

谐振腔振荡式飞秒单次脉冲信噪比的测量技术

石帅旭^{1,2,3} 杨庆伟¹ 欧阳小平¹ 夏素秋^{1,2} 朱建强^{1,3}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

³上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210

摘要 提出了一种谐振腔振荡式单次脉冲信噪比测量技术,通过精确设置谐振腔长度、两谐振腔之间的光程差、高反镜的反射或透射率,可简便地实现信噪比测量中高动态范围、大时间窗口和高时间分辨率三个关键指标。同时,采用全口径光束测量,保证了测量信号的高保真度。从理论上分析了谐振腔结构的各种功能和稳定性,以及色散引起的误差影响,在谐振腔中引入楔形高反镜,避免了次脉冲噪声的产生。理论上,该种结构可以实现 10^{10} ,甚至更高信噪比的测量,而且能达到百飞秒的高时间分辨率。

关键词 测量; 飞秒激光; 单次脉冲; 信噪比测量; 互相关仪; 谐振腔振荡

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0904001

Measurement Technique of Signal Noise Ratio Based on Resonator Oscillation for Femtosecond Single-Shot Pulse

Shi Shuaixu^{1,2,3} Yang Qingwei¹ Ouyang Xiaoping¹ Xia Suqiu^{1,2} Zhu Jianqiang^{1,3}

¹National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

Abstract A measurement technique of signal noise ratio based on resonator oscillation for single-shot pulse is proposed. Through precise setting of the resonant cavity length, optical path difference between two resonant cavities, and the reflectivity or transmittance of the high reflectivity mirror, the three key indicators of high dynamic range, large time window and high temporal resolution are easily realized. Meanwhile, high fidelity of measurement signal is guaranteed using full aperture beam measurement. Theoretically, various kinds of function and stability of the resonator structure are analyzed. Influence of errors introduced by dispersion on results are also analyzed. High reflectivity mirrors with wedge-shape are introduced in the resonator cavity to avoid the noise of minor pulses. In theory, the measurement of high signal noise ratio (10^{10}), even higher signal noise ratio, and high temporal resolution of hundred femtosecond can be realized in this construction.

Key words measurement; femtosecond laser; single-shot pulse; signal noise ratio; cross-correlator; resonator oscillation

OCIS codes 120.4570; 190.4360; 230.5750

1 引言

近年来,高能超短的飞秒激光系统以其聚焦光强可达 10^{22} W/cm^{2[1-4]} 甚至更高的优势,在惯性约束聚

收稿日期: 2016-03-08; 收到修改稿日期: 2015-05-12

基金项目: 惯性约束聚变能源先期关键技术合作研究(2012DFG62040)

作者简介: 石帅旭(1989—),男,硕士研究生,主要从事飞秒激光单次脉冲信噪比测量技术方面的研究。

E-mail: shuaixushi@hotmail.com

导师简介: 朱建强(1964—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光驱动器的总体光学设计、结构设计、相关检测技术和测控技术等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn(通信联系人)

变、天体物理、相对论等离子体物理、粒子加速新机制^[5]等诸多前沿课题应用需求的牵引下,得到了突飞猛进的发展。但是这些研究对飞秒激光的信噪比输出有着严格的要求,其主脉冲与前沿脉冲或噪声本底的信噪比应达到 10^{10} (相对于 10^{22} W/cm² 的聚焦强度而言) 甚至更高,以防止前沿脉冲或噪声本底在主脉冲之前使物质产生预等离子体,而影响激光与物质相互作用的机制^[6],因此首先要有相应的信噪比测量手段准确监测其信噪比,以协助飞秒激光系统提升和改善信噪比。而对于亚皮秒、甚至飞秒量级的激光脉冲,由于脉冲持续时间小于光电探头上升时间,因此无法直接采用光电器件进行测量,转而采用相关方法实现信噪比测量功能。目前,基于三阶互相关技术发展起来的扫描型互相关装置中,典型的为法国 Amplitude 公司的 Sequoia,其动态范围大于 10^9 (例如 10^{10}),时间窗口为 570 ps,时间分辨率为 120 fs。在单次互相关装置(SSCC)中,典型的为 Wang Y Z 等^[7]采用非共线交叉分波面法实现时间-空间编码、通过光纤阵列^[8]和散射噪声抑制来实现高动态范围的 SSCC,其动态范围大于 10^{10} ,时间窗口为 50 ps,时间分辨率为 700 fs。这两个装置分别代表了扫描型和单次脉冲信噪比测量装置的最好水平。

