

## 基于分光延时的脉冲激光波形调节方法研究

尹宇阳<sup>1,3</sup>, 叶晖<sup>2,3</sup>, 程学武<sup>1\*</sup>, 季凯俊<sup>1,3</sup>, 王积勤<sup>1,3</sup>, 梁嘉明<sup>1,3</sup>, 季凯杰<sup>1</sup>, 林鑫<sup>1</sup>, 杨勇<sup>1</sup>, 刘林美<sup>1</sup>, 李发泉<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院精密测量科学与技术创新研究院波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;<sup>2</sup>上海卫星工程研究所, 上海 201109;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 脉冲激光由于具有峰值功率高、脉冲宽度窄等特点,在激光致声、激光焊接等领域中得到了广泛应用。使用特殊波形的脉冲激光,可获得比单脉冲高斯激光更加优异的应用效果,因此脉冲激光波形调节方法具有重要的应用价值。针对这一需求,提出并实验验证了一种基于分光延时的脉冲激光波形调节方法。首先对脉冲激光分光延时叠加原理进行了理论分析,设计出基于两次分光的四脉冲分光延时叠加光路,确定了产生矩形、三角形、驼峰形和双峰形脉冲激光所需的光分比与延时。然后搭建了一套基于 Nd:YAG 脉冲激光器的二倍频 532 nm 激光的四脉冲分光延时叠加实验装置,成功获得了矩形、三角形、驼峰形和双峰形等特殊波形的脉冲激光。

**关键词** 激光光学; 脉冲激光; 激光波形可调; 分光片

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220734

## 1 引言

激光具有峰值功率高、脉冲宽度窄等特点,被广泛应用于激光致声、激光焊接等领域。通过调 Q 等方式产生的单模脉冲激光多是高斯波形,然而具有特殊波形的脉冲激光在实际应用中有更好的效果。在激光诱导击穿光谱领域,双脉冲激光比单脉冲激光更容易产生大量等离子体,从而提高对元素的探测能力<sup>[1-2]</sup>,并且采用双脉冲激光来诱导击穿光谱在一定程度上可以降低光谱自吸收效应<sup>[3]</sup>。在激光烧蚀领域,多脉冲激光的烧蚀阈值比单脉冲激光的烧蚀阈值低<sup>[4]</sup>,使用与单脉冲激光总能量相等的双脉冲激光可以产生更深的烧蚀坑<sup>[5]</sup>,且多脉冲激光对烧蚀坑内部的形貌具有“平滑”的作用<sup>[6-7]</sup>。在激光致声领域,可以用双脉冲激光产生两个空泡,通过声波叠加来提高激光声信号强度<sup>[8]</sup>。在激光焊接领域,快速上升、缓慢下降的脉冲激光能提高黄铜等材料对激光能量的吸收率,成功实现对黄铜的激光焊接<sup>[9]</sup>。在激光空间探测领域,将一束脉冲激光分成多脉冲激光可以使大能量皮秒激光满足空间碎片测距的激光功率发射需求,提高对空间碎片的激光探测能力<sup>[10]</sup>。通常采用高精度信号发生器同时控制两台脉冲激光器,通过合束产生双脉冲激光<sup>[2-3,8]</sup>,或者利用往复反射的方式增加脉冲激光的脉宽,获得一种衰减的脉冲激光波形<sup>[10-11]</sup>。

本文提出一种基于分光延时的脉冲激光波形调节方法,将分光片和偏振合束器相结合,将一台激光器产生的单束脉冲激光分成两束、四束或更多束脉冲激光,改变分光比和延时,再进行偏振合束,可以灵活地调节输出脉冲激光的波形。设计并进行了实验验证,成功获得了矩形、三角形、驼峰形和双峰形等特殊波形的脉冲激光。本方法为激光烧蚀、激光空间探测、激光致声等领域提供了更多的脉冲激光波形输出方案。

## 2 理论分析

脉冲激光分光延时叠加原理如图 1 所示,脉冲激光入射到分光片(BS)后分成两路,一路(T')经偏振分束器(PBS)透射;另一路(R')被反射镜 M1、M2 反射至半波片(HWP),激光的偏振方向改变,最后经 PBS 出射,在空间上与透射的 T' 叠加为一束光。通常情况下,激光是偏振光,而偏振分束器对反射光和透射光具有偏振选择的能力,因此 R' 与 T' 的光轴可在空间上重合。其中, R' 相对 T' 有一定的延时  $\Delta t$ , 通过调节反射镜组与 BS 和 PBS 的距离来改变 R' 与 T' 的光程差,从而获得间隔  $\Delta t$  的两束脉冲激光;通过改变 BS 的分光比,可以改变两束脉冲激光的相对强度。因此,改变分光比和延时,利用两束脉冲激光叠加,可获得多种特殊波形激光。

