

基于超快光克尔效应的超短脉冲光限幅器

宋洪磊 闫理贺* 司金海 侯 洵

西安交通大学电子与信息工程学院陕西省信息光子技术重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 超短脉冲激光因其独特的传播性质,在光电对抗领域具有重要的应用潜力。针对传统光限幅器件在超短脉冲激光限幅防护领域中存在的若干问题,提出一种基于超快光克尔效应的超短脉冲光限幅器。该限幅技术利用超短脉冲在非线性介质中诱导非线性偏振椭圆旋转(NER)效应,可实现超低阈值的光限幅输出,同时将非线性偏振椭圆旋转和自聚焦效应相结合,可保证器件在较大动态能量范围内具备限幅功能,该器件具备响应速度快、适用光谱范围宽的优点。系统阐述了NER效应的基本原理,并利用飞秒脉冲激光验证了基于NER和自聚焦效应的光限幅器的限幅性能。

关键词 非线性光学; 光限幅; 超短脉冲; 光克尔效应

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0217002

Optical Limiter for Ultrashort Laser Pulses Baesd on Ultrafast Optical Kerr Effect

Song Honglei Yan Lihe Si Jinhai Hou Xun

Shaanxi Key Laboratory of Photonics Technology for Information, School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract Ultrashort pulse laser has important potential applications in the field of optoelectronic countermeasure because of its unique propagation features. An ultrafast optical limiter based on optical Kerr effect for ultrashort laser pulses is proposed on account of the problems in the traditional optical limiting (OL) method. The proposed OL technique utilizes the nonlinear polarization ellipse rotation (NER) effect induced in nonlinear materials to realize an excellent OL performance with ultra-low activating threshold. By combining NER and self-focusing effects, the proposed optical limiter can be used in a large dynamic range. The proposed optical limiter also has advantages of ultrafast response time and wide applicable spectral range. The basic principles of NER effects is discussed systematically, and OL performance of the limiter is verified using a femtosecond pulse laser.

Key words nonlinear optics; optical limiting; ultrashort pulse; optical Kerr effect

OCIS codes 190.4360; 230.4320; 320.5550

1 引言

激光作为一种特殊光源在科技、医学、生产以及国防领域中发挥着越来越重要的作用。随着大功率激光技术的发展和完善,激光在现代军事中得到了广泛应用,激光干扰和激光致盲武器大量的出现在现代战场上。为了在激光武器对抗中避免己方人员眼睛和光学系统中的传感器受到损伤,许多国家都在竞相研究

收稿日期: 2014-09-05; 收到修改稿日期: 2014-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(11304242)、高等学校博士学科点专项科研基金(20130201120025)、中国博士后科学基金(2013M542351)

作者简介: 宋洪磊(1987—),男,硕士研究生,主要从事超低阈值光限幅技术方面的研究。E-mail: songhonglei2009@126.com

导师简介: 司金海(1960—),男,博士,教授,主要从事非线性光学与超快光子技术等方面的研究。

E-mail: jinhaisi@mail.xjtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: liheyang@mail.xjtu.edu.cn

各种类型的光限幅器^[1-5]。超短脉冲激光具有持续时间超短、峰值功率超高的特点,当其物质产生相互作用时可以发生各种非线性效应,如自聚焦、自相位调制、多光子电离等^[6-8],因此超短脉冲在光电对抗领域具有广阔应用前景,而目前针对超短脉冲光限幅的研究才刚刚起步。

传统光限幅器基于各种非线性光学效应,包括非线性吸收^[9-11]、非线性折射^[12-13]和非线性散射^[14-15]等,表现为常光照射下的高透射率和高强度激光照射下的低透射率。超短脉冲激光限幅器要求超快的响应时间、超低的限幅阈值、大的能量动态范围以及宽的光谱适用范围^[16]。但现有的光限幅技术很难同时满足上述要求,如基于非线性散射的光限幅器响应速度一般较慢且所需脉冲能量一般较大,无法对超短脉冲实现限幅防护;基于非线性吸收的光限幅器往往对入射光波长具有选择性,不适用于宽带限幅器件的设计与制作^[17-18]。