本文针对飞秒单次脉冲信噪比测量,采用分振幅法,基于谐振腔振荡式结构设了共线式、全口径的互相关测量技术,可实现大于 10^{10} 的高动态范围(可扩展),在保证 50 ps 时间窗口的同时,实现百飞秒的高时间分辨率,并且可完全保留被测脉冲的原始强度分布信息,不受强度和相位调制以及光束空间不均匀性的影响,具有更高的保真度。

2 谐振腔振荡式单次脉冲信噪比测量结构的原理

2.1 可扩展高动态范围和高时间分辨率

信噪比测量的 4 个主要指标是动态范围、时间窗口、时间分辨率和保真度^[9],其中最关键的是实现高动态范围。常用的光电探测器件,动态范围只有 10^3 。由于不能直接实现大于 10^3 动态范围的测量,目前通用的做法是将脉冲的不同强度位置进行不同倍率的衰减,以使超过光电探测器动态阈值的强度衰减到其可接收的动态范围内,再根据测量的强度分布结果和相应衰减倍率重建脉冲信号,得到初始脉冲信噪比特征的数据和图形^[8],从而实现高动态范围的测量。

本技术也是采用该种机理,并通过引入谐振腔振荡结构,使得在衰减方式上更加简单方便,动态范围可达 10^{10} ,并可扩展至更高,且可实现百飞秒的时间分辨率。其实现方式是,利用谐振腔的振荡和腔镜的部分透射原理,通过脉冲在腔中的不断反射振荡和输出,复制得到等比例衰减的基频和倍频脉冲序列,进而在两脉冲序列相应脉冲对之间引入不同的时间延迟,以完成倍频脉冲序列对基频脉冲序列的扫描测量。

如图 1 所示为谐振腔振荡式单次飞秒脉冲信噪比测量结构示意图,谐振腔采用对称共焦腔,其优点是自再现性好,在该腔内,任意旁轴光线可往返无限多次而不横向逸出,经过两次往返后即可实现光路自再现(光指向性不变)^[10],可以保证脉冲振荡复制的顺利进行,以及保证所复制脉冲序列的传播方向不变。

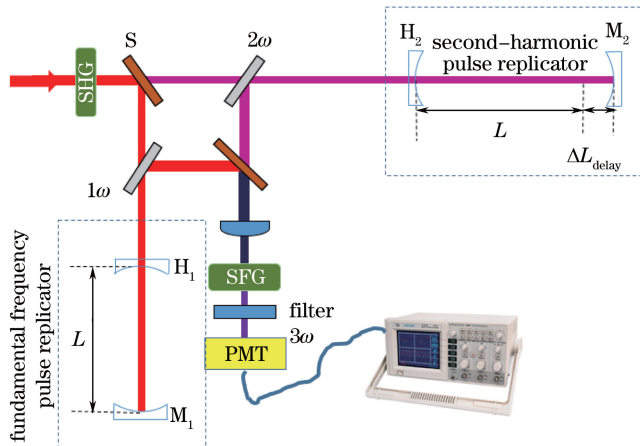


图 1 谐振腔振荡式单次脉冲信噪比测量结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of signal noise ratio measurement structure based on resonator oscillation for single-shot pulse

被测光进入该装置后,首先发生倍频作用,倍频光与基频光经谐波分离镜 S 后分开,分别进入各自的谐振腔中发生振荡,开始脉冲复制,两个谐振腔中 H_1 和 H_2 为球面高反镜,由腔内向腔外出射方向进入介质时,镀膜面的反射率分别为 R_1 和 R_2 ,相应地,其透射率分别为 T_1 和 T_2 , M_1 和 M_2 为球面全反镜,对应组成对称共焦腔。入射强度为 I 的脉冲每在谐振腔里来回反射一次,将出射一个强度为 $T'_{in} T_{in} \cdot R^{k-1} \cdot T_{out} T'_{out} \cdot I$ 的脉冲($R=R_1=R_2$, k 代表由谐振腔复制出射的第 k 个脉冲, $k-1$ 为相应的反射次数, T_{in} 和 T_{out} 分别为脉冲入射和出射谐振腔时高反镜镀膜面的透射率, T'_{in} 和 T'_{out} 分别为脉冲入射和出射谐振腔时高反镜未镀膜面的透射率),相当于对脉冲进行了衰减,对第 k 个复制脉冲来说,其衰减倍率为 $T'_{in} T_{in} \cdot R^{k-1} \cdot T_{out} T'_{out}$ 。

