

聚变反应历程测量系统研制及应用

彭晓世 王 峰 唐道润 刘慎业 蒋小华 刘永刚

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 为了测量惯性约束聚变实验中的聚变反应时间过程, 研制了一套时间分辨优于 40 ps 的聚变反应历程测量系统。该系统由闪烁体及鼻锥部分、光学系统和条纹相机系统三部分组成。其中闪烁体将中子信号转换为可见光信号, 光学系统则将闪烁体的发光信号成像在条纹相机上进行记录。为得到信号与入射激光的时间关系, 还将时标引入了条纹相机进行记录。在神光 III 原型装置上通过实验对其进行了考核, 在 DT 中子产额约为 10^{10} 条件下成功获得了聚变反应历程及聚变反应峰值时刻, 聚变反应峰值时刻测量误差小于 15 ps。

关键词 探测器; 惯性约束聚变; 聚变反应历程; 闪烁体; 条纹相机

中图分类号 TL816.3; TL67 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0112006

Development and Application of a System for Fusion Reaction History Measurement

Peng Xiaoshi Wang Feng Tang Daorun Liu Shenye Jiang Xiaohua Liu Yonggang

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

Abstract In order to accurately measure the fusion reaction-rate of inertial confinement fusion experiments, a system has been developed for fusion reaction history measurement with high temporal resolution which is better than 40 ps. The system is composed of plastic scintillator and nose cone, an optical system and streak camera. The thin piece of scintillator material acts as a neutron-to-light converter. The optical system images light from the scintillator surface to camera for recording. The camera simultaneously records an optical fiducial pulse which allows the camera time base to be calibrated relative to the incident laser. This system has been applied on the SG-III prototype. Fusion reaction history and fusion reaction bang time have been measured for deuterium-tritium filled targets with neutrons yields about 10^{10} . Fusion reaction bang time can be measured with accuracy as low as 15 ps.

Key words detectors; inertial confinement fusion (ICF); fusion reaction-rate; scintillator; streak camera

OCIS codes 120.1880; 040.3780; 120.4640

1 引 言

惯性约束聚变(ICF)实验中,聚变燃料被约束的时间约为 100~200 ps^[1,2],在被约束的时间内,燃料达到热核反应的条件,产生聚变反应,将释放大量的中子、带电粒子和 γ 光子,这些聚变产物携带了芯部燃料的燃烧和等离子体状态的信息,因此应用聚变反应产物诊断技术可测量内爆过程和聚变燃烧的许多特性参数。

聚变反应过程中大部分带电粒子将在高密度区被慢化,甚至完全沉积在燃料区无法离开靶到达探测器。而高能中子和伽马射线具有非常强的穿透本

领,绝大部分中子及伽马射线能无碰撞地离开燃料区到达探测器,从而保留了燃料区聚变反应的全部信息。中子或伽马射线产额随时间的变化率实际反映了燃料区的聚变反应历程,是热核燃烧的重要诊断技术之一^[3,4]。伽马射线测量反应速率的方法更直接^[5,6],不存在飞行时间谱的展宽,但其产额极低,是中子产额的十万分之一,低产额情况下,该项技术是不适用的。高能中子更适合在低产额下测量聚变反应历程。在神光 III 原型装置上,对实验进行优化设计后,预计聚变中子产额可能达到 10^9 (氘氘 DD)和 10^{11} (氘氚 DT),这一产额水平处于利用

收稿日期: 2010-03-14; 收到修改稿日期: 2010-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(10805041)资助课题。

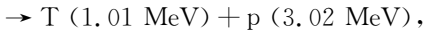
作者简介: 彭晓世(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事惯性约束聚变物理诊断及设备等方面的研究。

E-mail: xiaoshi1025@sohu.com

热核中子诊断聚变反应历程的理想范围内。本文报道了最新研制的聚变反应历程测量系统,其时间分辨优于 40 ps。在神光 III 原型装置上通过实验对其进行了考核,在 DT 中子产额约为 10^{10} 条件下成功获得了聚变反应历程及不同烧蚀层厚度对应的聚变反应峰值时刻。

