

# 成像型任意反射面速度干涉仪系统的光学系统设计

徐 涛 王 峰 彭晓世 刘慎业

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 成像型任意反射面速度干涉仪(VISAR)是激光驱动聚变实验中诊断冲击波速度的重要设备,能对在透明聚变材料中传播的冲击波进行速度测量。介绍了在已有的神光 III 原型装置的 VISAR 系统基础上进行改进获得的 30 倍成像型 VISAR 系统。详细阐述了其光学系统的构成和部分光学元件参数,综合考虑已有 VISAR 系统存在的一些问题,对系统光路进行了重新设计,放大倍率适合光学条纹相机的记录长度,设计结果表明空间分辨率优于  $5\ \mu\text{m}$ ,照明均匀,结构简洁易于加工安装,较以往系统有所提高。

**关键词** 光学设计;冲击波测量;任意反射面速度干涉仪;成像质量

**中图分类号** O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0722001

## Optical System Design of Imaging Velocity Interferometer System for Any Reflector

Xu Tao Wang Feng Peng Xiaoshi Liu Shenye

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** Imaging velocity interferometer system for any reflector (VISAR) is an important diagnostic tool for various experiments involving laser-driven shock-wave propagation. On the basis of the imaging VISAR implemented at the Shenguang-III prototype laser facility, a novel imaging VISAR system with a magnification ratio of 30 is proposed. Making use of the imaging VISAR, velocity of free surface and shock-wave traveling through transparent media can be measured. The main improvement is made due to the disadvantage of the former system. Details of the optical designing are also described. The design results show that the spatial resolution is better than  $5\ \mu\text{m}$ , and the whole system is more effective than the former.

**Key words** optical design; shock-wave measurement; velocity interferometer system for any reflector (VISAR); imaging quality

**OCIS codes** 220.2740; 080.2740; 110.2960

### 1 引 言

惯性约束聚变(ICF)实验中,为了使压缩过程接近等熵过程,需要对激光进行脉冲整形,而脉冲整形需要根据冲击波速度、冲击波会聚时间等参数来进行表征。任意反射面速度干涉仪(VISAR)可以通过测量冲击波阵面来诊断在透明材料(如 CH 材料)中传播的冲击波速度<sup>[1~3]</sup>,可解决扫描光学高温计等被动式冲击波诊断设备无法用于透明聚变材料中冲击波速度诊断的问题<sup>[4]</sup>,现已被神光 III 原型激光装置用于冲击波速度的实验诊断<sup>[5]</sup>。VISAR 系统利用外置主动式的探针激光照明目标靶,将透明

材料中的冲击波波阵面反射的信号光通过光学系统进行收集并传递进入干涉系统,利用多普勒频移的原理对目标靶的冲击波速度信息进行分析<sup>[6]</sup>。而成像型 VISAR 系统在传统技术上改进,将收光系统改为成像系统,利用多次像传递将目标靶面成像于光学条纹相机的狭缝上,使得系统具有空间分辨的能力<sup>[7,8]</sup>,有利于分析冲击波在靶中各个空间位置不同的作用情况。VISAR 系统主要由一个极精密光学系统构成,特别是干涉系统的零程差状态难以获得和保持<sup>[9]</sup>,故要求整个系统安装在固定位置,形成一个稳定可靠的光路。针对神光 III 原型激

收稿日期: 2011-01-24; 收到修改稿日期: 2011-02-18

作者简介: 徐 涛(1985—),男,硕士,研究实习员,主要从事惯性约束聚变光学诊断设备研发方面的研究。

E-mail: xutzo@163.com

光装置 VISAR 系统存在的不足,本文介绍了一种改进的成像型 VISAR 系统,主要阐述了系统的光学结构设计,分析了系统结构的改进,并对该系统进行了成像质量分析和照明分析。

## 2 技术要求

VISAR 的光学系统大致可分为两部分:照明光路部分和成像光路部分,作用分别是传递探针激光对目标靶进行照明和收集目标靶反射的信号光并进行成像。

系统利用多模熔石英光纤(芯径 1 mm,数值孔径 0.15)将波长为 532 nm 的探针激光传递进入光学系统的照明光路,并通过成像光路的一部分成像到目标靶上,实现目标靶面的照明。为保证良好的成像,目标靶要求照明均匀。同时,为保证光纤传导的激光能有效利用且较少被杂散到成像光路中形成干扰,要求照明光路的数值孔径尽可能大,使得光纤传输的激光能充分耦合进入照明光路。