由此,在倍频脉冲复制器中依次产生 k 个等比衰减的倍频脉冲组成的扫描脉冲序列,来扫描基频脉冲复制器依次产生的 k 个等比衰减的基频脉冲组成的被测脉冲序列。

由此产生的 k 对脉冲,如图 2 所示,每对脉冲之间引入不同的时间延迟 τ , τ 通过在倍频谐振腔和基频谐振腔之间引入时间延迟 $\Delta T(k)$ 以及在两腔外部光路预先引入时间延迟 T_{window} 来实现。

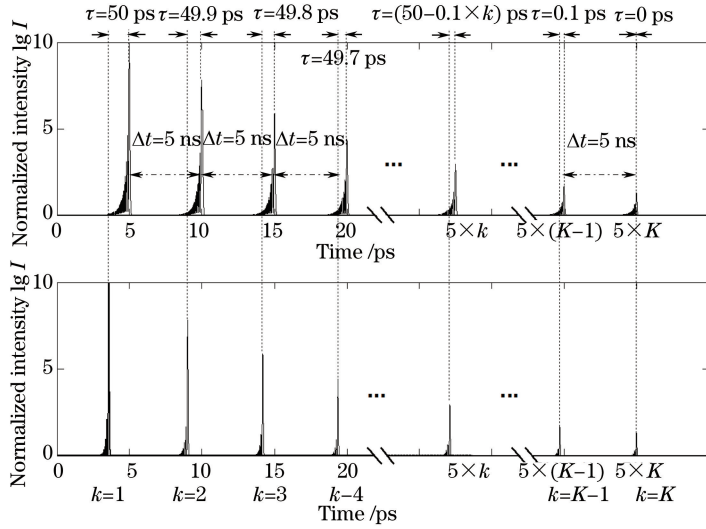


图 2 基频脉冲复制器和倍频脉冲复制器产生的脉冲序列图

Fig. 2 Pulse sequences generated by pulse replicators of fundamental and second-harmonic frequency

如图 1 所示,基频脉冲和倍频脉冲在各自谐振腔里同步来回反射,由于倍频谐振腔中微小长度差 ΔL 的存在,每来回一次,倍频谐振腔中的扫描脉冲的光程差就增加 $2\Delta L$,相应的时间延迟增加 $2\Delta L/c$,这里 $c=2.9979 \times 10^8$ m/s 为光速。则第 k 个脉冲对之间通过谐振腔产生的时间延迟

$$\Delta T(k) = k \cdot \frac{2\Delta L}{c}, \tag{1}$$

式中, ΔL 由时间分辨率 $T_{resolution}$ 来确定

$$\Delta L = \frac{1}{2} c \cdot T_{resolution} \tag{2}$$

而为了完成时间窗口为 T_{window} 的扫描,需要在谐振腔外部光路中,为倍频扫描脉冲光路预先引入 $-T_{window}$ 的时间延迟(负号表示扫描从主脉冲前开始,主脉冲前为负,后为正),这样随着倍频扫描脉冲序列时间延迟的不断增加,扫描的位置将不断地由主脉冲峰值前 T_{window} 的位置向主脉冲靠近,最终完成整个时间窗口的扫描。

那么,考虑预留的 $-T_{window}$ 的延迟,根据(1)式和(2)式,整个光路中第 k 对脉冲之间的总时间延迟 τ 为

$$\tau = -T_{window} + \Delta T(k) = -T_{window} + k \cdot T_{resolution}, \tag{3}$$

通常人们较关注主脉冲峰值前 50 ps 内的信噪比,因此一般令 $T_{window} = 50$ ps。时间分辨率 $T_{resolution}$ 受限于 ΔL 调节可达到的距离精度和稳定性,若取 $T_{resolution} = 100$ fs,则根据(2)式, $\Delta L = 15 \mu\text{m}$,目前通过机械和光学手段不难达到 $1 \mu\text{m}$ 的精度,因此 ΔL 的调节是可以准确实现的,稳定性将在第 3 节讨论。当时间分辨率