在理想情况下,激光器输出的单模脉冲激光一般

收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-05-09; 录用日期: 2022-07-04; 网络首发日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(41827801, 41627804)、国家重点研发计划(2016YFC1400300)

通信作者: \*lidar@apm.ac.cn

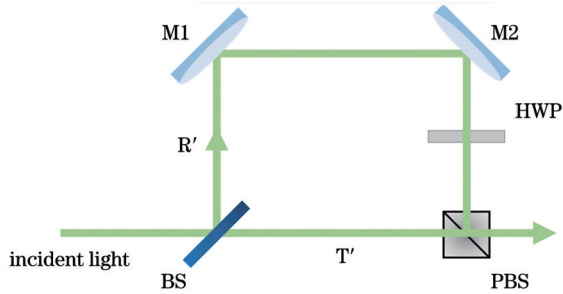


图1 分光延时叠加原理

Fig. 1 Principle of beam splitting and delay superimposition

为高斯波形,其波形 $I(t)$ 可表示为

$$I(t) = I_0 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_0}{\tau_0/2.35482}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中: $I_0$ 为高斯脉冲激光的峰值功率; $t_0$ 为高斯脉冲激光的延时; $\tau_0$ 为高斯脉冲激光的半峰全宽(FWHM)。多束高斯脉冲激光叠加后的波形 $I'(t)$ 可表示为 $n$ 束独立的高斯脉冲激光的线性叠加:

$$I'(t) = \sum_{i=1}^n I_i \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_i}{\tau_i/2.35482}\right)^2\right], \quad (2)$$

式中: $I_i$ 为第 $i$ 束高斯脉冲激光的峰值功率; $t_i$ 为第 $i$ 束高斯脉冲激光的延时; $\tau_i$ 为第 $i$ 束高斯脉冲激光的半峰

全宽。

### 3 实验方案与数值模拟

分光次数越多,可调的分光比和可调的延时就越多,叠加后得到的脉冲激光波形就越丰富。本实验利用两个分光片、一个半波片和一个偏振合束器组合的方式,一束脉冲激光经过两次分光后分成四束脉冲激光,再经过偏振合束器叠加。通过调节分光比和延时,获得了不同的叠加脉冲激光波形。

在实验室搭建了一套脉冲激光波形可调实验装置,如图2所示,其中 $L_1$ 为M1到BS1的距离, $L_2$ 为M3到BS2的距离。激光器输出的脉冲激光经过光阑整形,然后经过一对全反镜,光路被校准。BS1分出的反射光经由全反镜M1、M2反射后,以45°角射入BS2。BS1分出的透射光以45°角射入BS2。通过旋转半波片,改变激光的偏振方向,利用偏振合束,实现将多束激光合为一束的目的,且所有输出均能对准同一目标。实验中放置两个高速光电探测器PD1和PD2:PD1放置在激光器输出位置,获得原始脉冲激光的波形;PD2放置在PBS后的毛玻璃片(FGP)附近,获得叠加脉冲激光波形。两路高速光电探测器的输出电脉冲信号和脉冲激光器的同步触发信号均接入示波器。

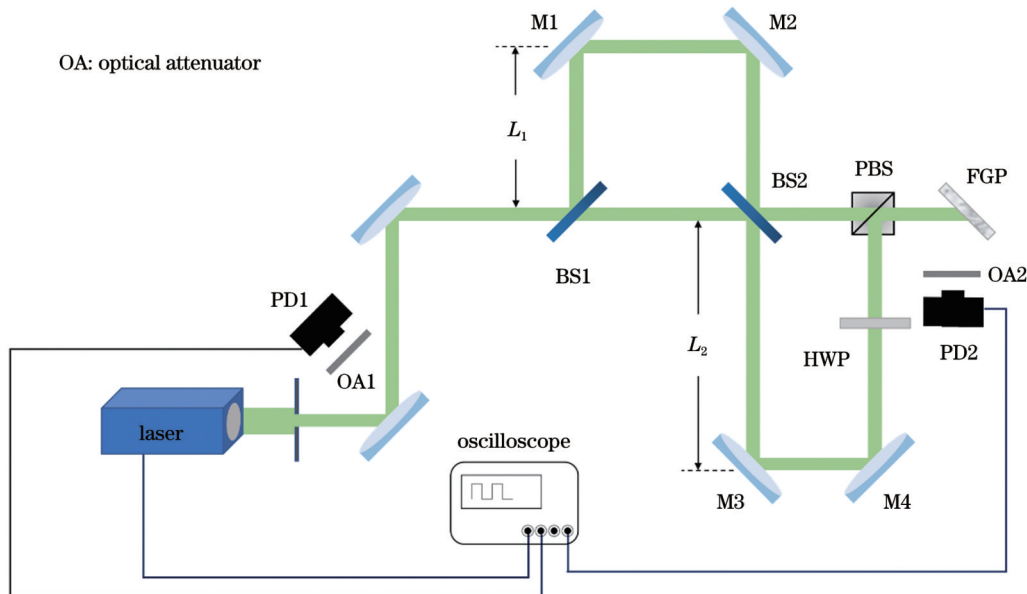


图2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

本实验采用的高速光电探测器不需要很强能量的激光,避免了探测器饱和。先通过调整激光器脉冲延时时间,将激光能量降低到20 mJ左右,然后在PD1、PD2前增加衰减片,降低散射光强度。