系统利用成像光路收集冲击波波阵面反射的信号光,并经过两次像面传递将目标靶面成像于条纹相机记录面上实现空间分辨。在成像光路中加入干涉系统,可得到垂直于相机狭缝方向的干涉条纹。由于条纹相机阴极长度约为 20 mm,为保证阴极的有效利用,系统必须具有一定的放大倍率。成像系统应满足如下技术指标:1)探针光波长:532 nm;2)视场范围:1 mm;3)放大倍数:30;4)物方空间分辨:5  $\mu\text{m}$ 。

## 3 光学系统结构

使用 Code V 软件设计了整个光学系统,其照明光路部分如图 1 所示。其中 TCC 是目标靶位置,blast window 是成像系统前面的保护玻璃,vacuum

window 是用于靶室封真空的保护玻璃,BS1 是分束镜,L1 是第一次成像透镜,L2 是光纤前置镜,M2 和 M1 是反射镜, fiber port 是光纤出口位置。blast window, L1 和 vacuum window 三者作为整体被安装在神光 III 原型激光装置的靶室内,既作为照明光路的一部分,也作为成像系统的一部分。照明部分工作过程为:从光纤发出的探针激光依次经过 L2, BS1, M2, M1, vacuum window, L1, blast window 到达目标靶 TCC。通过 L1 和 L2 的成像,使得光纤端面 1:1 成像于目标靶面,芯径为 1 mm 的光纤端面恰好照明 1 mm 的视场。

成像系统的光路如图 2 所示。其工作过程为:由目标靶面反射的光由 L1 收集,然后依次经过 vacuum window, M1, M2, 经 BS1 反射成像于一次像面 IP1,放大倍率为 5。M1, M2 及其后的光学系统被放置在靶室外的光学平台上。经反射镜 M3 转折,并由准直透镜 L3 将 IP1 处的一次像面的光束准直为平行光束,经由分束镜 BS2,将光束分为相互垂直的两部分,分别进入支路一和支路二。在支路一中,平行光束经反射镜 M4, M5 的调整,进入到由分束镜 BS3, BS4 和反射镜 M6, M7 组成的马赫-曾德尔干涉仪(其中一臂有标准具,标准具未标出)。BS3 倾角 4.5°,将光等分为两部分,两束光分别经 M6, M7 反射后在 BS4 处汇合,由于干涉仪两臂光程不同,形成干涉条纹,然后进入中继透镜 L4。L4 将从干涉仪出来的干涉光会聚到二次像面 IP2,从靶面到二次像面的放大倍率仍为 5。L5 为最后成像透镜,放大倍率为 6, IP3 为最终像面,条纹相机狭缝即置于此处。反射镜 M8, M9 为调整机构,以使入射光轴与条纹相机光轴重合。在支路二中,平行光束经由反射镜 M10 转折进入干涉系统中,其余光路与支路一类似。