$T_{\text{resolution}}$ 和时间窗口 T_{window} 确定后,复制脉冲的总对数 K 由二者来决定

$$K = T_{\text{window}} / T_{\text{resolution}} \quad (4)$$

高反镜 H_1 和 H_2 的反射率 R 值由下式决定

$$V_{\text{contrast}} \cdot R^K = 1, \quad (5)$$

$$R = (1/V_{\text{contrast}})^{1/K}, \quad (6)$$

式中 $R=R_1=R_2$ 为谐振腔高反镜的反射率,(5)式含义为将主脉冲峰值和前沿脉冲或噪声本底对比度为 V_{contrast} 动态范围的脉冲,通过衰减,使得主脉冲峰值附近的信号强度达到与前沿脉冲或噪声本底处的信号强度相当的量级,从而适应光电探测器的动态范围而被接收。图 3 示意了谐振腔振荡复制脉冲序列的过程中,脉冲不同强度位置衰减倍率随扫描延迟时间的变化关系,该变化趋势符合高信噪比脉冲的强度分布趋势,因此可以对脉冲不同位置实现配套衰减。

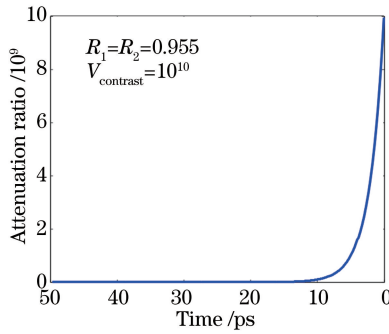


图 3 衰减倍率随扫描延迟时间的变化

Fig. 3 Variation of attenuation ratio with scanning delay time

若 $V_{\text{contrast}} = 10^{10}$, $T_{\text{window}} = 50$ ps, $T_{\text{resolution}} = 100$ fs,则由(2)、(4)、(6)式可得, $\Delta L = 15 \mu\text{m}$, $R = 0.955$,即将谐振腔光程差 ΔL 设置为 $15 \mu\text{m}$,高反镜内表面膜层反射率 R 镀为 0.955 ,便可实现 10^{10} 的高信噪比,同时,在保证大时间窗口的前提下,实现百飞秒的高时间分辨率。

由(5)式可知,对于更高的信噪比 V_{contrast} ,若保持 K 不变(即时间分辨率 $T_{\text{resolution}}$ 不变),那么只要减小高反镜的反射率 R 便可实现测量,即该谐振腔振荡式单次信噪比测量结构可扩展到更高的动态范围,可以满足对更高信噪比脉冲的测量。

该设计中光电探测器采用光电倍增管(PMT),谐振腔的长度 L 由 PMT 的响应时间决定,一般来说, PMT 的上升沿为 1 ns,下降沿为 2 ns,因此工程应用中通常设计 PMT 接收信号的最小间隔为 5 ns 以分辨开两个相连信号,所以,本设计中脉冲对之间的时间间隔设置为 $\Delta t = 5$ ns,那么

$$L = \frac{\Delta t \cdot c}{2} = 0.75 \text{ m}, \quad (7)$$

即谐振腔的长度为 0.75 m。

2.2 非线性作用方式

由于偏硼酸钡(BBO)晶体具有非线性系数大、相位匹配带宽大、损伤阈值高等优点^[11],飞秒脉冲脉宽和信噪比测量的自相关仪与互相关仪通常都采用该晶体。本方案中,倍频与和频过程亦均采用 BBO 晶体,倍频匹配方式为 Type I(o+o→e),基频光与倍频光经谐波分离镜分离后,由基频谐振腔和倍频谐振腔复制出脉冲序列,入射到和频作用的 BBO 晶体上,发生互相关作用,和频匹配方式为 Type II(o+e→e),需要强调的是,为了实现相位匹配,此时 o 光应取倍频光,e 光取基频光,需将和频过程的 BBO 晶体光轴以垂直于倍频过程 BBO 晶体光轴的方向放置。

2.3 高保真度,全口径光束测量

以往的单次脉冲信噪比测量装置,由于无法得到足够数量的脉冲做扫描测量,往往采用非共线和频方式的波前交叉来产生脉冲相对延时,将脉冲的波面分割为许多部分,每一部分产生不同量的时间延迟,将强度的时间分布转换为空间分布。由于是分波面延时,脉冲的波面在传播过程中难免会受到强度和相位的调制,

