

用于Z箍缩实验的多幅激光差分干涉与阴影 成像诊断系统

陈光华 但加坤 刘俊 雷江波 黄显宾 李剑峰

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 发展了一种基于角谱分离的全光分幅方式的多幅激光差分干涉与阴影成像诊断系统,可以在一次实验中拍摄2~4幅、幅间隔3~12 ns的高清晰阴影图像或干涉图像,并结合4f差分干涉仪结构,可用于具有大密度梯度特征的Z箍缩等离子体的电子密度的高时空分辨诊断。在PTS(Primary Test Stand)装置的柱状单壳层钨丝阵Z箍缩实验中,一序列等离子体内爆阴影图像给出了内爆速度、压缩比、磁瑞利泰勒(MRT)不稳定性演化过程等观测结果。在XP-1脉冲功率装置的平面钨丝阵实验中,得到的干涉图和电子密度计算结果给出了丝阵早期烧蚀阶段的等离子体分布及演化情况。

关键词 成像系统; 等离子体诊断; 多幅干涉; 分幅成像; Z箍缩; 电子密度

中图分类号 O436.1; O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1208007

Multiframe Laser Differential Interferometer and Shadowgraph System for Z-Pinch Experiments

Chen Guanghua Dan Jiakun Liu Jun Lei Jiangbo Huang Xianbin Li Jianfeng

Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract A multi-frame interferometer and shadowgraph system based on angular-spectrum-division all-optical frame imaging technique has been developed. The system is capable of shooting 2~4 high definition shadowgraphs or interferograms in one shot with frame interval of 3~12 ns. By the 4f differential interferometer structure, the system is applicable for diagnostics of electron density of Z-pinch plasma with high temporal and spatial resolution of large density gradient. In the cylindrical single-shell tungsten wire array Z-pinch experiments conducted on Primary Test Stand, a sequentially timed shadowgraphs of implosion plasma give implosion velocity, compression ratio, magneto Rayleigh Taylor (MRT) instability evolution, etc. In the planar tungsten wire array experiments conducted on XP-1, the interferograms and calculated electron densities give plasma distribution and evolution in the early stage of wire array ablation.

Key words imaging systems; plasma diagnostic; multi-frame interferometer; frame image; Z-pinch; electron density

OCIS codes 110.4155; 110.3175; 120.3180; 120.4820

1 引言

在Z箍缩电磁内爆实验研究中,内爆流体动力学特性诊断是Z箍缩物理实验的关键诊断技术之一,主要测量内爆负载在强脉冲磁场驱动下的内爆过程中各参数的变化规律,涉及从可见光到X光^[1]的多种诊断技术。激光差分干涉与阴影成像诊断技术既能够诊断等离子体电子密度,又可以诊断物体形态变化,并且具有很好的环境适应性,特别适用于Z箍缩电磁内爆和冲击等具有强振动干扰环境的实验研究^[2-7]。Z箍缩过程复杂且迅速,放电过程可以短至几十纳秒,涉及原子、电离、辐射物理和非线性流体动力学等许多方面^[8],普通的激光干涉诊断系统一次实验只能拍摄一个时刻的二维图像或者记录一个或多个通道的连续变化^[9],

收稿日期: 2015-06-19; 收到修改稿日期: 2015-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(11075145, 11202194, 11272298)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2013A0401017)

作者简介: 陈光华(1973—),男,硕士,研究员,主要从事激光干涉测量技术方面的研究。E-mail: chen_guanghua@sina.com

不能给出Z箍缩演化过程图像。为了获得Z箍缩内爆过程参数的变化规律,一种方法是采用单幅诊断系统,通过不同延时的多次重复实验可以获得电磁内爆演变过程,但这是多次实验结果的组合,要求多次实验结果有很好的重复性,然而实际上很难实现。因此需要发展能够在一次实验中拍摄多幅图像的多幅激光干涉和阴影诊断系统。把普通单幅诊断系统的光源换成序列脉冲激光或连续激光,并把记录设备换成高速分幅相机就能方便地实现从单幅诊断系统向多幅诊断系统的转变^[10],但是图像的空间分辨和时间分辨能力受制于高速分幅相机的性能。相对于激光加载实验,Z箍缩实验往往要求较大的视场范围(边长大于20 mm)。在这样大视场范围内达到十微米级别的空间分辨和纳秒级别的时间分辨,有助于获取等离子体演化过程的细节(如成丝、拖尾、扰动等)信息。目前的高速分幅相机,受机械装置响应速度或电子学系统带宽的限制,难以满足Z箍缩实验的高时空分辨诊断需求。