强光在非线性光学材料中传播时,容易诱导产生与入射光强成正比的折射率变化,即光克尔效应。当入射光为高斯光束时,由于光强的横向分布,光束中心与边缘的光强不同,造成折射率沿径向分布不均,可使光束通过介质后产生“自聚焦”或“自散焦”^[19]。利用自聚焦效应,可以实现具有超快响应时间的光限幅开关。国内学者利用自聚焦效应研究了不同材料的光限幅特性,其中包括金属-类卟啉化合物、金属纳米粒子合成物等新型材料^[20-22]。虽然基于自聚焦效应的光限幅器可适用于超短脉冲激光,但往往限幅阈值较高,无法实现超低限幅阈值输出。

非线性偏振椭圆旋转(NER)效应是指当椭圆偏振态的强光经过克尔介质时将产生光克尔效应,在偏振椭圆的长轴和短轴方向上诱导出不同的折射率变化,进而引入不同的相位差,导致出射光的偏振椭圆发生旋转^[23]。根据这一效应,提出一种适用于超短脉冲激光的光限幅方法:将椭圆偏振的入射光依次通过克尔介质、1/4波片和检偏器,调整1/4波片的晶轴方向和检偏器检偏方向,使椭圆偏振光变为线偏振光,并完全透过检偏器;当入射光很弱时,诱导的偏振椭圆旋转效应很弱,大部分入射光可透过检偏器,透射率很高;随着入射光的增强,诱导的偏振椭圆旋转效应也逐渐增强,通过1/4波片后仍为椭圆偏振光,因此部分光无法透过检偏器,透射率降低。

本文提出了一种基于超快光克尔效应的复合型超短脉冲光限幅器,该限幅技术将非线性偏振椭圆旋转和自聚焦效应相结合,有效克服了传统光限幅器件在超短脉冲激光限幅防护领域中存在的困难。详细介绍了偏振椭圆旋转效应的光限幅理论,推导了偏振椭圆旋转效应强度与入射光功率和偏振夹角的关系,并对最优偏振夹角进行了数值模拟。实验结果表明,在合适的偏振角度下,当非线性偏振椭圆旋转和自聚焦效应共同作用时,该复合型超短脉冲光限幅器的限幅效果最为理想。

2 基于偏振椭圆旋转效应的光限幅基本原理

本文提出的基于偏振椭圆旋转效应的光限幅器基本构造如图1所示,超短脉冲激光通过起偏器P1和第一1/4波片后变为椭圆偏振光,经透镜L1入射到克尔介质CS₂;当光强较弱时,入射光经第二1/4波片实现相位补偿,由椭圆偏振光还原为线偏振光,可完全透过平行检偏的检偏器P2和光阑A后出射;当光强较强时,入射光在克尔介质中诱导产生光克尔效应,进而产生偏振椭圆旋转效应,经第二1/4波片后仍为椭圆偏振光,部分光经检偏器P2后被阻挡,从而实现光限幅输出。

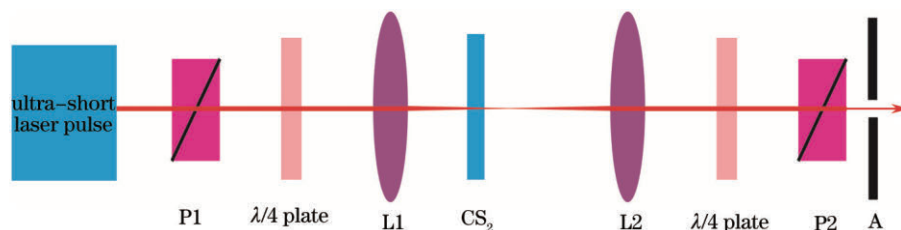


图1 实验原理图

Fig.1 Schematic of experiment

以下是基于偏振椭圆旋转效应的光限幅理论简介:

假设入射线偏振光的偏振方向与1/4波片长轴的夹角为 α ,沿波片的晶轴方向建立直角坐标系,可将入射光场的电矢量 E_0 分解为平行和垂直于晶轴方向的两个正交分量 E_x 和 E_y :

$$E_x = E_0 \cos \alpha \cos(\omega t), \quad (1)$$

$$E_y = E_0 \sin \alpha \cos(\omega t). \quad (2)$$

经过 1/4 波片后,平行和垂直于晶轴方向两个分量将引入 $\frac{\pi}{2}$ 的相位差,此时线偏振光变为椭圆偏振光,其中各分量可分别表示为

$$E'_x = E_0 \cos \alpha \cos(\omega t), \quad (3)$$

$$E'_y = E_0 \sin \alpha \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (4)$$