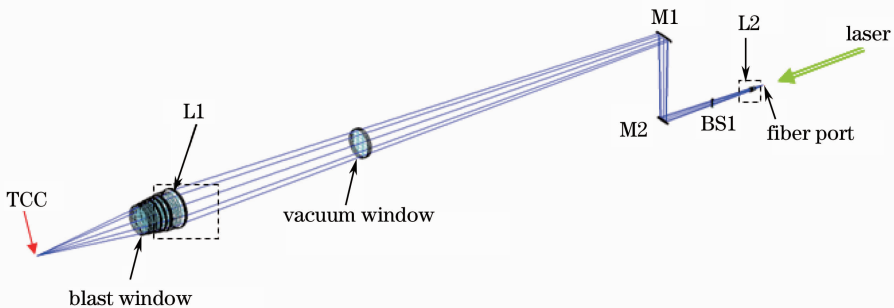


图 1 照明系统光路结构

Fig. 1 Optical configuration of illuminating system

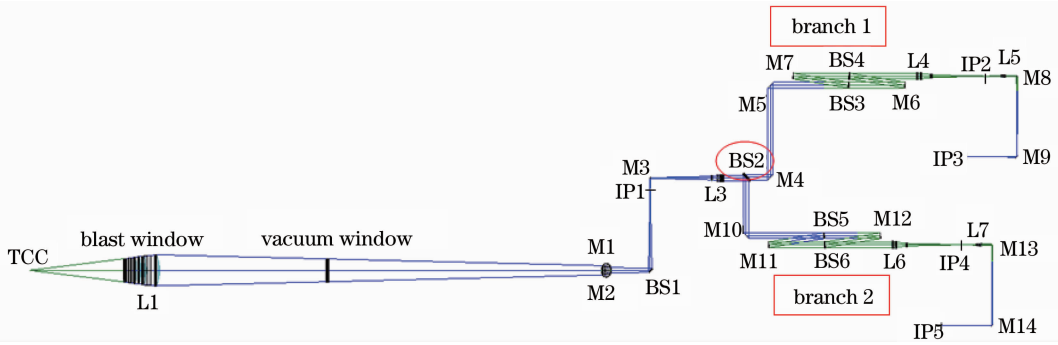


图 2 成像系统光路结构

Fig. 2 Optical configuration of imaging system

## 4 系统改进分析

相比于神光 III 原型激光装置中已有的 VISAR 系统<sup>[5,9]</sup>, 本文报道的 VISAR 系统在光学结构上做出了几处改进。针对原有系统存在的问题, 对整个光学系统进行了适当优化。首先, 将原系统中放置在靶室内的成像透镜由两组透镜改为一组透镜 L1, 如图 3 所示。blast window 距目标靶 423 mm, blast window, 透镜组 L1 和 vacuum window 的组

合结构焦距为 472 mm, 其具体结构参数如表 1 所示, 光阑设置在 blast window 前表面上, 直径为 100 mm,  $F$  数为 4.72, 孔径角大小满足靶室内的安装要求(不遮挡打靶激光)。由于靶室内具有极强的辐射环境, 为避免玻璃材料在强辐射的作用下变暗, 靶室内的光学结构全部采用熔石英玻璃。此外, L1 和 blast window 两部分安装在支撑部分的末端, 相比于原系统两部分的结构, 易于拆卸、更换和防护。

表 1 靶室内成像部分的详细参数表

Table 1 Particular parameters of the imaging system inside chamber

Surface number	Surface type	Y radius / mm	Thickness /mm	Material	Refraction mode	Y semi-aperture /mm
Object	Sphere	Infinity	4231		Refraction	
Stop	Sphere	Infinity	15	Fused silica	Refraction	50
2	Sphere	Infinity	10		Refraction	51.2213
3	Sphere	-326.0956	12	Fused silica	Refraction	51.9186
4	Sphere	2038.6733	11.2		Refraction	54.1559
5	Sphere	-464.6459	11.2835	Fused silica	Refraction	55.6461
6	Sphere	-269.8695	4.3		Refraction	57.1819
7	Sphere	-17785.6904	14.8209	Fused silica	Refraction	58.8779
8	Sphere	-282.1218	1		Refraction	59.8357
9	Sphere	893.9247	15.6403	Fused silica	Refraction	60.4531
10	Sphere	-366.3228	10		Refraction	60.6504
11	Sphere	-151.2152	20.0695	Fused silica	Refraction	60.5452
12	Sphere	2163.9905	15.4		Refraction	64.1256
13	Sphere	-1695.3345	23.2859	Fused silica	Refraction	66.3707
14	Sphere	-160.1580	748		Refraction	67.6081
15	Sphere	Infinity	15	Fused silica	Refraction	50.3191
16	Sphere	Infinity	1250		Refraction	50.0864

其次, 为解决非平行光束通过分束镜进行分束后引起较大像散的问题, 原系统采用了补偿镜对像散进行补偿, 其原理是利用一块与分束镜成特定角度的等厚平行平板, 对分束镜引起的像散光束进行矫正, 再将非平行光束传递进入准直透镜和干涉系