本文提出了一种多幅激光差分干涉与阴影成像诊断系统,该系统采用基于角谱分离的全光分幅方式,具有高空间分辨能力和时间分辨能力,能够在一次实验中拍摄多幅高清晰图像,在此基础上结合4f差分干涉仪^[2,11-12],可以诊断大密度梯度等离子体的参数变化规律,包括丝烧蚀、晕等离子体的产生和演化、内爆中负载空间参数变化、内爆轨迹、内爆速度和内爆动能、对称性、流体力学不稳定性的产生与发展等,为Z箍缩研究校核、修正物理模型和计算编码提供了分析依据。

2 诊断系统

多幅激光差分干涉与阴影成像诊断系统由激光照明系统和接收系统两部分组成,其中接收系统可以实现干涉或者阴影成像。不考虑干涉时,全光分幅成像光路如图1所示,激光照明系统利用分光延时光路把一束单脉冲激光(波长为532 nm,脉冲半高宽约为150 ps)分成2~4束,每束激光之间有一定的时间延迟(3~12 ns),这几束激光再以一定的小角度立体锥角(约2.5°)从多个方向照明待测靶,然后多幅偏轴成像系统将多束激光分别投影在一个图像传感器的不同区域,实现了全光分幅方式多幅成像,拍摄幅数为2~4幅,幅间隔3~12 ns,每幅的时间分辨能力则由激光的脉冲宽度决定(约150 ps),在高速分幅的同时不牺牲成像质量。

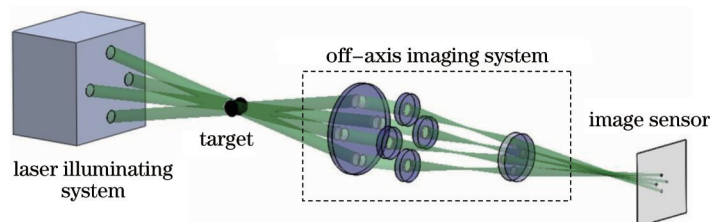


图1 全光分幅成像光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of all-optical multi-frame photography

偏轴成像系统由前后两组镜头组成,其中前镜头组包括主镜头和其后的一组并排放置的透镜,该结构把前组镜头的入射面划分成了若干个区域。目标物体、偏轴成像系统的前后两组镜头、以及图像传感器构成了偏轴4f成像结构,其物像关系如图2所示,目标物体位于前镜头组的前焦面,图像传感器位于后镜头的后焦面,前后镜头组之间有足够的距离可以放置差分干涉仪。经过目标上一点的激光照射到前镜头组入射面的不同区域后将形成沿不同方向传播的光束,每个方向对应不同的角谱,在后镜头的后焦面的不同位置形成目标物的像,从而将目标物的像在传感器上分开。这里,实际上对前后两组镜头之间的距离并没有严格要求。

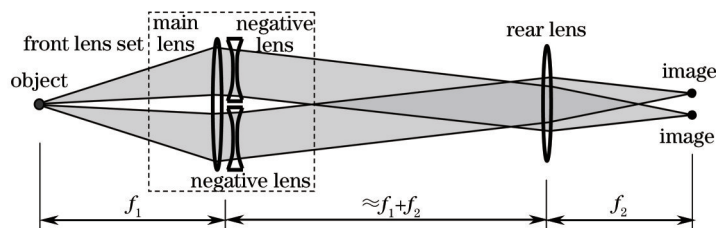


图2 偏轴4f成像结构的物像关系, f_1 为前镜头组的组合焦距, f_2 为后镜头的焦距

Fig.2 Object-image relationship of off-axis 4f imaging system where f_1 is the combined focal length of the front lens set and f_2 is the focal length of the rear lens