经过光克尔介质后, E'_x 和 E'_y 将分别诱导产生光克尔效应,并在 x 和 y 方向上诱导不同的折射率变化:

$$\Delta n_x \propto E_x'^2 \chi_{1111} + E_y'^2 \chi_{1122}, \quad (5)$$

$$\Delta n_y \propto E_x'^2 \chi_{1122} + E_y'^2 \chi_{1111}, \quad (6)$$

式中 χ_{1111} 和 χ_{1122} 分别为三阶非线性极化率张量元。

因此,当椭圆偏振光经过光克尔介质后,由于光克尔效应将在椭圆长轴和短轴方向的电场分量之间引入附加的相位差:

$$\varphi_{\text{SPM}} \propto \Delta n_y - \Delta n_x = (E_y'^2 - E_x'^2) \times (\chi_{1111} - \chi_{1122}) = I_{\text{input}} \cos(2\alpha) (\chi_{1111} - \chi_{1122}), \quad (7)$$

式中 I_{input} 为入射光功率。

进一步,当入射光经过第二 1/4 波片后,由于其光轴方向与第一 1/4 波片正交,因此可补偿第一 1/4 波片引入的相位差,而由偏振椭圆旋转效应引入的相位差无法补偿,因此经过第二 1/4 波片后,出射光仍为椭圆偏振光。出射光经过检偏器后的透射率可表示为^[24]

$$T = 1 - \sin^2(2\alpha) \sin^2\left(\frac{\varphi_{\text{SPM}}}{6}\right). \quad (8)$$

从(7)式和(8)式可以看出,当入射光很弱时,引入的附加相位差 φ_{SPM} 很小,因而透射率基本不变,无限幅效应;当入射光增强时,透射率随 φ_{SPM} 的增大而减小,因此,可以实现限幅输出。

3 数值模拟与实验结果

3.1 基于偏振椭圆旋转效应的光限幅数值模拟

根据(8)式,将偏振椭圆旋转效应的强度 I_{NER} 定义为其诱导的透射率的变化值,即

$$I_{\text{NER}} = \Delta T = \sin^2(2\alpha) \sin^2\left[\frac{I_{\text{input}} \chi \cos(2\alpha)}{6}\right], \quad (9)$$

式中 χ 为克尔介质的电极化率。利用(9)式,模拟偏振椭圆旋转效应的强度对偏振角度 α 的依赖关系,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,偏振椭圆旋转效应的强度随偏振夹角 α 周期变化,并且周期为 $\pi/2$ 。当 $\alpha = n\pi/2$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时,入射光经过第一 1/4 波片后仍为线偏振光,因此 y 方向的分量为 0,经过光克尔介质后无法产生偏振椭圆旋转效应;当 $\alpha = (n/2 + 1/4)\pi$ 时,入射光经过第一 1/4 波片后为圆偏振光,即 x 和 y 方向上的分量相等,经过光克尔介质后在两个方向上诱导的相位改变一致,因此 $\varphi_{\text{SPM}} = 0$,偏振椭圆旋转效应最弱。当偏振夹角接近 $(n/2 + 1/6)\pi$ 时,偏振椭圆旋转效应最强,经相位补偿后椭圆偏振光偏转度最大,因此可以断定该角度下光限幅器的限幅效果最好。

图 3 给出了偏振角度分别为 20° 、 30° 和 40° 时,透射率 T 随入射功率 I_{input} 的变化曲线。当偏振夹角 α 为 20° 时,透射率随入射光功率的增加急剧降低,但是能量动态范围较小;当偏振夹角为 40° 时,透射率随入射光功率的增加可在很大范围内保持下降的趋势,但是下降速度较慢,限幅阈值较高;当偏振夹角为 30° 时,对应限幅阈值最低,同时能量动态范围较大,符合理想光限幅器的条件。