使波面分布不均匀,影响测量结果^[12]。

另外,这种方式一个关键的假定是认为在垂直光束传播方向的截面内,光场各处的时间与空间结构是相同的^[13],但实际上的光束质量并不一定理想,因此,可能会因光束的空间不均匀性而造成测量误差的存在^[14-15]。

该设计方案采用共线式全口径测量,可完全保留被测脉冲的原始强度分布信息,避免强度和相位调制以及光束空间不均匀性的影响,具有更高的保真度。

3 谐振腔稳定性分析

由(2)式可知,若要保持 $T_{\text{resolution}}=100$ fs 的时间分辨率,需要在谐振腔长度 $L=0.75$ m 的情况下,保证 $\Delta L=15$ μm 的微小长度差,这就要求谐振腔有极高的稳定性,使得机械扰动、温度变化等的影响保持在可接受的范围内。经分析,在 $L=0.75$ m 的条件下,谐振腔腔长的扰动量应稳定在 $\delta L=1.35$ μm 以下,而该稳定性主要应从热稳定性和机械稳定性两个方面考虑:

1) 热稳定性方面,需要保持环境温度的稳定,并选择低热膨胀系数的材料作为光学底板。环境温度的控制可采用高精密水冷温控设备,比如 LabTech 公司的便携式循环水冷却器,控温精度可达到 ± 0.02 $^{\circ}\text{C}$ (控温范围 $5\sim 35$ $^{\circ}\text{C}$),低热膨胀系数材料可采用典型的精密合金钢,其常温(20 $^{\circ}\text{C}$ 左右)下的热膨胀系数小于 1.6×10^{-6} $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ($0\sim 50$ $^{\circ}\text{C}$)^[16]。基于谐振腔腔长 $L=0.75$ m,采用钢制光学底板,温度控制在 (20 ± 0.02) $^{\circ}\text{C}$,可计算得其腔长浮动变化量 $\delta L' < 0.024$ μm ,小于 $\delta L=1.35$ μm ,可满足该谐振腔稳定性的要求。

2) 机械稳定性方面,由于腔镜自身固有频率和光学平台隔振特性的存在,使得腔镜对外界随机振动的响应不敏感,因此在实验室环境下,机械稳定性也是可以保证的。

另外,角漂可能会引起光程的微小变化,该角漂可能来自被测激光束本身,也可能来自谐振腔的腔镜等光学元件的调整架结构,该光程变化可等效认为是由角漂导致腔长变化所引起。一般激光器的角漂在 $10\sim 50$ μrad 以内,以最大角漂 50 μrad 为例进行分析,所引起的等效腔长变化量 $\delta L'=0.088$ μm ,远小于腔长允许扰动量 $\delta L=1.35$ μm 。而常规调整架引起的角漂在 2 μrad 以下,其引起的等效腔长变化量 $\delta L' < 1.5\times 10^{-6}$ μm ,影响更小。因此,角漂对测量的影响是可以忽略的。

4 色散对脉冲畸变的影响

本信噪比测量结构设计中,脉冲要在谐振腔中来回重复反射振荡,每次反射在谐振腔中传播 1.5 m,以 $V_{\text{contrast}}=10^{10}$, $T_{\text{window}}=50$ ps, $T_{\text{resolution}}=100$ fs 为例,由(4)式得, $K=500$,第 K 个脉冲经历的总光程 $L_{\text{all}}=750$ m。如果在空气中传播,则会因色散导致飞秒脉冲信噪比的降低,使信号失真。

折射率 n 随气压 P 的变化关系^[17]如下:

$$n = 1 + 10^8 \cdot \left(8342.13 + \frac{2406030}{130 - \sigma^2} + \frac{15997}{38.9 - \sigma^2} \right) \times \left(\frac{p}{720.775} \right) \left[\frac{1 + p(0.817 - 0.0133t) \times 10^{-6}}{1 + 0.0036610t} \right] + f(5.722 - 0.0457\sigma^2), \quad (8)$$

式中,气压 P 的单位为 torr, 1 torr = 133.322 Pa, t 为摄氏温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$, $\sigma=1/\lambda$ 为波数,单位为 $1/\mu\text{m}$,第三项为空气湿度项,可忽略, f 为湿度。