统中, 其光学过程为: 先分束后准直。而本系统选择的方式是: 先准直再分束, 具体方式是: 在一次像面后, 利用一个准直透镜 L3(如图 4 所示)将光束准直为平行光, 再利用分束镜分束, 依次通过反射镜后将光束传递进入干涉系统中, 如图 5 所示。由于平行

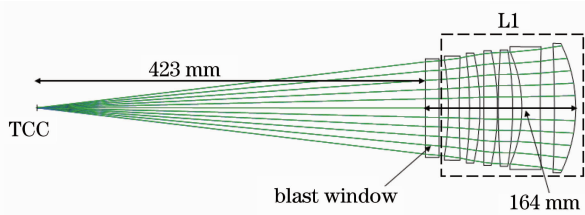


图 3 靶室内成像透镜结构

Fig. 3 Imaging lens fixed in chamber

光束通过平行平板不产生像差,故处在平行光路中的分束镜 BS2,BS3,BS4,BS5,BS6 及干涉仪的标准具均不会给系统带去像差。既从根本上减小了系统的像差,也减少了元件的个数,降低了系统加工、装配和安装的难度。

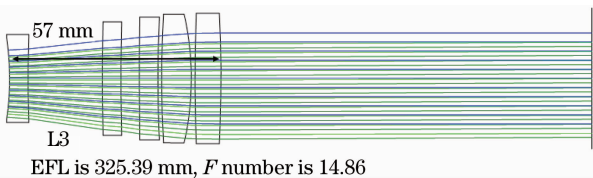


图 4 准直透镜结构

Fig. 4 Collimating lens

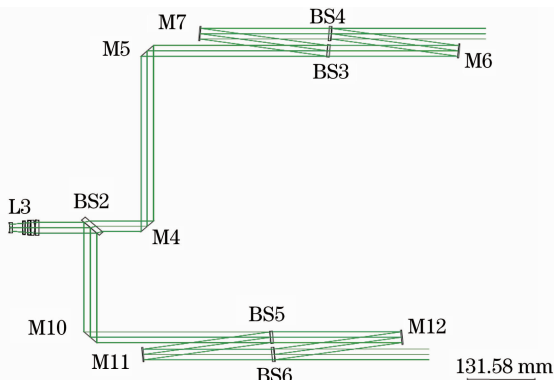


图 5 准直形成的平行光路及光学元件排布

Fig. 5 Parallel light beams and the arrangement of optical elements through collimating lens

最后,原系统在二次像面后,采用了两组透镜进行相机前的最后成像,两组透镜中的光束为平行光束。由于这段光束是否平行对二次像面后的成像质量并无影响,故本系统采用一组透镜 L5 成像,缩短了后工作距离,为庞大的系统节省了空间。

## 5 成像及照明质量分析

整个系统具有单波长、小孔径和小视场的特点,利用调制传递函数和点列图来考察系统的成像质量。图 6 是系统支路一的调制传递函数(MTF)图,由于设计要求物方分辨率为  $5 \mu\text{m}$ ,经由系统放大

30 倍后,要求的像方分辨率为  $150 \mu\text{m}$ ,故考察  $1000/150=6.67 \text{ lp/mm}$  的 MTF 值。由图 6 分析可知,6.67 lp/mm 时系统 MTF 值为 0.45,且接近衍射极限。若将系统要求的 MTF 值设定在 0.2,则光学系统在 9.9 lp/mm 时仍满足 MTF 要求,此时,系统的物方分辨率应该好于  $3.7 \mu\text{m}$ 。