3.2 实验结果与讨论

实验中采用如图 1 所示装置,其中飞秒激光中心波长为 800 nm,脉冲宽度为 60 fs,重复频率为 1 kHz。光克尔介质采用二硫化碳,该材料具有较大的三阶非线性极化率 [$n_2 = (3 \pm 0.6) \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$]、较高的损伤阈值

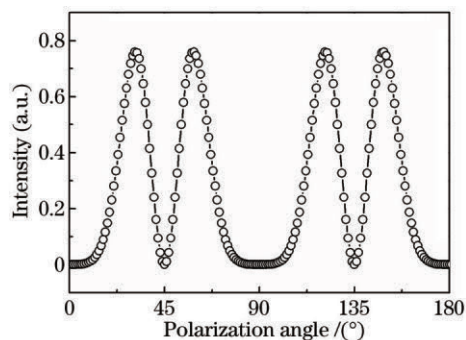


图2 偏振椭圆旋转效应强度随偏振夹角变化的模拟曲线

Fig.2 Simulation curve of polarization ellipse rotation effect intensity versus polarization angle

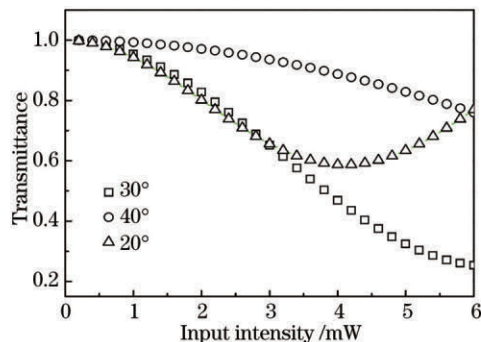


图3 不同偏振夹角下透射率变化模拟曲线

Fig.3 Simulation curves of transmittance under different polarization angles

($2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$) 以及超快的响应时间。将二硫化碳盛放于石英比色皿中,通过路径为 3 mm,两个 1/4 波片的长轴方向正交,检偏器的检偏方向与起偏器的起偏方向平行,两个透镜共焦放置,焦距为 500 mm,光克尔介质位于第一透镜的焦距以内,第一 1/4 波片长轴方向与起偏器夹角为 30° ,光阑孔径大小与入射光斑尺寸一致。测量器件光限幅特性时,通过可调衰减片改变入射光能量,并利用光功率计实时监测入射光和出射光的功率。

当入射飞秒激光通过起偏器 P1 和第一 1/4 波片后,将引入 $\frac{\pi}{2}$ 的相位延迟,飞秒激光由线性偏振光变为椭圆偏振光,经透镜 L1 入射到克尔介质 CS_2 ;当光强较弱时,入射光经第二 1/4 波片相位补偿,由椭圆偏振光还原为线偏振光,并经检偏器 P2 和光阑 A 完全透射后出射。当光强较强时,入射光在克尔介质 CS_2 中诱导产生光克尔效应,进而产生偏振椭圆旋转和自聚焦效应,经第二 1/4 波片后仍为椭圆偏振光,部分光经检偏器 P2 和光阑 A 后被阻挡,从而实现光限幅输出。

图 4 给出了不同配置下本限幅器的光限幅曲线。调整第一 1/4 波片长轴方向,使其与入射光偏振夹角为 30° ,此时偏振椭圆旋转效应很强且小孔为闭孔(CA),所测得与自聚焦效应共同作用时的限幅效果如图 4 中空心圆所示;当去除光阑,即把小孔调为开孔(OA),只有偏振椭圆旋转效应作用,此时的限幅效果如图 4 中空心方格所示。作为参考,同时测量了只有自聚焦作用时的光限幅特性:起偏器与第一 1/4 波片的偏振夹角为 0° ,此时偏振椭圆旋转效应基本可以忽略,因此只有自聚焦效应作用,测得自聚焦效应下的限幅效果如图 4 中实心方格所示。图 4 中虚线给出的是低入射功率下器件的线性透射率(光路中各光学元件的线性反射和吸收均已归一化)。