根据参考文献^[18],可以得到色散与脉冲信噪比之间的变化关系。对于脉宽为 30 fs,主脉冲峰值前 50 ps 处信噪比为 10^{10} 的高斯脉冲,在传播 $L_{\text{all}}=750$ m 的距离后,考虑二阶、三阶和四阶色散,其信噪比随谐振腔内气压变化的模拟结果,如图 4 所示。

图 4(a)为脉宽 30 fs、在 50 ps 处信噪比为 10^{10} 的入射高斯脉冲示意图。如图 4(b)所示,当谐振腔中为空气,即气压为标准大气压时,传输 $L_{\text{all}}=750$ m 后,信噪比由 10^{10} 降到 $10^{8.4}$,降低接近 2 个数量级(红色曲线),随着气压的降低(也即真空度的提高),信噪比变化减小,保真度随之提高,当真空度为 0.1 Pa 时,如图 4(b)中蓝色曲线所示,传播后脉冲曲线与入射脉冲曲线重合,信噪比保持初始状态不变,因此该信噪比装置测量时,基频谐振腔和倍频谐振腔应保持 0.1 Pa 的真空度,以消除色散影响,保证所复制脉冲序列具有足够的保真度。

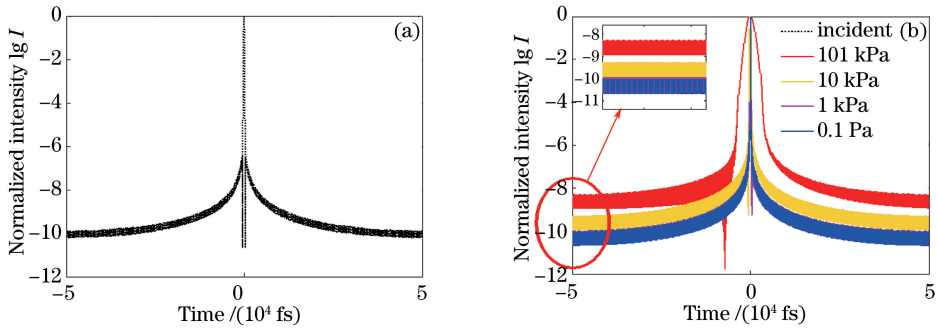


图 4 (a)脉宽为 30 fs,在 50 ps 处信噪比为 10^{10} 的入射高斯脉冲;
(b)入射脉冲传播 L_{all} 后,谐振腔中空气压强对信噪比的影响

Fig. 4 (a) Incident Gauss pulse with duration of 30 fs and signal noise ratio of 10^{10} at 50 ps;

(b) influence of air pressure on signal noise ratio in resonant cavity after incident pulse propagating the distance of L_{all}

5 楔形平凹球面镜去除次脉冲噪声

信噪比测量要避免引入噪声而出现假信号,如果该谐振腔结构的高反镜 H_1 和 H_2 与全反镜 M_1 和 M_2 采用普通的平凹球面结构,则会因其前后表面反射而引入次脉冲,影响测量的保真度。因此,为将次脉冲引出主光路之外,在平凹球面结构的平面引入 α ($1^\circ \sim 2^\circ$) 的楔形角,如图 5 所示,从而保证谐振腔在振荡过程中复制出干净的脉冲序列,实现准确、高保真的测量。

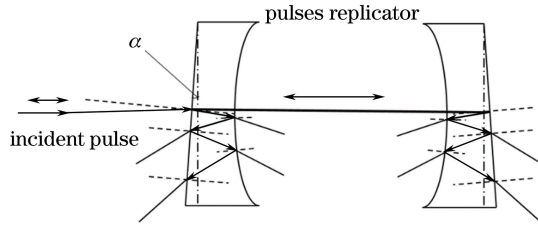


图 5 谐振腔引入楔形高反镜

Fig. 5 High reflectivity mirror with wedge-shape applied in resonant cavity

6 结 论

提出的谐振腔振荡式单次脉冲信噪比测量技术,解决了高动态范围的实现方式、飞秒脉冲在时间上无法被光电探测器直接分辨这两个最为关键的问题,理论上通过设置高反镜的反射率,可以实现单次脉冲大于 10^{10} 信噪比的测量,并同时兼顾 50 ps 的时间窗口和百飞秒的时间分辨率,且通过全口径测量,完全地保留了脉冲的原始强度分布信息,不受强度和相位调制以及光束空间不均匀性的影响,实现了更高的保真度。理论上分析了该结构中色散的影响,发现不同的真空度将导致色散畸变和信噪比的降低,在谐振腔中引入楔形高反镜,避免了次脉冲噪声的产生,证明了谐振腔振荡式单次脉冲信噪比测量结构的可靠性和可行性,为将来更高峰值功率激光系统的信噪比测量提供了方法。