2 系统诊断原理

在 ICF 实验中,装有 DT 或 DD 燃料的靶丸外表面被激光或 X 光烧蚀,驱动靶丸壳层向内收缩,内部的燃料被压缩到足以产生热核聚变的高温高密度状态,在燃料被约束的时间内产生热核燃烧,同时释放大量带电粒子、中子和伽马射线。相关的热核反应如下:



分支比 50%



分支比约 100%



在 DD 和 DT 两种聚变反应中,所有产物的能量几乎都是单能的。大部分高能带电粒子在等离子体中被慢化,甚至被完全阻止,无法从芯部等离子体中逃逸出来。而中子不带电,具有非常强的穿透本领,绝大多数中子几乎可以无碰撞地离开芯部等离子体,逃逸出来的中子携带了聚变反应过程的全部信息,因此利用聚变反应产生的中子可以测量热核燃烧反应速率。

聚变反应历程测量系统的诊断原理是从高密度区逃逸出来的中子轰击离靶非常近的有机闪烁体,

有机闪烁体中富含 H 原子,中子与 H 原子发生弹性散射,散射产生的反冲质子在闪烁体内通过电离被迅速慢化,质子的部分电离能被闪烁体以光的形式释放出来,该光信号保留了聚变燃烧速率的所有信息,光学成像系统对释放出来的光进行收集,闪烁体发射的光脉冲通过光学系统中继到光学条纹相机阴极,通过扫描变像管进行时空变换,对光脉冲进行高时间分辨的记录^[7~9]。诊断系统主要基于快上升时间的塑料闪烁体 EJ232,该闪烁体受激闪烁发光的上升时间约为 20 ps,衰减时间约为 1.3 ns,而聚变反应的持续时间约为 100~200 ps,所以中子脉冲激发闪烁体发光,光脉冲的前沿就包含了中子脉冲或聚变燃烧过程的全部信息。

3 聚变反应历程测量系统研制

3.1 系统技术路线

聚变反应历程测量系统的总体技术方案如图 1 所示。DT 聚变反应产生的能量为 14 MeV 的中子与超快塑料闪烁体 (EJ232) 作用产生波长范围为 350~450 nm 的光。利用光学成像系统对闪烁体上的发光信号进行收集,并传输至靶室外的条纹相机狭缝上。闪烁体发出的为宽谱光,因此要求光学成像系统采用消色差技术。由于入射闪烁体的中子通量与闪烁体到靶点的距离及闪烁体面积有关,因此在闪烁体面积确定的条件下,可将闪烁体放置在一个具备伸缩式结构的鼻锥内,通过调节闪烁体与靶点的距离使系统适应不同中子产额条件下的实验测量。系统光路较长,为减小光学元件口径,在将闪烁体发出的光传输至条纹相机光阴极上时采用了像面传递方式。用作时标的种子脉冲从主激光光路中引出,这一脉冲序列通过光纤引入条纹相机进行记录。

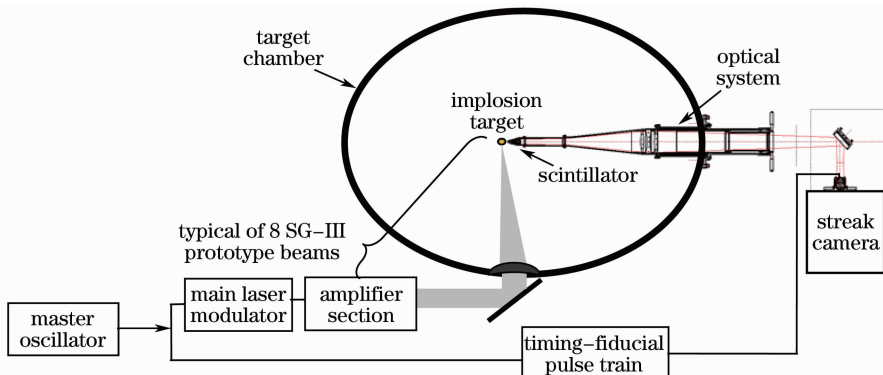


图 1 聚变反应历程测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the system for fusion reaction-rate measurement