为了获得高速纳秒脉冲激光的波形,要求探测器和示波器具有亚纳秒量级的反应时间,避免波形失真。实验需要采用脉冲激光器、分光片、波片、全反镜、偏振

分束器、高速光电探测器以及高速数字示波器等。实验所用仪器的主要参数如表1所示。

为了验证四脉冲激光叠加产生特殊波形脉冲激光的效果,结合常用分光片的分光比参数,分别对矩形、三角形、驼峰形、双峰形等特殊形状的脉冲激光进行数值模拟。针对图2所示的光路,利用式(2)得到

表 1 实验所用设备的参数  
Table 1 Parameters of device used in experiment

Device	Parameter
Laser	Wavelength: 532 nm Output frequency: 30 Hz Full width at half maximum: 7 ns Maximum output energy: 800 mJ
High-speed photodetector	Response bandwidth: >1.2 GHz Rising edge: <500 ps
Polarizing beam splitter	Polarization extinction ratio: >1000:1 Transmittance: >90% Damage threshold: 2 J/cm <sup>2</sup> at 532 nm wavelength, 10 ns FWHM, and 10 Hz laser output frequency
Oscilloscope	Bandwidth: 350 MHz Sampling rate: 6.25 GHz Sampling resolution: 12

$$\begin{aligned}
 I(t) = & I_1 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_1}{\tau_1/2.35482}\right)^2\right] + I_2 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_2}{\tau_2/2.35482}\right)^2\right] + I_3 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_3}{\tau_3/2.35482}\right)^2\right] + \\
 & I_4 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_4}{\tau_4/2.35482}\right)^2\right] = T_1 \cdot T_2 \cdot I_0 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\tau_0/2.35482}\right)^2\right] + \\
 & R_1 \cdot R_2 \cdot I_0 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\frac{2L_1}{c}}{\tau_0/2.35482}\right)^2\right] + T_1 \cdot R_2 \cdot I_0 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\frac{2L_2}{c}}{\tau_0/2.35482}\right)^2\right] + \\
 & R_1 \cdot T_2 \cdot I_0 \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{t-\frac{2(L_1+L_2)}{c}}{\tau_0/2.35482}\right]^2\right\}, \tag{3}
 \end{aligned}$$

式中:  $T_1$  为 BS1 的透射率;  $T_2$  为 BS2 的透射率;  $R_1$  为 BS1 的反射率;  $R_2$  为 BS2 的反射率;  $c$  为光速。

设第一束分脉冲与第二束分脉冲的延时为  $\alpha_1\tau_0$ ,

第一束分脉冲与第三束分脉冲的延时为  $\alpha_2\tau_0$ , 那么式(3)可以变形为

$$\begin{aligned}
 I'(t) = & T_1 \cdot T_2 \cdot I_0 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\tau_0/2.35482}\right)^2\right] + R_1 \cdot R_2 \cdot I_0 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\alpha_1\tau_0}{\tau_0/2.35482}\right)^2\right] + \\
 & T_1 \cdot R_2 \cdot I_0 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\alpha_2\tau_0}{\tau_0/2.35482}\right)^2\right] + R_1 \cdot T_2 \cdot I_0 \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{t-(\alpha_1\tau_0+\alpha_2\tau_0)}{\tau_0/2.35482}\right]^2\right\}. \tag{4}
 \end{aligned}$$

如要得到顶部较为平缓的矩形脉冲激光, 通过分光延时得到的四束分脉冲的峰值功率以及相邻两束分脉冲间的延时应该相等, 即式(4)中  $T_1 = R_1 = T_2 =$

$R_2 = 50\%$ 。设  $\alpha_1 = \frac{1}{2}\alpha_2 = \alpha$ , 并假设  $I_0$  为 100%。矩形脉冲激光的波形满足

$$\begin{aligned}
 I'(t) = & \frac{1}{4} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\tau_0/2.35482}\right)^2\right] + \frac{1}{4} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\alpha\tau_0}{\tau_0/2.35482}\right)^2\right] + \\
 & \frac{1}{4} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-2\alpha\tau_0}{\tau_0/2.35482}\right)^2\right] + \frac{1}{4} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-3\alpha\tau_0}{\tau_0/2.35482}\right)^2\right]. \tag{5}
 \end{aligned}$$