差分干涉仪的干涉腔采用由一个分束器和两个反光镜组成的环形干涉腔结构,将该环形干涉腔放置于偏轴4f成像系统的前后两组镜头之间,便实现了多幅差分干涉测量,如图3所示。基于4f成像结构的多幅差分干涉仪可以同时满足较高的干涉条纹空间载波频率和较小的波前剪切量,可用于Z箍缩等离子体或气体激波等具有大密度梯度特征的物质密度诊断。当需要阴影诊断时,只需移除干涉腔中的分束器便能实现从差分干涉到阴影诊断的转换。考虑到Z箍缩等离子体的强烈辐射会淹没干涉图像,这里采用中性密度滤光片和窄带干涉滤光片的组合过滤背景辐射。因为多幅图像共用一个干涉腔和一个图像传感器,由此简化了系统结构和操作,提高了测量可靠性。

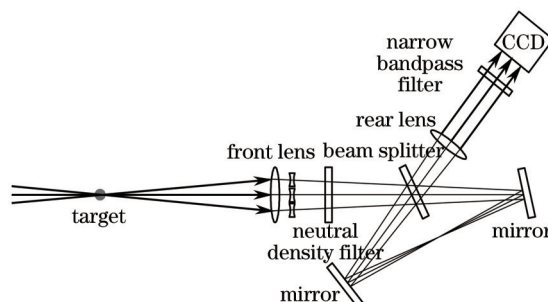


图3 多幅激光差分干涉与阴影成像诊断系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of multi-frame laser differential interferometer and shadowgraph system

3 实 验

3.1 PTS 激光阴影诊断实验

在中国工程物理研究院 Primary Test Stand (PTS)装置上开展了丝阵Z箍缩电磁内爆的阴影诊断实验。PTS装置是国内首台超高功率、多路并联运行的脉冲功率装置(或脉冲功率加速器),装置标称储能7.2 MJ,负载输出电流8~10 MA,电流前沿90 ns,电流汽化流经的丝阵负载产生等离子体,电流产生的强磁场驱动等离子体向心箍缩,当等离子体箍缩到轴心时产生强X射线辐射。此处负载为由100~200根钨丝构成的柱状单壳层钨丝阵。采用阴影成像诊断系统(幅间隔6 ns)拍摄丝阵烧蚀之后从等离子体开始向心运动到内爆滞止阶段的Z箍缩演化过程图像。实验中获得的四分幅激光阴影图像如图4~6所示,图中时间表示拍摄时刻相对X光峰值时刻的延时(通过同时监测激光脉冲波形和等离子体X射线辐射得知),从图中可以获得等离子体内爆轨迹、内爆速度、压缩比、磁瑞利泰勒(MRT)不稳定性、拖尾、以及回流柱膨胀不稳定性等电磁内爆演化过程的丰富的观测结果。

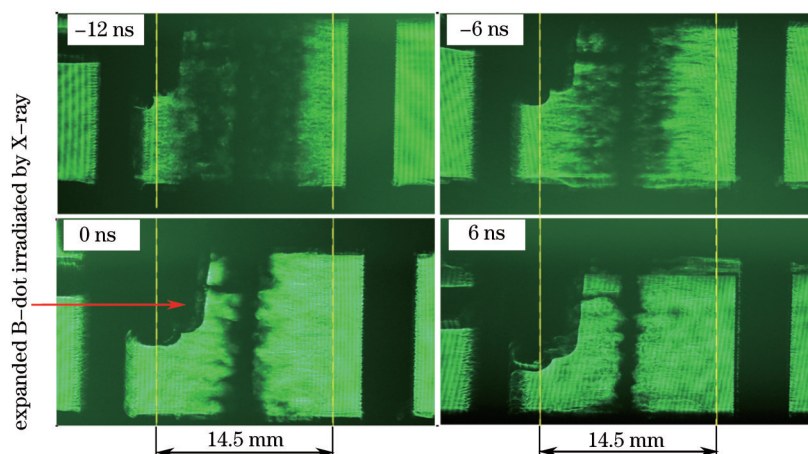


图4 钨丝阵(直径:7.7 μm,钨丝数量:180)Z箍缩阴影图像(相对X光峰延时-12、-6、0和6 ns,平均内爆速度为 2.4×10^5 m/s,压缩比约为10,根据丝阵质量和平均内爆速度计算主内爆的动能约为70 kJ)

Fig.4 Shadowgraphs of tungsten wire array (diameter: 7.7 μm, number of tungsten wire: 180) Z-pinch obtained at -12, -6, 0 and 6 ns relative to X-ray peak (the average imploding velocity is 2.4×10^5 m/s, the compression ratio is about 10, and the imploding kinetic energy is about 70 kJ according to the mass of wire array and the average imploding velocity)

