

文章编号 1004-924X(2012)11-2389-06

聚变反应速率测量光学系统设计

闫亚东*, 何俊华

(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 基于塑料闪烁体和条纹相机设计了聚变反应速率测量系统, 论述了测量光学系统的工作原理和设计方法。通过设置防辐射石英玻璃窗, 防止了光学元件受强 X 射线辐射而变暗; 采用晶体等紫外透过率高的光学材料, 满足了光学系统对透过率的要求; 光学系统像面与条纹相机的阴极面直接对接, 解决了条纹相机孔径不匹配的问题; 最后在像面设置场镜, 大幅缩小了光学元件的口径。设计的光学系统总长为 2 660 mm, 放大倍率为 1/3, 像方 F/# 数达到 0.667, 系统透过率达到 67%, 时间弥散小于 7.3 ps。这些结果能够适应不同中子产额的实验需求, 在激光打靶实验中取得了较好的实验效果。

关键词: 聚变反应速率; 反应速率测量; 中子; 光学设计; 时间弥散

中图分类号: TL62; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122011.2389

Design of optical system for fusion reaction-rate measurement

YAN Ya-dong*, HE Jun-hua

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: yyd@opt.ac.cn

Abstract: Based on a plastic scintillator and an optic streak camera, a measuring system for fusion reaction-rate was designed, then the working principle and design method of the measuring system were addressed in detail. A piece of fused silica window was set just behind the plastic scintillator to protect optical elements from darkening after a long time exposure in scattered X rays and the ultraviolet crystals and other ultraviolet glass were selected to ensure the high system transmission. Furthermore, the image plane of the optical system was put onto a photocathode of the streak camera directly to remove the aperture non-matching of input optic system of the streak camera. Finally, a field mirror was put on the first image plane to reduce the max diameter of optical element from 160 mm to 120 mm. The designed optical system has a total length of 2 660 mm, magnification of 3 : 1 and its final lens is F/0.667 and transmission is 67%. Moreover, the time dispersion of the optical system is less than 7.3 ps. These results meet the experimental needs of different neutron yields and good experimental results have been obtained in a laser targeting experiment.

Key words: fusion reaction-rate; reaction rate measurement; neutron; optical design; temporal dispersion

收稿日期: 2012-07-04; 修订日期: 2012-09-25.

基金项目: 国家教育部博士点(西部)基金资助项目(No. 200929441213)

1 引言

惯性约束核聚变是用强激光或粒子束等指向性强的能量均匀辐照氘-氘或氘-氚等热核燃料组成的微型靶丸,在靶丸表面形成高温等离子体,由等离子体向外膨胀压缩热核燃料,使燃料产生核聚变反应。在等离子体约束的过程中,燃料原子发生聚变反应,释放出带电粒子、光子和中子^[1]。

由于带电粒子受到等离子体的作用,很少能够逃逸出去;而绝大部分中子能够在无任何碰撞的情况下逃离靶丸^[2]。因此,中子到达终端诊断设备的时间历程就代表了热核燃料的聚变反应历程。对中子发射时间的探测可提供关于爆聚稳定性的信息,验证理论计算结果,有助于深入地理解等离子体中能量吸收的不同机理及靶球燃烧的物理过程,提供激光-靶相互作用的信息等^[3,4]。

国外在聚变速率测量方面先后发展了 γ 射线探测系统^[5]、中子飞行时间谱仪^[6]、GaAs 和金刚

石中子探测器^[7]、塑料闪烁光纤加条纹相机中子探测器^[8]、中子扫描相机^[9]等一系列设备。

国内现有的中子诊断设备只具备产额诊断和离子温度诊断能力,已不能满足实验需求。本文论述了一种中子扫描相机,它由塑料闪烁体、光学系统和条纹相机 3 部分组成。论述了光学系统的工作原理及设计方法,给出了光学系统的设计结果,其系统总长为 2 660 mm,放大倍率为 1/3,像方 F/# 数达到 0.667,工作波长为 350~450 nm;系统透过率指标达到 67% 以上,系统时间弥散小于 7.3 ps。

2 系统工作原理

系统工作原理如图 1 所示,聚变产生的中子轰击闪烁体,使其发出 350~450 nm 波段的弱光信号^[10]。信号光首先经透镜 L_1 收集并会聚在一次像面处,在一次像面之后信号光被透镜 L_2 准直(对闪烁体上的同一点发出的光来说是准直光束),最终经 L_3 会聚在条纹相机阴极面上,由条纹相机进行时间展开记录。