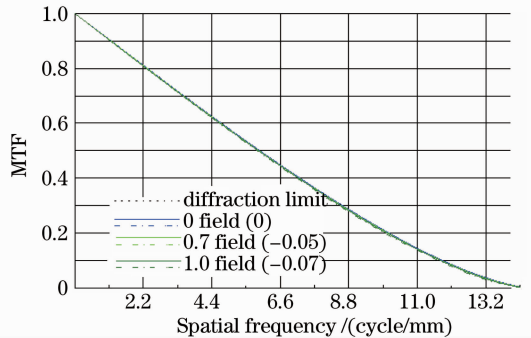


图 6 系统支路一调制传递函数图

Fig. 6 MTF of branch 1 of the system

图 7 是支路一的点列图,黑色圆圈表示艾里斑的大小,由图可知,像方的几何像点最大均方根直径为  $2.634 \mu\text{m}$ ,已达衍射极限。成像系统像方 F 数为 127.7834,使用波长为  $532 \text{ nm}$ ,故由分辨率公式  $\sigma = 1.22\lambda F$  计算可知,系统艾里斑直径为  $2 \times 82.98 = 165.8 \mu\text{m}$ 。根据瑞利判据:能分辨的两个等亮度点间的距离对应艾里斑的半径,所以理论上像方最高分辨率为  $82.9 \mu\text{m}$ ,对应物方  $2.76 \mu\text{m}$ 。若要求两亮点间的距离为艾里斑的直径,则两个亮点衍射的第一级暗环相叠加,由于该光学系统艾里斑直径为

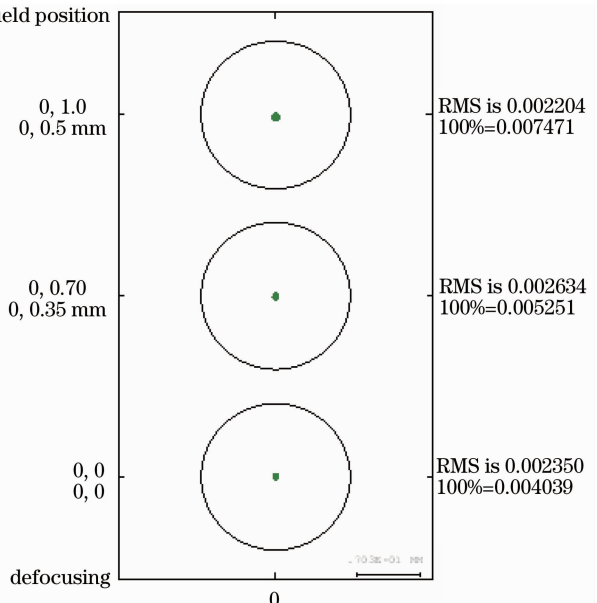


图 7 系统支路一点列图

Fig. 7 Spot diagram of branch 1 of the system

165.8  $\mu\text{m}$  , 对应物方为 5.527  $\mu\text{m}$  , 即该系统物方分辨率为 5.527  $\mu\text{m}$  时, 像方的像明暗清晰可见。综上表明, 在精简系统结构并增加系统的放大倍率情形下, 系统性能仍较原系统有提高(原系统分辨率优于 10  $\mu\text{m}$ )。

对于如图 1 所示的照明光路, 要求芯径 1 mm 的光纤传导的激光能均匀照射到视场为 1 mm 的目标靶面, 用 Code V 软件在光纤出口位置设置直径为 1 mm 的圆形朗伯体发光面, 追迹 100000 条光线, 并在目标靶所处的位置 TCC 设置直径为 1 mm

的圆形接收面, 得到照度分布如图 8 所示, 表明目标靶面能被均匀照明, 满足设计要求。同时, 由于照明光路放大率为 1, 透镜组 L1 的物方数值孔径为 0.1174, 光纤前置镜的像方数值孔径大小亦为 0.1174, 小于光纤数值孔径, 激光未能得到充分利用。但由于透镜 L1 因为安装后不能阻挡打靶激光束,  $F$  数受到限制, 不能充分增加光纤镜的数值孔径。故为避免杂散光的对光路的干扰, 在进行机械设计时, 必须在光纤接口与光纤镜之间设置消杂光结构, 消去未充分利用激光的干扰。