ICF 研究中,聚变反应持续时间为百皮秒量级,为准确反映聚变反应期间的中子发射时间过程的细节,要求聚变反应历程测量系统的时间分辨优于 40 ps。影响系统时间分辨的主要因素有:由于中子能量弥散导致的中子飞行时间弥散、闪烁体厚度、光学成像系统的时间弥散和光学条纹相机时间分辨。因此,在进行系统研制时,综合考虑闪烁体的转换效率、透镜组的收光效率、条纹相机的技术水平等因素,要求中子飞行时间弥散小于 32 ps(DT 中子),光学成像系统的时间弥散和条纹相机时间分辨分别小于 13 ps 和 15 ps。

3.2 系统研制要点

3.2.1 转换体

聚变反应历程测量系统的转换体部分主要由鼻锥和闪烁体两部分组成。闪烁体用于将中子转换为可见光,鼻锥则用于安装闪烁体,并要求能有效屏蔽来自靶点处的 X 射线、散射光及靶碎片。由于闪烁体的中子收集效率与其到靶面的距离有关,为使聚变反应历程测量系统适应不同中子产额条件下的实验测量,鼻锥采用了伸缩式结构,闪烁体与靶点间的距离可调。在当前实验条件下,信号较弱,为最大限度提高信号强度,还要求在鼻锥后界面加镀一层金属反射膜。

在系统的总体技术方案中提出中子飞行时间弥散应小于 32 ps(DT),由于等离子体中离子的热运动将使中子能谱出现多普勒展宽,因此中子飞行时间弥散受等离子体离子温度、靶点与探测器的距离制约,同时也受到闪烁体厚度制约。为满足中子飞行时间弥散指标,要求因等离子体离子温度、靶点到探测器的距离引入的时间分辨约 25 ps,因闪烁体厚度引入的时间分辨约 20 ps。

对于在聚变反应同一时刻产生的中子,因等离

子体离子温度引起的能量弥散导致其到达探测器的时间弥散 Δt_T 可由下式给出:

$$\Delta t_T = \left\{ \begin{matrix} 778 \\ 122 \end{matrix} \right\} \sqrt{T} \times d \left\{ \begin{matrix} \text{DD 中子} \\ \text{DT 中子} \end{matrix} \right\}, \quad (1)$$

式中 Δt_T 是半峰全宽(FWHM),单位为 ps; d 为靶点距离探测器的距离,单位为 m; T 是等离子体离子温度,单位为 keV。由(1)式可知,为使 1 keV 等离子体的 $\Delta t_T < 25$ ps,对于 DT 中子,要求 $d < 20.5$ cm。

系统的时间分辨还与闪烁体厚度有关。由于闪烁体厚度引入的时间分辨可由下式给出:

$$\Delta t_x = \Delta x / v_n, \quad (2)$$

式中 Δx 为闪烁体厚度, v_n 为中子速度。可将中子视为经典粒子,其速度的表达式为

$$v_n = \sqrt{\frac{2E}{m}}, \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式,同时代入中子能量及中子质量可知,用于 DT 中子测量时,为使时间分辨小于 20 ps,则闪烁体厚度不能超过 1 mm。

3.2.2 光学系统

对于光学系统,其对聚变反应历程测量系统性能的影响主要体现在时间弥散,透射率和收光系数三个参数上。时间弥散影响系统的时间响应,透射率和收光系数直接与系统灵敏度有关,影响聚变反应历程测量系统的可测产额下限。因此光学成像系统设计的主要任务在光学时间弥散足够小的情况下力求较高的收光系数和透射率。

光学成像系统采用了透射式成像组件,其光路排布如图 2 所示。闪烁体发光信号由透镜组 L_1 收集并成像于 IP_1 位置, IP_1 处于透镜组 L_2 的焦平面上, L_2 对收集光进行准直并经由法兰上的输出窗口出射。其中闪烁体及鼻锥部分与透镜组 L_1, L_2 作为一个整体通过伸缩机构与靶室法兰相连。由输