根据式(5)对不同  $\alpha$  值的矩形脉冲激光进行数值模拟, 模拟结果如图 3(a) 所示。当  $\alpha$  不同时, 矩形脉冲激光顶部的起伏程度也不同。将式(5)对时间求导并取绝对值, 在第二束分脉冲峰值时刻至第三束分脉冲峰值

时刻区间求积分, 得到矩形脉冲激光顶部的起伏度  $u$ :

$$u = \sum_{t=\alpha\tau_0}^{t=2\alpha\tau_0} \left| \frac{d[I'(t)]}{dt} \right|. \tag{6}$$

$u$  越小, 起伏越小。根据式(6)进行数值模拟, 可以

得到图 3(b) 所示的结果。模拟结果表明,  $\alpha = 0.69$  时,  $u$  有最小值, 即相邻两束分脉冲的延时为

半峰全宽的 69% 时, 矩形脉冲激光的顶部起伏最小。

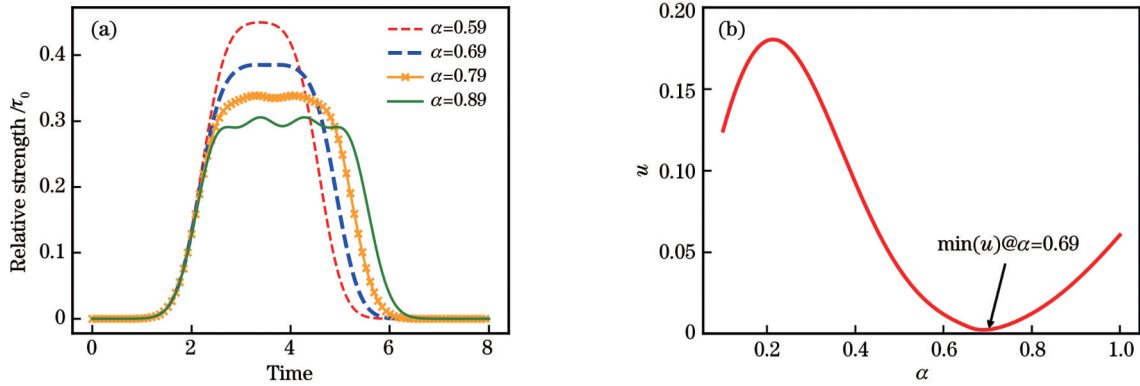


图 3 矩形脉冲激光数值模拟结果。(a) 不同  $\alpha$  下的矩形脉冲激光; (b)  $u$  的模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of rectangular pulsed laser. (a) Rectangular pulsed lasers under different  $\alpha$ ; (b) simulated  $u$

三角形、双峰形以及驼峰形脉冲激光的数值模拟结果与矩形脉冲激光类似, 模拟过程中的具体参数设置如表 2 所示。

表 2 激光波形模拟中的分光比和延时

Table 2 Splitting ratio and delay in simulation of laser waveform

Waveform	Splitting ratio		Delay	
	Beam splitter 1	Beam splitter 2	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Rectangular	50:50	50:50	0.69	1.38
Triangular	80:20	70:30	0.43	0.80
Hump-shaped	50:50	50:50	0.37	1.40
Dual-peak	50:50	50:50	0.10	2.50

在表 2 所示参数下得到的模拟波形如图 4 所示, 其中虚线表示分脉冲激光波形, 实线表示叠加脉冲激光波形。

### 4 实验结果

根据上述实验方案及模拟的分光比和延时等参数, 将脉冲激光同步信号、原始脉冲激光信号以及叠加脉冲激光信号均送入高速数字示波器中, 结果如图 5 所示。其中点划线为激光同步信号, 虚线为原始脉冲激光信号, 实线为叠加脉冲激光信号。