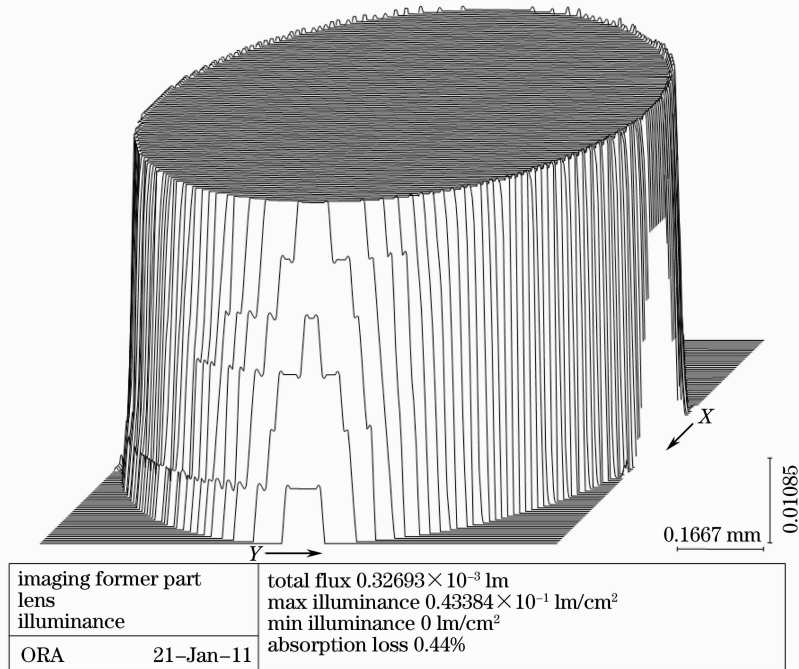


图 8 目标靶面上的接收器照度分布图

Fig. 8 Illuminance distribution of receiver implemented at TCC

## 6 结 论

本文在已有的神光Ⅲ原型装置 VISAR 系统基础上, 针对原有系统的不足之处, 进行了结构优化, 设计了一个放大倍率为 30 的成像型 VISAR 系统的光学结构, 满足光学条纹相机的光阴极长度要求, 并对系统的成像和照明部分的结构和部分光学元件参数进行了详细论述, 分析了系统的成像质量和照明质量, 结果表明系统具有优于 5  $\mu\text{m}$  的物方分辨率, 照明均匀, 符合设计要求, 较以往系统有所提高。

### 参 考 文 献

- 1 L. M. Barker, R. E. Hollenbach. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(11): 4669~4675
- 2 R. M. Malone, J. R. Bower, D. K. Bradley *et al.*. Imaging VISAR diagnostic for the National Ignition Facility (NIF) [C].

*SPIE*, 2005, **5580**: 505~516

- 3 R. M. Malone, J. R. Celeste, P. M. Celliers *et al.*. Combining a thermal-imaging diagnostic with an existing imaging VISAR diagnostic at the National Ignition Facility [R]. UCRL-CONF-213575, 2005
- 4 Jiang Shaoen, Li Wenhong, Jiang Xiaohua *et al.*. Shock wave driven by X-ray radiation from cylindrical hohlraum on Shenguang II laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(10): 3424~3427  
江少恩, 李文洪, 蒋小华等. 神光 II 上柱形黑腔辐射驱动冲击波 [J]. *物理学报*, 2004, **53**(10): 3424~3427
- 5 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Liu Shenye *et al.*. Development of an imaging velocity interferometer system for any reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3207~3211  
彭晓世, 王峰, 刘慎业等. 成像型任意反射面速度干涉仪研制 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3207~3211
- 6 Weng Jidong, Tan Hua, Hu Shaolou *et al.*. A new all fiber velocity interferometer system for any reflector [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4): 533~536  
翁继东, 谭华, 胡绍楼等. 一种新型全光纤速度干涉仪 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(4): 533~536
- 7 Shu Hua, Fu Sizu, Huang Xiuguang *et al.*. Key techniques of

- velocity interferometer for any reflector [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 176~180
- 舒 桦, 傅思祖, 黄秀光 等. 任意反射面速度干涉仪研制中的关键技术[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 176~180
- 8 P. M. Cellier, D. K. Bradley, G. W. Collins *et al.*. Line-imaging velocity meter for shock diagnostic at the OMEGA laser facility [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(11): 4916~4929
- 9 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye *et al.*. Imaging velocity interferometer system for any reflector [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11): 1696~1700
- 王 峰, 彭晓世, 刘慎业 等. 成像型速度干涉仪[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(11): 1696~1700