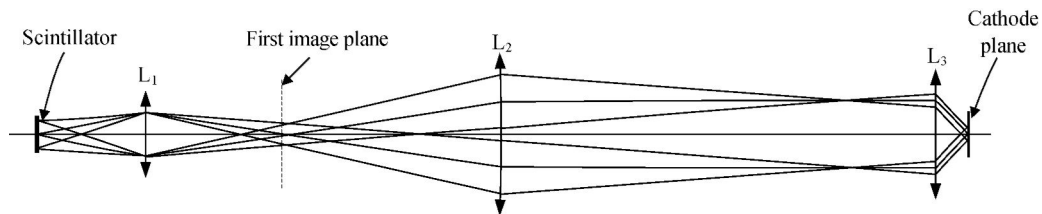


图 1 光学系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of optical system

因为神光-III 原型装置中子产额相对较低,闪烁体的发光信号较弱,为了提高信号光的收集能力,需要适当增大透镜 L_1 的相对口径,系统中 L_1 的相对口径设为 1/2。为了提高条纹相机阴极面上信号光的能量密度,整个光学系统的放大倍率设计为 1/3。因此,透镜 L_3 的 F/# 数将达到 0.667,设计难度较大。

若将此光学系统直接与普通条纹相机对接,条纹相机内置输入光学系统无法与相对口径很大的 L_3 相匹配,造成信号光能量的严重损失。为了解决这一问题,必须对条纹相机进行改造,即去掉条纹相机的输入光学系统,并将其狭缝移至图 1 所示光学系统的一次像面位置,使光学系统的二次像面直接与相机阴极面重合,这样就避免了信号在耦合过程中的能量损耗。

为了调整闪烁体与靶丸的距离以适应不同中子产额的实验需求,在设计中使闪烁体上同一点发出的发散光束经过 L_2 后变为准直光束,这样当闪烁体与 L_2 之间的光学元件为一个整体在一定范围内轴向移动时,可以在不调整 L_3 和条纹相机的情况下保持系统的成像质量。

3 光学系统设计

根据系统的工作原理设计的光学系统的初始结构如图 2 所示。为了防止光学元件受到聚变中产生的强 X 射线辐射而变暗,在光学系统最前端设计了一个厚度为 12 mm 的防辐射石英玻璃窗,该窗口同时又是系统的真空密封玻璃窗。系统一次像面为放大 6 倍的像,整个系统最大光学元件口径为 160 mm。

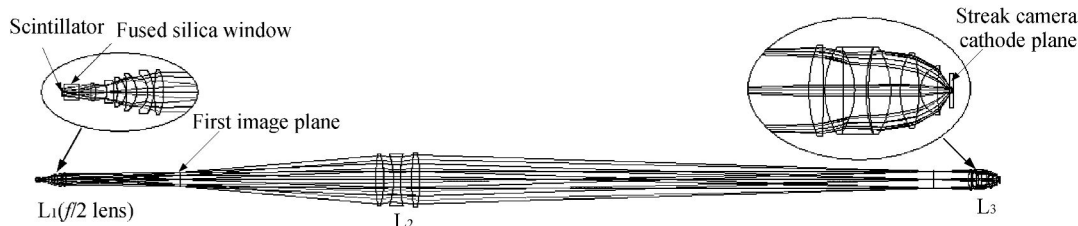


图 2 初始光学系统结构

Fig. 2 Prototype model of optical system

在设计中需要特别注意的是光学材料在 350 ~ 450 nm 波段的透过率。因系统为弱信号探测,对光学系统的透过率要求很高,绝大多数光学玻璃不能满足要求。本系统选择了 SCHOTT 公司的 CaF₂ 晶体(10 mm 时透过率在 99.9% 以上),并配合国内少数几种紫外透过率较高的光学材料进行消色差优化设计。

设计中需要注意的另一个问题是光学系统的

时间弥散特性。因系统为中子发射历程探测,若闪烁体发出的信号光经过光学系统后产生了时间展宽,即产生了时间弥散,系统的测量结果就会受到影响。时间弥散是由光学系统的不完善成像引起的,虽然系统仅为信号光收集系统,不是传统意义上的成像系统,也要尽量提高其成像质量,以减小系统的时间弥散。初始光学系统的成像质量评价如图 3、4 所示。