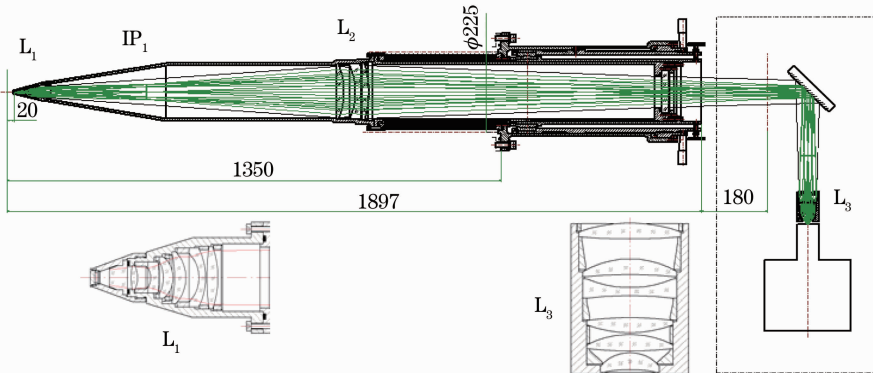


图 2 聚变反应历程测量系统光学系统光路排布图

Fig. 2 Optical configuration for fusion reaction-rate measurement system

出窗口出射的信号光再经过反射镜及透镜组 L_3 成像于条纹相机狭缝面上。为使系统时间分辨满足设计要求,要求光学成像系统的时间弥散小于 13 ps。

光学系统设计的主要困难在于光路长,为了控制时间弥散,需采用消色差技术,而消像差(包含色差)的结果往往导致玻璃介质总厚度及界面数的增加,这不利于提高透射率和收光系数,同时介质总厚度的增加还会增加时间弥散。考虑到实际使用中并不要求光学系统有很高的像质,因此在进行系统设计时放弃了常规光学设计关于像质方面的过分追求,在基本不损失时间分辨、透射率和收光效率的前提下,降低系统的复杂程度和造价。

4 聚变反应历程测量

利用新研制的聚变反应历程测量系统对 ICF 实验中的聚变反应历程进行了测量。测量系统各项参数如下:塑料闪烁体直径为 6 mm,厚度 1 mm,距离靶丸 2 cm;收光系统放大为 1/3;相机狭缝宽度 100 μm ,扫描速度约为每通道 3 ps。对于 CH 烧蚀层厚度分别为 9, 13 和 16 μm 的 DT 靶丸,实验测量结果如图 3 所示,记录图中上半部分为闪烁体发光信号,下半部分为时标脉冲序列。从图 3 中可观察到烧蚀层厚度发生变化时,闪烁体发光信号与时标光信号的时间关系也随之改变。

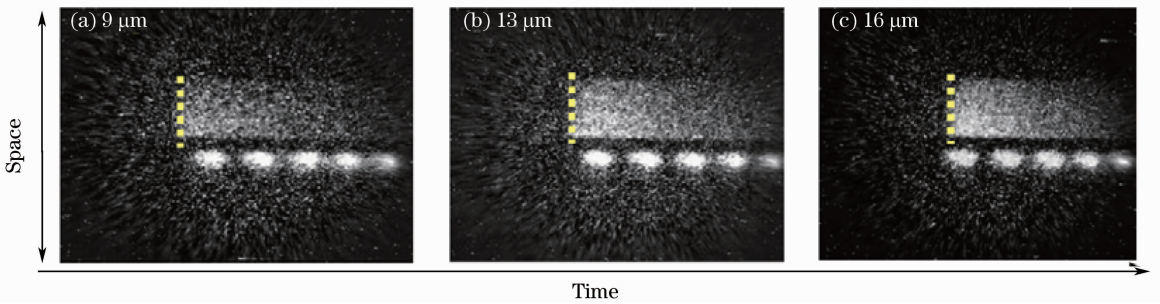


图 3 条纹相机记录的聚变反应历程信号

Fig. 3 Signal of the fusion reaction history recorded by the streak camera

为得到聚变反应历程与主激光的时间关系,还需要对主激光与时标光的时间关系进行定标。实验中采用两路脉宽为 1 ns,能量约为 1 J 的激光入射靶杆,并将原系统中置于闪烁体前面的钨屏蔽体替换为白纸后进行了两次激光定标,除相机延迟时间有所变动外,其它参数均一致,测量结果如图 4 所示。