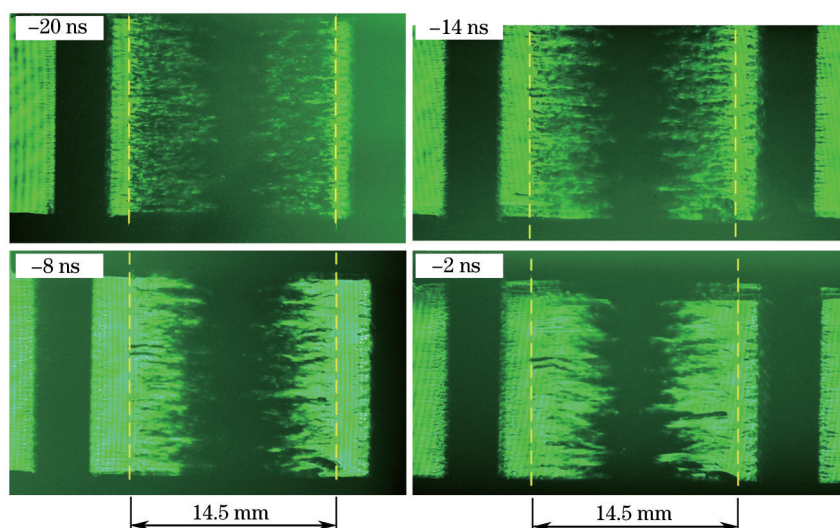


图5 钨丝阵(直径: 10, 钨丝数量: 150)Z箍缩阴影图像(相对 X 光峰延时-20、-14、-8 和-2 ns, MRT 不稳定性表现出很好的角向关联, 不稳定性波长随内爆过程变长)

Fig.5 Shadowgraphs of tungsten wire array (diameter: 10 μm , number of tungsten wire: 150) Z-pinch obtained at -20, -14, -8 and -2 ns relative to X-ray peak (the MRT instability shows well angular relevance, and the instability wavelength increases with the imploding process)

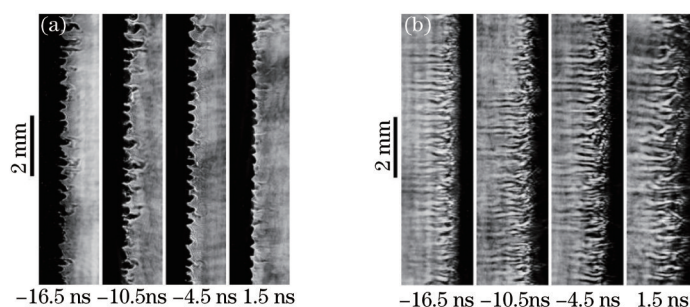


图6 Z箍缩过程中回流柱的不稳定性。(a) 长波不稳定性; (b) 短波不稳定性

Fig.6 Instability of reflux column under Z-pinch process. (a) Long wave instability; (b) short wave instability

3.2 XP-1 激光差分干涉诊断实验

XP-1 是一个中小型的脉冲功率装置, 输出电流约为 250 kA, 电流前沿约为 100 ns。利用激光差分干涉诊断系统对 XP-1 装置的丝烧蚀过程进行了诊断, 实验结果如图 7 所示, 图中时间表示拍摄时刻相对电流上升起点的延时。负载为四根平行钨丝构成的平面丝阵, 诊断系统拍摄幅数为两幅, 幅间隔为 10 ns。对干涉图进行数据处理, 得到激光波前的差分干涉相位差的二维分布, 从中可以看出丝烧蚀形成的等离子体从丝上剥离形成触须状等离子体晕丝向轴心运动。选取相位差二维分布图中包含等离子体晕丝的两个局部区域 A 和 B 进行数据处理, 得到等离子体晕丝的电子面密度分布, 可以得出钨丝的烧蚀速率在丝的不同位置处是不同的。假定晕丝呈圆柱对称分布, 进一步对晕丝内位于钨丝下方特定距离处的电子面密度分布进行 Abel 反演计算, 得到该位置处沿等离子体晕丝径向的电子体密度分布, 得出总体上电子体密度随时间增大, 体密度梯度也随时间增大, 在电流起点之后 50 ns, 区域 A 内距离钨丝 230 μm 处测得电子体密度达到了 $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 体密度梯度达到了 $3.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-4}$ 。