参 考 文 献

- 1 Yu T J, Lee S K, Sung J H, *et al.* Generation of high-contrast, 30 fs, 1.5 PW laser pulses from chirped-pulse amplification Ti: sapphire laser[J]. Opt Express, 2012, 20(10): 10807-10815.
- 2 Chu Y X, Liang X Y, Yu L H, *et al.* High-contrast 2.0 petawatt Ti: sapphire laser system[J]. Opt Express, 2013, 21(24): 29231-29239.
- 3 Bahk S W, Rousseau P, Planchon T A, *et al.* Generation and characterization of the highest laser intensities (10^{22} W/cm²)[J]. Opt Lett, 2004, 29(24): 2837-2839.
- 4 Zhu Ping, Xie Xinglong, Jiao Zhaoyang, *et al.* Influence of wave-front error on temporal signal-to-noise ratio in large

- aperture ultrashort pulse focusing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1032001.
- 朱 坪, 谢兴龙, 焦兆阳, 等. 大口径超短脉冲聚焦系统波前误差对时间信噪比的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1032001.
- 5 A Abulikemu, A Abudurexiti. Self-magnetic field and proton acceleration in a laser plasma interaction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 021401.
- 阿不力克木, 阿不都热苏力. 激光等离子体中的自生磁场和质子加速[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 021401.
- 6 Mangles S P D, Thomas A G R, Kaluza M C, *et al.* Effect of laser contrast ratio on electron beam stability in laser wakefield acceleration experiments[J]. *Plasma Phys Contr F*, 2006, 48(12B): B83.
- 7 Wang Y Z, Ma J G, Wang J, *et al.* Single-shot measurement of $>10^{10}$ pulse contrast for ultra-high peak-power lasers[J]. *Sci Rep-Uk*, 2014, 4: 03818.
- 8 Zhang D F, Qian L J, Yuan P, *et al.* Fiber-array-based detection scheme for single-shot pulse contrast characterization[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(17): 1969-1971.
- 9 Ma Jingui, Wang Yongzhi, Yuan Peng, *et al.* Single-shot pulse-contrast measurement for high-intensity lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*. 2013, 50(8): 080008.
- 马金贵, 王永志, 袁 鹏, 等. 高强度激光脉冲信噪比的单次测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080008.
- 10 Zhou Bingkun. The principle of laser[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 33-38.
- 周炳琨. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 33-38.
- 11 Yang Sheng, Huang Xiaojun, Wu Zhaohui, *et al.* Broadband frequency doubling of Er-fiber mode-locked laser in BBO crystal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 121901.
- 杨 盛, 黄小军, 吴朝辉, 等. BBO 晶体用于掺铒光纤锁模激光宽带倍频的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 121901.
- 12 Yuan Suochao. Contrast measurement of ultra-short laser pulse with single shot[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 36.
- 袁索超. 超短脉冲对比度的单次测量技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013: 36.
- 13 Wang Xingtao, Yin Din jun, Shuai Bin, *et al.* Measure ultrashort pulsewidth 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.
- 14 Hao Xin, Zhu Qihua, Wang Xiao, *et al.* Influence of the spatial irregular intensity distribution on the single-shot second-order autocorrelator[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(10): 1553-1557.
- 郝 欣, 朱启华, 王 道, 等. 空间光强分布不均匀对二阶单次自相关脉宽测量的影响[J]. *中国激光*, 2008, 35(10): 1553-1557.
- 15 Ouyang X P, Liu D Z, Zhu B Q, *et al.* Diagnostics of pulse contrast for petawatt laser in SGII[C]. SPIE, 2015, 9345: 93450R.
- 16 Mou Sen. Study of the part deformation and grind ability of invar alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005: 7.
- 牟 森. 低膨胀合金构件变形及磨削性能的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005: 7.
- 17 Owens J C. Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition[J]. *Appl Optics*, 1967, 6(1): 51-59.
- 18 张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 7-14, 45.