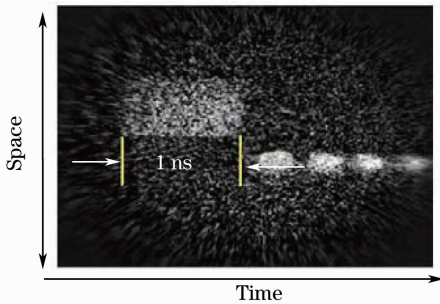


图 4 时标光与主激光时序测量结果

Fig. 4 Experimental result of sequency measurement of the optical fiducial pulse and the incident laser pulse

5 实验结果分析

实验中条纹相机记录到的发光信号与聚变中子信号和塑料闪烁体两者有关,为中子发射时间过程

与闪烁体响应的卷积。聚变反应历程包含在发光信号的上升前沿中,为获得聚变反应历程,需对上升沿信号去卷积。假设记录图上第 i 个像素点的强度为 s_i ,对应的中子强度为 n_i ,闪烁体发光呈指数衰减^[10],衰减常数为 τ ,可利用

$$n_i = s_i - \sum_{j=0}^{i-1} n_j \exp\left(-\frac{t_i - t_j}{\tau}\right). \quad (4)$$

进行去卷积,得到中子强度随时间的变化过程,从而得到聚变反应历程。不同烧蚀层厚度对应的聚变反应历程结果如图 5 所示。

根据聚变反应历程测量结果可得到不同烧蚀层厚度对应的聚变反应峰值时刻及聚变反应峰值时刻与时标光的相对延时。利用激光定标的结果则得出主激光与时标光的相对延时。综合上述信息得到的聚变反应峰值时刻相对主激光的延时如图 6 所示。根据图 6 可知:聚变反应峰值时刻随着烧蚀层厚度的增加而延后,烧蚀层厚度分别为 9, 13 和 16 μm 时,聚变反应峰值时刻相对主激光前沿分别延迟 712, 770 和 918 ps。

当前实验条件下 DT 中子产额约为 10^{10} ,记录信号信噪比较差,为减小数据的统计涨落,进行数据

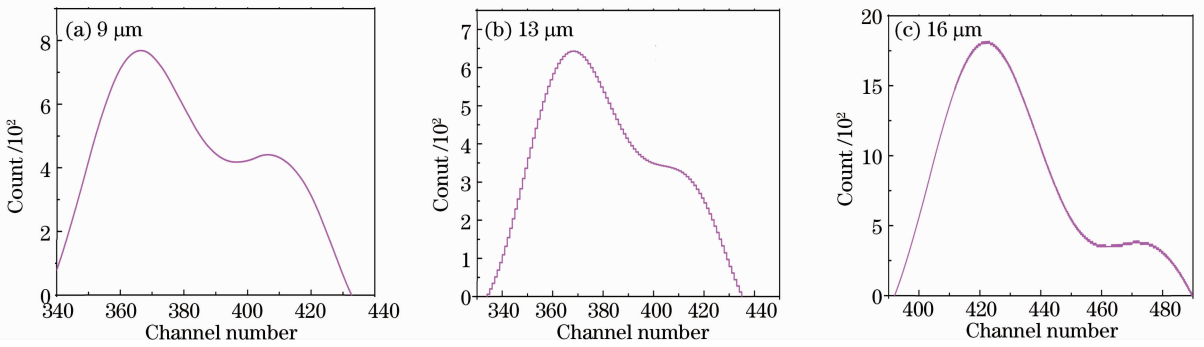


图 5 聚变反应历程信号处理结果

Fig. 5 Processing result of signal of the fusion reaction history measurement

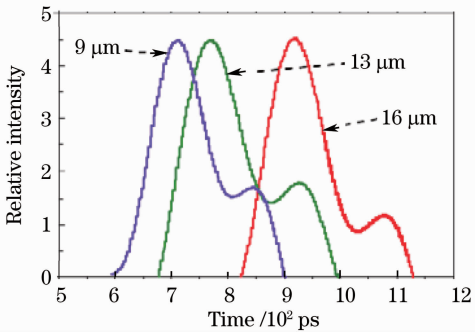


图 6 聚变反应峰值时刻与主激光前沿比较

Fig. 6 Comparison of fusion reaction bang time and the rise time of incident laser