4 讨 论

多幅激光差分干涉与阴影成像诊断系统采用基于角谱分离的全光分幅成像技术实现高时空分辨能力, 采用基于 4f 成像结构的环形差分干涉仪实现大密度梯度等离子体的电子密度诊断。该技术成功应用于 Z 箍缩物理实验诊断, 获取了等离子体产生与演化、内爆时间历程、对称性、不稳定性的产生与发展等内爆动力学特性。

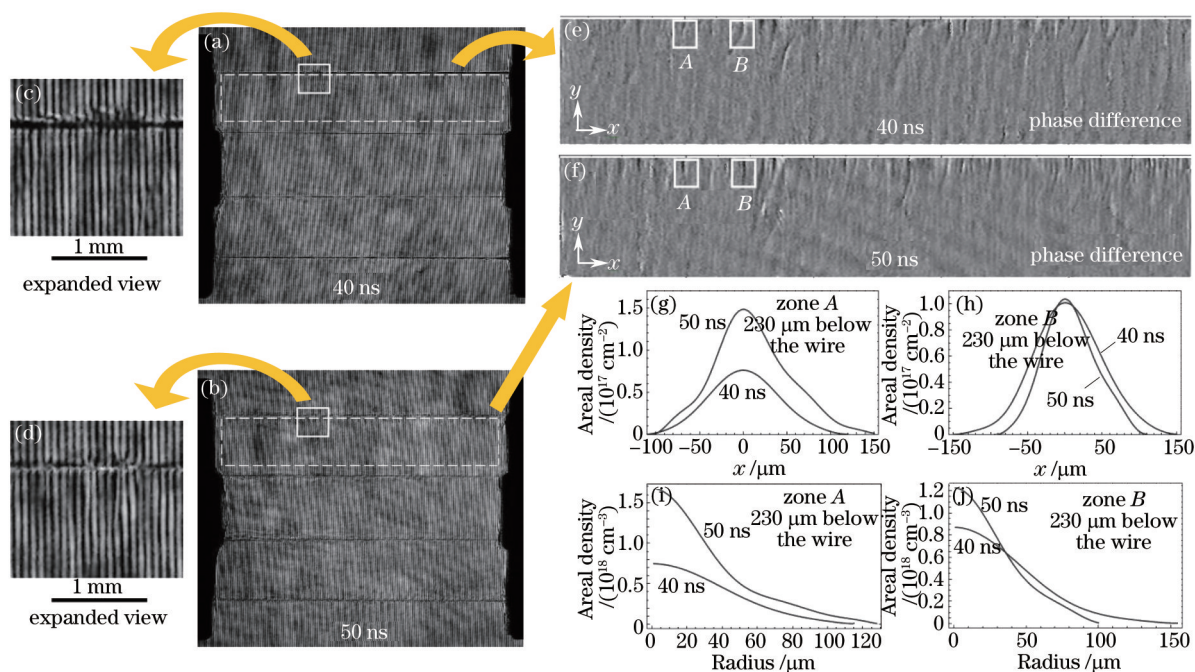


图7 相对电流上升起点延时40 ns和50 ns时的平面钨丝阵(直径:7.5 μm,钨丝数量:4)Z箍缩实验结果。(a)~(d)干涉图像;(e)~(f)相位差二维(2D)分布;(g)~(h)电子面密度分布曲线;(i)~(j)电子体密度分布曲线(以电流起点为零时刻)

Fig.7 Experimental results of planar tungsten wire array (diameter: 7.5 μm, number of tungsten wire: 4) Z-pinch obtained at 40 ns and 50 ns relative to the start of current rise. (a)~(d) Interferograms; (e)~(f) 2D phase difference distribution; (g)~(h) electron areal density distributions; (i)~(j) electron volume density distributions