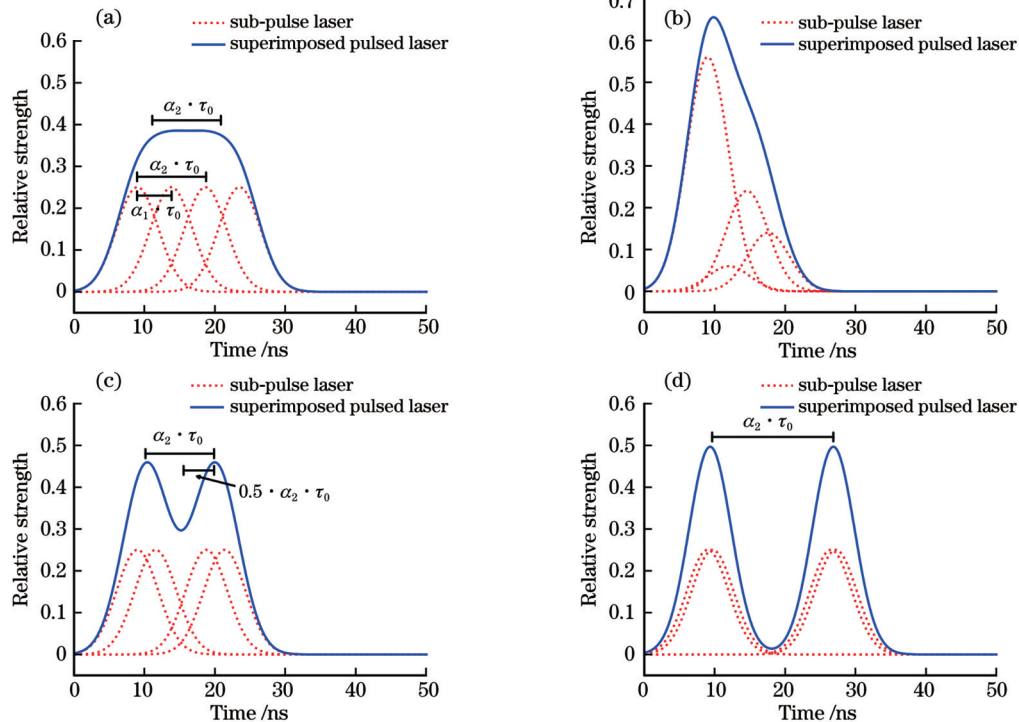


图 4 特殊波形脉冲激光的数值模拟结果。(a) 矩形脉冲激光; (b) 三角形脉冲激光; (c) 驼峰形脉冲激光; (d) 双峰形脉冲激光

Fig. 4 Numerical simulation results of pulsed laser with special waveform. (a) Rectangular pulsed laser; (b) triangular pulsed laser; (c) hump-shaped pulsed laser; (d) dual-peak pulsed laser

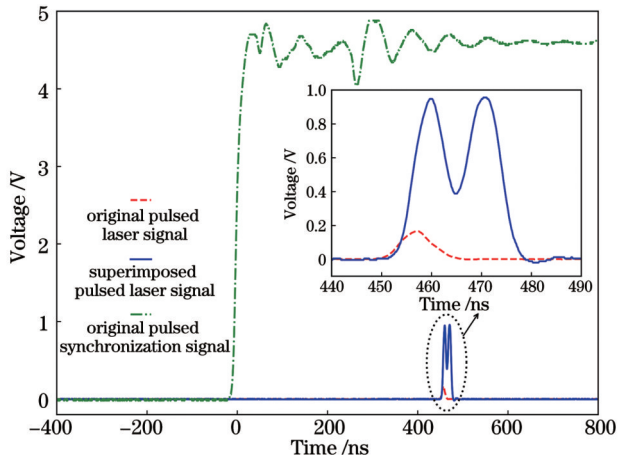


图 5 示波器记录的波形

Fig. 5 Waveforms stored by oscilloscope

根据数值模拟的分光比和延时,通过使用不同的分光片并改变  $L_1$  和  $L_2$ , 分别得到矩形、三角形、驼峰形和双峰形的叠加脉冲激光,实验结果如图 6 所示。其中纵轴为两个光电探测器的输出电压(单位:mV),横轴表示时间(单位:ns),实线表示叠加脉冲激光波形,虚线表示原始脉冲激光波形。矩形脉冲激光的波形如图 6(a)所示,其中矩形的顶部脉宽约为 11 ns,是激光器原始脉冲脉宽的 1.5 倍,与数值模拟结果较吻合,但矩形的顶部起伏度比数值模拟大。三角形脉冲激光的波形如图 6(b)所示,三角形的上升沿约为 6 ns,下降沿较为平缓,约为 11 ns。驼峰形脉冲激光的波形如图 6(c)所示,波峰与波谷的间距约为 5 ns。双峰形脉冲激光的波形如图 6(d)所示,两个峰的距离约为 17 ns。