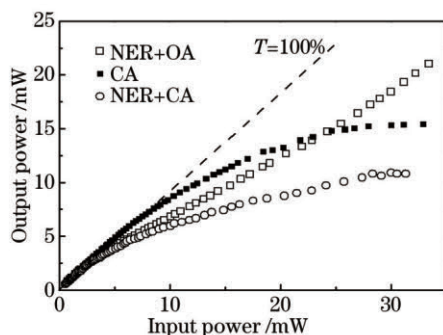


图4 利用不同效应实现的光限幅输入-输出特性曲线

Fig.4 Optical limiting input-output characteristic curves based on different effects

从图 4 中可以看出,当入射功率很低时,三种配置下的入射光透射率与器件的线性透射率基本一致;随着入射光的增加,器件的透射率显著降低。当入射光功率低于 20 mW 时,偏振椭圆旋转诱导的光限幅效应明显优于自聚焦诱导的光限幅效果;随着入射光的增加,自聚焦诱导的光限幅效应逐渐占优,说明仅有偏振椭圆旋转效应作用时,该限幅器件很难适用于较大的能量动态范围。当两种效应共同作用时(如图 4 空心圆

所示),由于偏振椭圆旋转效应的作用,器件在较低的输入功率下即可实现限幅;当输入功率增加时,由于自聚焦效应的共同作用,器件可在较大的能量动态范围内实现限幅输出。

综上所述,本限幅器具有响应时间快、限幅阈值低以及适用动态能量范围大的优点,尤其可适用于超短激光脉冲的光限幅防护。此外,理想的光限幅器还需对不同波长的入射激光具备限幅能力。与非线性吸收效应有所区别,光克尔效应可在很宽的光谱范围内产生,且器件所采用的光学元件均可工作在较宽的光谱范围内(1/4波片为消色差波片),因此本限幅器同时还具有宽的光谱适用范围宽的特点。

4 结 论

将偏振椭圆旋转和自聚焦效应相结合,提出一种基于超快光克尔效应的复合型超短脉冲光限幅器。理论计算出了偏振椭圆旋转效应的最优条件,并用飞秒激光脉冲进行了实验验证。结果表明:该限幅器可实现超快响应时间和超低限幅阈值的光限幅防护,同时具有动态范围大、适用光谱范围宽的优点。

参 考 文 献

- 1 Vivien L, Lancon P, Riehl D, *et al.* Carbon nanotubes for optical limiting[J]. Carbon, 2002, 40(10): 1789-1797.
- 2 Nair Swapna S, Thomas Jinto, Suchand Sandeep C S, *et al.* An optical limiter based on ferrofluids[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(17): 171908.
- 3 Huang Y, Siganakis G, Moharam M G, *et al.* Broadband optical limiter based on nonlinear photoinduced anisotropy in bacteriorhodopsin film[J]. Appl Phys Lett, 2004, 75(22): 5445-5447.
- 4 Venkatram N, Kumar R Sai Santosh, Narayana Rao D, *et al.* Nonlinear absorption and scattering properties of cadmium sulphide nanocrystals with its application as a potential optical limiter[J]. J Appl Phys, 2006, 104(7): 074309.
- 5 Soon Boon Yi, Haus Joseph, Scalora Michael, *et al.* One-dimensional photonic crystal optical limiter[J]. Opt Express, 2003, 11(17): 2007-2018.
- 6 Zeng Shuguang, Song Laizhong, Wang Fei, *et al.* Propagation characteristics of Gaussian pulsed beams with first-order spatio-temporal couplings[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1014002.
曾曙光, 宋来忠, 王 飞, 等. 一阶时空耦合高斯脉冲光束的传输特性研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1014002
- 7 Shi Junkai, Chai Lu, Zhao Xiaowei, *et al.* Generation of 34 W high power femtosecond pulses by single-stage direct amplification in an all-photonic-crystal-fiber laser system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0202001.
石俊凯, 柴 路, 赵晓薇, 等. 全光子晶体光纤单级直接放大产生 34 W 高功率飞秒脉冲[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202001.
- 8 Dong Mingming, Lin Geng, Zhao Quanzhong. Progress on femtosecond laser-fabricated waveguide devices in transparent dielectrics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010002.
董明明, 林 耿, 赵全忠. 飞秒激光在透明介质中制备波导器件进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010002.
- 9 Perry J W, Mansour K, Lee I Y S, *et al.* Organic optical limiter with a strong nonlinear absorptive response[J]. Science, 1996, 273 (5281): 1533-1536.
- 10 Shirk James S, Pong Richard G S, Flom Steven R, *et al.* Lead phthalocyanine reverse saturable absorption optical limiters[J]. Pure Appl Opt, 1996, 5(5): 701-707.
- 11 He Zhicong, Li Fang. Optical properties of third-order nonlinearities of CdSeS quantum/polystyrene composite film[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1007001.
何志聪, 李 芳. CdSeS 量子点/聚苯乙烯薄膜的三阶非线性光学特性[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1007001.
- 12 Van Stryland E W, Vanherzeele H, Woodall M A, *et al.* Two photon absorption, nonlinear refraction and optical limiting in semiconductors[J]. Opt Eng, 1985, 24(4): 613-623.
- 13 Cai Xiaolin, Wei Jinsong, Yan Hui. Optical nonlinear characteristics of amorphous InSb thin film and its super-resolution effect[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0931002.
蔡晓林, 魏劲松, 严 辉. 非晶态 InSb 薄膜的光学非线性特性及其超分辨效应[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0931002.
- 14 Ispasoiu R G, Balogh L, Varnavski O P, *et al.* Large optical limiting from novel metal-dendrimer nanocomposite materials[J]. J Am Chem Soc, 2000, 122(44): 11005-11006.
- 15 Wang Jun, Blau Werner J. Inorganic and hybrid nanostructures for optical limiting[J]. Pure Appl Opt, 2009, 11(2): 024001.
- 16 Scalora M, Dowling J P, Bowden C M, *et al.* Optical limiting and switching of ultrashort pulses in nonlinear photonic band gap

