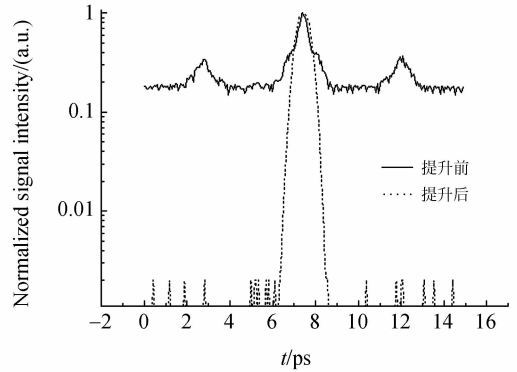


图5 激光脉冲对比度提升前、后的比较

Fig. 5 Comparison between the laser pulse contrasts before and after enhancing

3 结 论

本文提出采用光克尔快门技术来提升激光脉冲对比度。以 CS_2 作为光克尔介质,研究了光克尔快门的持续时间和选通效率,结果表明,光克尔快门的持续时间和选通效率分别为 570 fs 和 17%,激光脉冲对比度提升了 10^4 倍,显示光克尔快门技术能够有效提升激光脉冲对比度。

参考文献:

[1] 曾毅波,蒋书森,黄彩虹,等.激光共焦扫描显微镜在微机电系统中的应用[J].光学精密工程,2008,16(7):1241-1246.
ZENG Y B,JIANG SH S,HUANG C H, et al.. Application of laser scanning confocal microscope in micro-electro-mechanical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(7):1241-1246. (in Chinese)

[2] 王洪建,肖沙里,施军,等.激光等离子体 X 射线极化光谱研究[J].光学精密工程,2008,16(5):822-826.
WANG H J,XIA SH L,SHI J, et al.. X-ray polarization spectroscopy in laser-produced plasmas [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(5):822-826. (in Chinese)

[3] 龚小竞,褚家如,杨建军,等.改进的飞秒激光加工微型光波导方法[J].光学精密工程,2007,15(1):27-32.

GONG X J,ZHU J R,YANG J J, et al.. An improved way for fabricating micro-waveguide by femtosecond laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(1):27-32. (in Chinese)

[4] CHVYKOV V,ROUSSEAU P, REED S, et al.. Generation of 1011 contrast 50 TW laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2006,31(10):1456-1458.

[5] LORENZO C,STOYAN K,NIKOLAY M, et al.. Efficient generation of cross-polarized femtosecond pulses in cubic crystals with holographic cut orientation[J]. *Applied Physics Letters*, 2008,92(23):1102-1104.

[6] KOURTEV S,MINKOVSKI N,CANOVA L, et al.. Improved nonlinear cross-polarized wave generation in cubic crystals by optimization of the crystal orientation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009,26(7):1269-1275.

[7] JULLIEN A,ALBERT O,BURGY F, et al.. 10^{-10} temporal contrast for femtosecond ultraintense lasers by cross-polarized wave generation[J]. *Optics*

- Letters*, 2005,30(8):920-922.
- [8] KALASHNIKOV M P, RISSE E, SCHÖNNAGEL H, *et al.*. Double chirped-pulse-amplification laser: a way to clean pulses temporally[J]. *Optics Letters*, 2005,30(8):923-925.
- [9] ALBRECHT H S, HEIST P, KLEINSCHMIDT J, *et al.*. Pulse contrast enhancement of high-energy pulses by use of a gas-filled hollow waveguide[J]. *Appl. Phys. B*, 1992,55:362-364.
- [10] MAYER G, GIRES F. Action d'une onde lumineuse intense sur l'indice de refraction des liquids [J]. *Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris)*, 1964, 258:2039-2042.
- [11] DUGUAY M A, HANSEN J W. An ultrafast light gate[J]. *Applied Physics Letters*, 1969, 15(6): 192-194.
- [12] KAORU M T. Three-dimensional imaging using a femtosecond amplifying optical Kerr gate[J]. *Opt. Eng.*, 1999,38(10):1758-1762.
- [13] WANG P P H, ALFANO R R. Time-resolved Fourier spectrum and imaging in highly scattering media [J]. *Applied Optics*, 1993,32(26):5043-5048.
- [14] WANG L, HO P P. Ballistic 2-D imaging through scattering walls using an ultrafast optical Kerr gate [J]. *Science*, 1991,253(5021):769-771.

作者简介:

贺俊芳(1971—),女,山西临汾人,博士,副研究员,分别于1996年、1999年在中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士、博士学位,现在中国科学院西安光学精密机械研究所工作,主要从事超快光谱和激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: amilyhj@163.com 13571978590

吴登科(1984—),男,陕西户县人,博士研究生,2006年于西北工业大学获得光信息科学与技术专业学士学位,2006年于中国科学院西安光学精密机械研究所开始硕博连读,就读专业为光学,主要从事超快光子技术与应用方面的研究。E-mail: wudengke@opt.ac.cn

王屹山(1970—),男,甘肃定西人,研究员,博士生导师,1993年于西北师范大学获得学士学位,1996年和2000年在中国科学院西安光学精密机械研究所分别获得硕士学位和博士学位,现为中科院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室研究员,主要从事光纤超短脉冲激光技术及工程化应用方面的研究。E-mail: yshwang@opt.ac.cn

朱长军(1964—),男,湖南省郴州市人,博士,教授,1992年于西北大学获得硕士学位,1998年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位,现在西安工程大学理学院物理系工作,主要从事超快激光、光电子学方面的研究。E-mail: cjzhu@xpu.edu.cn

吴真(1986—),女,四川内江人,硕士研究生,2008年于海南师范大学获得学士学位,2008年开始在四川大学攻读硕士学位,现在中国科学院西安光学精密机械研究所从事高动态范围的时间分辨探测成像技术的研究。E-mail: wuzhen1333@163.com