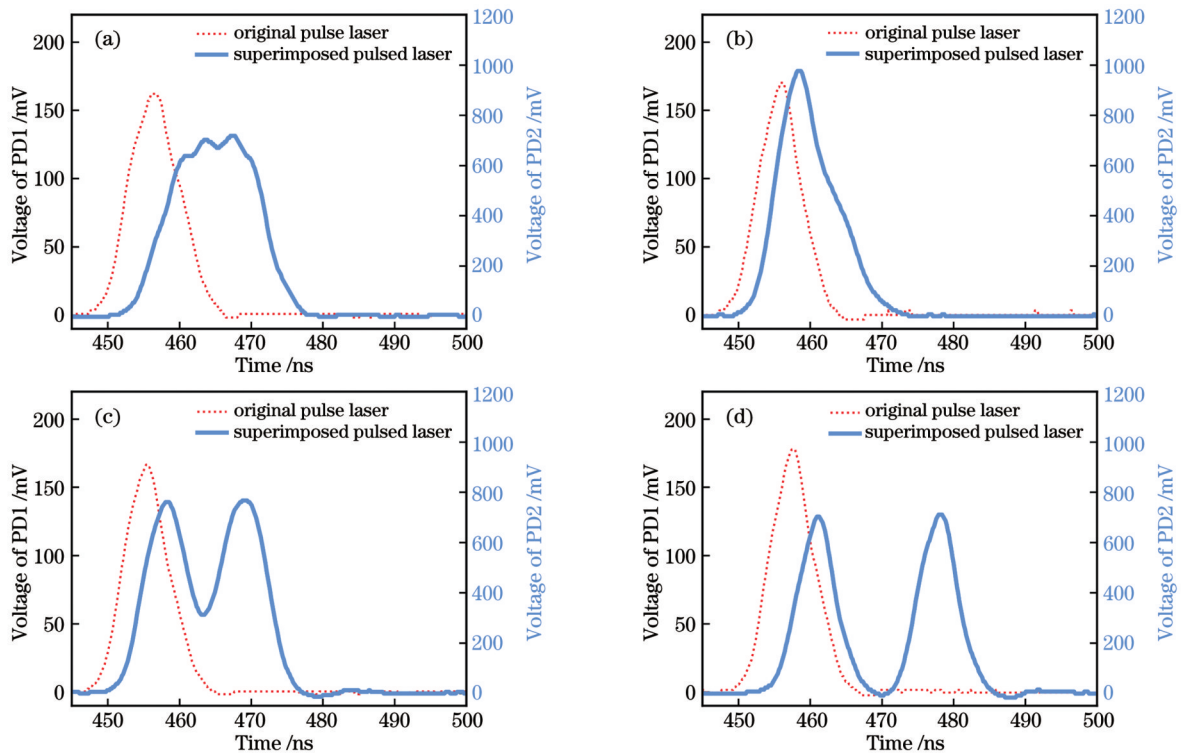


图 6 实验结果。(a)矩形脉冲激光;(b)三角形脉冲激光;(c)驼峰形脉冲激光;(d)双峰形脉冲激光

Fig. 6 Experimental results. (a) Rectangular pulsed laser; (b) triangular pulsed laser; (c) hump-shaped pulsed laser; (d) dual-peak pulsed laser

## 5 分析与讨论

由实验结果和数值模拟的对比可以看出,实验获得的多种叠加脉冲激光的波形与数值模拟结果吻合。通过调节分光比和延时,无论是矩形脉冲激光、驼峰形脉冲激光、三角形脉冲激光还是双峰形脉冲激光,都获得了较理想的效果,证明了本方法正确可靠。本方法还可以通过增加分光片数量、使用不同分光比的分光片以及设置不同的延时,更灵活地调节出更多不同波形的脉冲激光。例如,分脉冲激光数量越多,得到的矩形脉冲激光的顶部更长,三角形脉冲激光的上升沿或者下降沿更加平缓,驼峰形脉冲激光的波谷数量更多

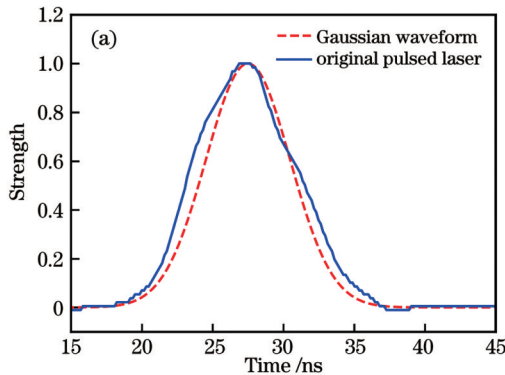
或更宽,多峰形脉冲激光的波峰数量更多或波峰间隔更宽等。

分光片的实际分光比受激光偏振方向的影响,可以将其转化为本方法的优势,在分光片前加装波片,在实验时通过旋转波片来小幅度调节分光比,这样叠加脉冲激光的波形调节更加精细与灵活。

实验中部分叠加脉冲激光的强度与数值模拟存在差异。影响叠加脉冲激光强度的主要因素有激光器输出的原始脉冲激光和分光片的实际分光比。

对图 6 中的原始脉冲激光波形与理想的高斯波形进行对比,结果如图 7(a)所示。其中虚线为半峰全宽为 7 ns 的高斯波形,实线为原始脉冲激光波形。

经过对比发现,激光器输出的原始脉冲激光的波形与理想的高斯波形存在一定差异,这是矩形脉冲激光顶部起伏较大的主要原因。用图 7(a)中的原始脉冲激光波形替代理想高斯波形,对矩形脉冲激光的