- materials[J]. Phys Rev Lett, 1994, 73(10): 1368–1371.
- 17 Si Jinhai, Yang Miao, Liu Shutian. Optical limiter using reverse saturable absorption and self-focusing[J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(1): 83–86.
司金海, 杨 淼, 刘树田. 基于反饱和吸收和自聚焦两种效应的光限幅器[J]. 光学学报, 1994, 14(1): 83–86.
- 18 Pan Kejun, Wang Xiaomei, Wen Dijiang. Progress in the optical limiting materials for nonlinear absorption[J]. Journal of Functional Materials, 2003, 34(2): 143–145.
潘科君, 王筱梅, 闻荻江. 非线性吸收激光光限幅材料研究进展[J]. 功能材料, 2003, 34(2): 143–145.
- 19 Li Chunfei. The Principles of All-Optical Switching[M]. Beijing: Science Press, 2010. 269.
李淳飞. 全光开关原理[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 269.
- 20 Yang Miao, Si Jinhai, Wang Yuxiao, *et al.*. All-optical switching and optical limiting based on nonlinear refraction effect of excited-state[J]. Acta Physica Sinica, 1995, 44(3): 419–426.
杨 淼, 司金海, 王玉晓. 基于激发态非线性折射效应的全光开关与光限幅[J]. 物理学报, 1995, 44(3): 419–426.
- 21 Song Yinglin, Li Chunfei. Nonlinear optical limiting technology and laser protection[J]. Physics, 1996, 25(6): 354–357.
宋瑛林, 李淳飞. 非线性光学限幅技术与激光防护[J]. 物理, 1996, 25(6): 354–357.
- 22 Qu Shiliang, Song Yinglin, Du Chimin, *et al.*. Optical nonlinearities in two novel nanocomposites based on fullerene C₆₀ structured system with gold nanoparticles[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(9): 1703–1708.
曲士良, 宋瑛林, 杜池敏, 等. 基于富勒烯 C₆₀ 结构体系的金纳米粒子合成物光学非线性研究[J]. 物理学报, 2001, 50(9): 1703–1708.
- 23 Liu H J, Sun Q B, Huang N, *et al.*. Highly efficient pulse cleaner via nonlinear ellipse rotation in liquid CS₂ for ultrashort pulses[J]. Opt Lett, 2013, 38(11): 1838–1840.
- 24 Stolen R H, Botineau J, Ashkin A. Intensity discrimination of optical pulses with birefringent fibers[J]. Opt Lett, 1982, 7(10): 512–514.

栏目编辑: 史 敏