需要指出的是,这里的全光分幅技术不是同轴分幅,而是呈一定小角度锥角的准同轴分幅,这会带来一些限制。首先,多束激光照射目标的入射角度有差异,由此引起的激光在等离子体中的传播路径差异将导致额外的激光相位变化。其次,成像视角的差异也会影响图像之间的比较。另外,由于等离子体对入射光线的折射作用,多束入射激光经过目标靶以后不同光束之间可能有部分重叠,这重叠的部分在后期无法通过光路分开,将导致多幅图像之间产生重叠。当等离子体电子密度 n_e 远小于激光截止电子密度 n_c 时,激光离开发出等离子体时的偏转角 θ 为

$$\theta \approx \frac{1}{2n_c} \frac{d}{dy} \int n_e dl, \quad (1)$$

式中 $\int n_e dl$ 为线积分电子密度,可近似成电子面密度, y 为电子面密度的梯度方向。由此可见,激光的偏转角由等离子体的电子面密度梯度决定。要完全避免图像重叠现象,入射光束之间的夹角不能小于激光偏转角。这意味着对于具有较大电子面密度梯度的等离子体,入射光束之间的夹角不能设计得太小,因此图像的幅数也受到了限制。要进一步解决这些问题,需要发展全光同轴分幅成像技术。

5 结 论

采用基于角谱分离的全光分幅方式,即采用不同角谱编码(即不同入射角度)的序列脉冲激光照明等离子体,再利用偏轴 $4f$ 成像系统将不同角谱成份包含的不同时刻的等离子体信息分别传递到记录介质的不同区域,实现了Z箍缩等离子体的高时空分辨的多幅激光差分干涉与阴影成像诊断。

参 考 文 献

- 1 Wu Yufen, Xiao Shali, Yang Qingguo, *et al.*. Monochromatic imaging of Z-pinch Al plasma based on the logarithmic spiral crystal[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0215003.
毋玉芬,肖沙里,阳庆国,等.基于对数螺线晶体Z箍缩铝等离子体单色成像研究[J].中国激光,2012,39(2):0215003.
- 2 G H Chen, S X Liu, X B Huang, *et al.*. Laser differential interferometer for diagnostics of gas-puff Z-pinch[J]. IEEE Transactions on

- Plasma Science, 2009, 37(12): 2359–2364.
- 3 V V Aleksandrov, G S Volkov, E V Grabovskii, *et al.*. Interferometric measurements of the plasma density at the Z-pinch periphery in the angara-5-1 facility[J]. Plasma Physics Reports, 2004, 30(3): 218 - 227.
- 4 N S Qi, S F Fulghum, R R Prasad, *et al.*. Space and time resolved electron density and current measurements in a dense plasma focus Z-pinch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(4): 1127–1137.
- 5 S A Pikuz, V M Romanova, N V Baryshnikov, *et al.*. A simple air wedge shearing interferometer for studying exploding wires[J]. Review Science Instruments, 2001, 72(1): 1098–1100.
- 6 Q Zhu, J Yamada, N Kishi, *et al.*. Investigation of the dynamics of the Z-pinch imploding plasma for a laser-assisted discharge-produced Sn plasma EUV source[J]. Journal Physics D: Applied Physics, 2011, 44(14): 145203.
- 7 Chen Guanghua, Chen Lin, Liu Shouxian. Electron density measurement for C-gun plasma using shearing interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(12): 2192–2195.
陈光华, 陈 林, 刘寿先. 剪切干涉测量电缆枪等离子体电子密度[J]. 光子学报, 2007, 36(12): 2192–2195.
- 8 D D Ryutov, M S Derzon, M K Matzen. The physics of fast-Z-pinch[J]. Reviews of Modern Physics, 2000, 72(1): 167–223.
- 9 Jiang Wei, Chen Lin, He An, *et al.*. A sensitive interferometer for density measurements of pulsed plasma[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(9): 1286–1290.
姜 巍, 陈 林, 何 安, 等. 一种用于脉冲等离子体电子密度测量的高灵敏度干涉仪[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1286–1290.
- 10 Liu Shouxian, Lei Jiangbo, Chen Guanghua, *et al.*. Simultaneous line imaging and plane framing imaging velocity interferometer for shock physics[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108007.
刘寿先, 雷江波, 陈光华, 等. 同时线成像和分幅面成像任意反射面速度干涉仪测速技术[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108007.
- 11 G H Chen, Z R Li, S X Liu. A differential interferometer with the four-focus imaging system[C]. SPIE, 2007, 6279: 62794I.
- 12 Chen Guanghua, Li Zeren, Liu Shouxian, *et al.*. Defocused 4f differential interferometer for diagnosing electron density distribution in plasma sheath[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(7): 1023–1026.
陈光华, 李泽仁, 刘寿先, 等. 用离焦4f差分干涉仪测量等离子体壳层电子密度[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(7): 1023–1026.

栏目编辑: 刘丰瑞