模拟进行修正,得到图 7(b)所示结果。其中实线为矩形脉冲激光的实验结果,虚线为修正后的矩形脉冲激光的模拟结果,模拟结果与实验结果吻合得更好。

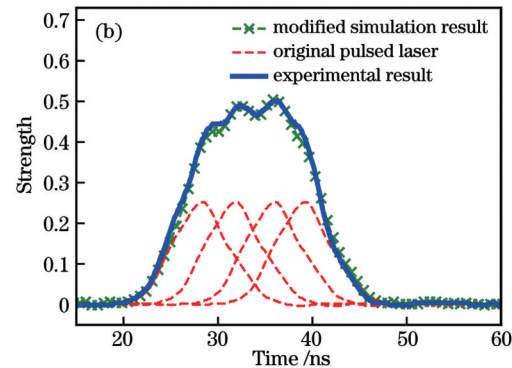


图 7 实验结果与数值模拟结果的对比。(a)原始脉冲激光波形与高斯波形的对比;(b)修正后的模拟结果与实验结果的对比

Fig. 7 Comparison between experimental results and numerical simulation results. (a) Comparison between original pulsed laser waveform and Gaussian waveform; (b) comparison between modified simulation result and experimental result

对于高能激光的分光、合束与偏振旋光操作,需要高损伤阈值的光学器件和热释电探头。热释电探头没有光电探头灵敏,因此本方案中的激光能量只受限于器件的损伤阈值,而与波形无关。损伤阈值转换公式为

$$D_1 = D_2 \cdot \left( \frac{\tau_1'}{\tau_2'} \right)^{1/2} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \frac{F_2}{F_1}, \quad (7)$$

式中: $D$ 、 $\tau'$ 、 $\lambda$ 、 $F$ 分别为损伤阈值、激光脉宽、激光波长、激光重复频率。本实验所用偏振合束棱镜的损伤阈值为  $2 \text{ J/cm}^2$  (@10 ns 半峰全宽, 10 Hz 激光输出频率, 532 nm 波长), 将其通过式(7)转换成实验室 Nd:YAG 激光器参数下的损伤阈值, 为  $0.558 \text{ J/cm}^2$  (@7 ns 半峰全宽, 30 Hz 激光输出频率, 532 nm 波长)。针对不同波长下的损伤阈值, 也可以用式(7)进行换算。脉冲激光的分光延时叠加必然会造成激光脉宽的增加, 使得损伤阈值高于理论值。如果激光能量超过了光学镜片的损伤阈值, 最常用的方法就是对激光进行扩束, 这需要采用更大通光口径的光学元器件以实现本方法。

## 6 结 论

介绍了一种脉冲激光波形调节方法, 通过调节分光比和延时的方式, 可以用一台激光器获得不同波形的叠加脉冲激光。对理想高斯光束的分光、延时及叠加进行了模拟, 得到了一束脉冲激光分成四束分脉冲并叠加成矩形、三角形、驼峰形和双峰形脉冲激光的参数。根据模拟得到的参数, 对所设计的实验及装置进行测试。测试结果表明, 该装置可以得到多种波形的脉冲激光, 实验得到的脉冲激光波形符合预期, 但矩形脉冲激光的顶部没有数值模拟的顶部平缓。经过对比分析后发现, 实验与数值模拟的差异主要是因为激光器输出的原始脉冲激光并非理想的高斯波形且分光片的实际分光比与理论分光比不同。所提方法为激光烧

蚀、激光焊接、激光致声等提供了新的特殊波形脉冲激光产生方案。

## 参 考 文 献

- [1] Colao F, Lazic V, Fantoni R, et al. A comparison of single and double pulse laser-induced breakdown spectroscopy of aluminum samples[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2002, 57(7): 1167-1179.
- [2] Wagner F R, Hildenbrand A, Natoli J Y, et al. Multiple pulse nanosecond laser induced damage study in  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  crystals[J]. Optics Express, 2010, 18(26): 26791-26798.
- [3] Wang W, Sun L X, Zhang P, et al. Reducing self-absorption effect by double-pulse combination in laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Microchemical Journal, 2022, 172: 106964.
- [4] 胡梦宁, 葛励成, 张晋平, 等. 多脉冲飞秒激光深小孔的加工[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403006.  
Hu M N, Ge L C, Zhang J P, et al. Hole-drilling with high depth-diameter ratio using multi-pulse femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403006.
- [5] Povarnitsyn M E, Levashov P R. Simulation of single-, double- and multi-pulse laser ablation of metals[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1147: 012063.
- [6] 符永宏, 刘强宪, 叶云霞, 等. 同点间隔多次激光微织构工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203005.  
Fu Y H, Liu Q X, Ye Y X, et al. Research on laser surface micro texturing processing of single pulse intervals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1203005.
- [7] 林嘉剑, 明瑞, 李学坤, 等. 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的形貌特征研究[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402017.  
Lin J J, Ming R, Li X K, et al. Study on morphology characteristics of femtosecond laser-ablated face gear materials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402017.
- [8] 王晓宇, 王江安, 宗思光, 等. 同步双脉冲激光致声研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(2): 305-309.  
Wang X Y, Wang J G, Zong S G, et al. Acoustic signals induced by synchronous double-pulse lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(2): 305-309.
- [9] 师文庆, 杨永强, 王迪, 等. 脉冲激光焊接 H62 黄铜[J]. 焊接学报, 2010, 31(7): 101-104, 118.  
Shi W Q, Yang Y Q, Wang D, et al. Study on pulse laser welding of H62 brass[J]. Transactions of the China Welding Institution,