处理时截取的原始信号宽度不能太窄。但由于聚变反应历程测量系统的收光组件存在一定的时间弥散,且实验中为了调整时标光位置而将相机倾斜放置,这都会导致闪烁体不同空间位置的发光信号在条纹相机上不同步,因此截取的信号宽度较大时可能引入相对较大的测量误差。为检验信号宽度对测量的影响,截取不同宽度的信号(1.5, 3.0, 4.5, 6.0 mm 4种信号宽度)进行了数据处理,典型处理结果如图7所示。由图可知,随着信号宽度的变化,聚变反应历程波形也将有所变化,但聚变反应峰值

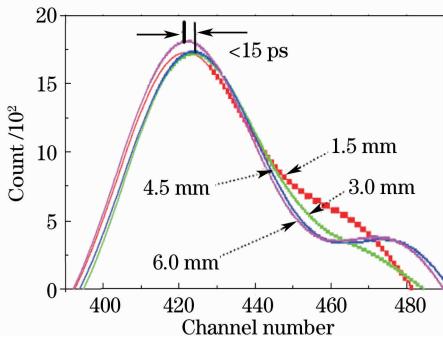


图 7 不同宽度信号处理结果比较

Fig. 7 Comparison of processing results of different signal widths

时刻随宽度的变化很小,其测量误差小于 15 ps。

6 结 论

聚变反应历程包含峰值压缩时刻的相关信息,可测量聚变过程的许多特性参数。为了测量惯性约束聚变实验中聚变反应的时间过程,完成了一种由闪烁体、光学成像系统和条纹相机系统三部分组成的聚变反应历程测量系统研制。由于该系统采用了超快闪烁体(上升沿小于 20 ps)并利用条纹相机进行记录,因此比常规的核测试方法具有更高的时间分辨(优于 40 ps)。在神光Ⅲ原型装置上通过实验对其进行了考核,在 DT 中子产额约为 10^{10} 条件下成功获得了闪烁体发光信号,将时标光引入该系统后成功获得了不同烧蚀层厚度对应的聚变反应峰值时刻。对数据进行详细分析后表明:尽管由于信噪比及时间弥散的影响,该系统测得的聚变反应历程波形可能存在一定误差,但聚变反应峰值时刻的测量结果是可信的,误差小于 15 ps。

参 考 文 献

- John D. Lindl, Peter Amendt, Richard L. Berger *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility [J]. *Phys. Plasmas*, 2004, **11**(2): 339~491
- R. A. Lerche, D. W. Phillion, G. L. Tietbohl. 25 ps neutron detector for measuring ICF-target burn history[J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 1995, **66**(1): 933~935
- C. Stoeckl, V. Yu. Glebov, S. Roberts *et al.*. Ten-inch manipulator-based neutron temporal diagnostic for cryogenic experiments on OMEGA [J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 2003, **74**(3): 1713~1716
- R. A. Lerche, M. D. Cable. Fusion reaction-rate measurement-Nova and NIF[J]. UCRL-LR-105821-96-3, 1996
- M. J. Moran, R. A. Lerche, G. Mant. Optical lightpipe as a high-band width fusion diagnostic[J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 2006, **77**(10): 10E718
- J. M. Mack, S. E. Caldwell, S. C. Evans *et al.*. Multiplexed gas Cherenkov detector for reaction-history measurements[J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 2006, **77**(10): 10E728

- 7 Hu Xin, Liu Shenye, Ding Yongkun *et al.*. Design of SG-III X-ray streak camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2871~2875
胡 昕, 刘慎业, 丁永坤 等. 神光III主机 X 射线条纹相机设计 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2871~2875
- 8 Li Sining, Wang Qi, Liu Jinbo *et al.*. Experimental research on resolution of streak tube imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1021~1026
李思宁, 王 骐, 刘金波 等. 条纹管激光成像系统空间分辨力实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1021~1026
- 9 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
- 10 Cao Dunhua, Liu Yongjian, Zhao Guangjun *et al.*. Investigation on the self-absorption of Ce:YAP crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3463~3466
曹顿华, 刘永建, 赵广军 等. 掺铈铝酸钇闪烁晶体自吸收问题研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3463~3466