- 2010, 31(7): 101-104, 118.
- [10] 龙明亮, 邓华荣, 张海峰, 等. 1 kHz 重复频率多脉冲皮秒激光器研制及其空间碎片激光测距应用[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0614001. Long M L, Deng H R, Zhang H F, et al. Development of multiple pulse picosecond laser with 1 kHz repetition rate and its application in space debris laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0614001.
- [11] 张振荣, 胡志云, 黄梅生, 等. 纳秒级激光脉冲展宽系统的分析及应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 310-315. Zhang Z R, Hu Z Y, Huang M S, et al. Analysis and application of nanosecond laser pulse stretching system[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 310-315.

## Research on Adjustment Method of Pulsed Laser Waveform Based on Beam Splitting and Delay

Yin Yuyang<sup>1,3</sup>, Ye Hui<sup>2,3</sup>, Cheng Xuewu<sup>1\*</sup>, Ji Kaijun<sup>1,3</sup>, Wang Jiqin<sup>1,3</sup>, Liang Jiaming<sup>1,3</sup>, Ji Kaijie<sup>1</sup>, Lin Xin<sup>1</sup>, Yang Yong<sup>1</sup>, Liu Linmei<sup>1</sup>, Li Faquan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institution of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** Pulsed lasers are widely used in many fields because of their high peak power and short pulse width. Most single-mode pulsed lasers generated by Q-switching have Gaussian waveforms. However, pulsed lasers with unique waveforms exhibit improved effects in specific applications, such as laser-induced acoustics, laser welding, laser ablation, and laser-induced breakdown spectroscopy. Two lasers are employed using a high-precision signal generator to generate a double-pulse laser. A pulsed laser with an attenuated waveform is obtained using multiple reflections. In this study, an adjustment method for pulsed laser waveforms based on beam splitting and delay is proposed. The proposed method can provide increased pulsed laser waveforms in laser-induced acoustics, laser welding, laser ablation, and laser-induced breakdown spectroscopy.

**Methods** First, an experimental optical layout (Fig. 2) based on beam splitting and delay is designed. Subsequently, a numerical simulation (Table 2 and Fig. 4) is conducted for a Gaussian waveform, and the parameters required to generate superimposed pulsed lasers with rectangular, triangular, hump-shaped, and dual-peak waveforms are obtained. Finally, the 532 nm laser generated by frequency doubling of the Nd:YAG laser enters the device. Superimposed pulsed lasers with different waveforms are obtained by varying the splitting ratio and delay. Two high-speed photodetectors and a high-speed digital oscilloscope are used to measure the waveforms of the original and superimposed pulsed lasers.

**Results and Discussions** Superimposed pulsed lasers with rectangular, triangular, hump-shaped, and dual-peak waveforms are successfully obtained (Fig. 6). The experimental results are consistent with the numerical simulation results. Because the waveform of the original laser pulse is not an ideal Gaussian waveform and the actual splitting ratio of the beam splitter is affected by the laser polarization direction, the top of the pulsed laser with a rectangular waveform is not sufficiently smooth. Subsequently, the pulsed laser with a rectangular waveform is simulated again with the waveform of the original pulsed laser, and the simulation results are consistent with the experimental results (Fig. 7). This method is suitable for experiments performed under strong light but is affected by the damage threshold. If the pulsed laser energy is exceptionally high, the damage threshold can be increased via beam expansion.

**Conclusions** This study presents a method that can flexibly adjust the pulsed laser waveform. By varying the splitting ratio and delay or increasing the numbers of beam splitters, a laser can yield superimposed pulsed lasers with different waveforms. A numerical simulation is performed, and the parameters required to generate pulsed lasers with rectangular, triangular, hump-shaped, and dual-peak waveforms are determined. Experiments are performed on the designed optical layout based on the parameters obtained from the simulation. The experimental results demonstrate that this method can yield pulsed lasers with various waveforms, such as rectangular, triangular, hump-shaped, and dual-peak waveforms, by varying the splitting ratio and delay. Because the waveform of the original pulsed laser is not an ideal Gaussian waveform and the actual splitting ratio of the beam splitter is different from the theoretical splitting ratio, the top of the pulsed laser with a rectangular waveform is not sufficiently smooth. This method provides a new special waveform pulsed laser generation scheme for laser-induced acoustics, laser welding, laser ablation, laser-induced breakdown spectroscopy, etc.

**Key words** laser optics; pulsed laser; adjustable laser waveform; beam splitter