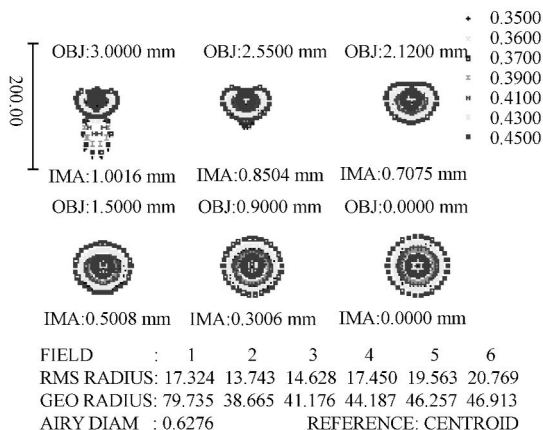


图 3 初始结构点列图

Fig. 3 Spot diagram of prototype model

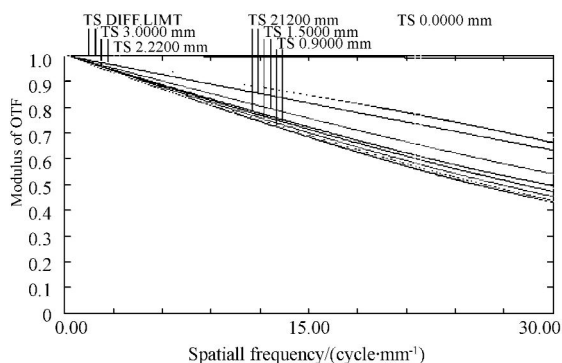


图 4 初始结构传递函数

Fig. 4 Geometric MTF diagram of prototype model

初始结构像点弥散斑均方根半径在 21 μm 以内,传递函数在 30 lp/mm 处达到 0.4 以上。

由图 2 可见,一次像面之后的准直镜的口径较大。在光学设计中,可在像面处设置场镜来减小后

继光学元件的口径。因此,在图 2 所示的一次像面处增设场镜,并优化准直镜 L₂ 的焦距,以使条纹相机前透镜 L₃ 的口径不会大幅度增大,优化设计结果如图 5 所示。

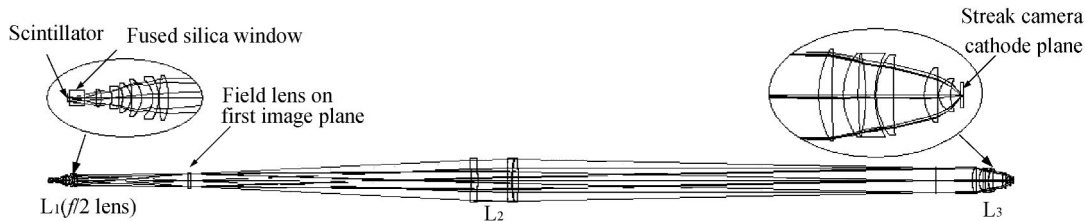


图 5 优化后光学系统结构

Fig. 5 Schematic of optimized optical system

必须提出的是:在系统中设置场镜后,必须保证一次像面位于场镜之外,以便在场镜附近设置条纹相机狭缝。经过优化后,准直透镜 L_2 的口径由 160 mm 降低到 120 mm。系统的像质评价如图 6、7 所示。

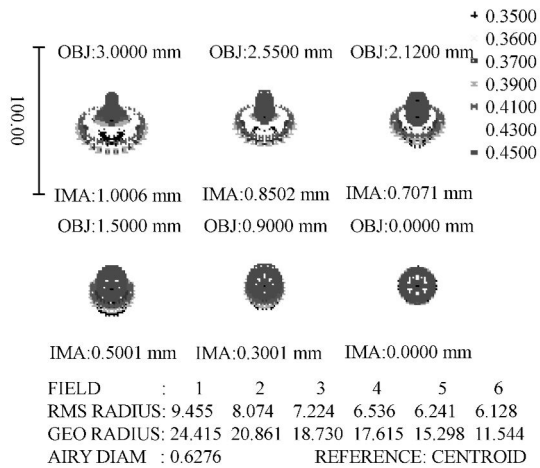


图 6 优化后系统点列图

Fig. 6 Spot diagram of optimized system

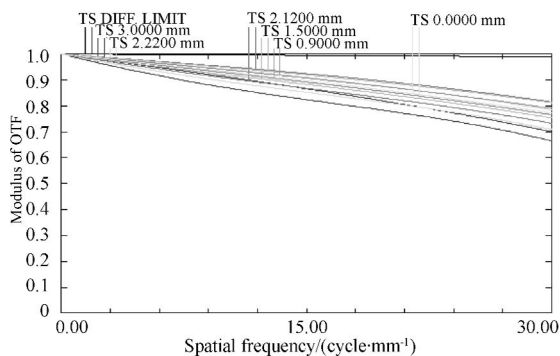


图 7 优化后系统传递函数

Fig. 7 Geometric MTF diagram of optimized system

由于增设了 1 个镜片,系统的成像质量有了大幅提高。像点弥散斑均方根半径在 $9.5 \mu\text{m}$ 以内,传递函数在 30 lp/mm 处达到 0.66 以上。

4 光学系统透过率

要提高光学系统的透过率,就要减少系统的能量损耗。光学系统能量损耗的环节主要有光学材料的内部吸收和空气-玻璃界面处的反射损耗。可以通过选择高透过率的光学材料、减少空气-玻璃界面的个数、在光学元件表面镀减反膜等措施来减少能量损耗。

在实际设计中,针对弱信号探测的特点,采取了以下措施:

(1) 尽量增大光学系统的相对口径以收集更多的信号光。本系统中,前组 L_1 为一个 $f/2$ 透镜,系统缩小 3 倍成像以提高像面信号光强度,此时光学系统的后组 L_3 将是一个相对口径很大的 $f/0.667$ 透镜,该透镜设计难度很大。

(2) 尽量采用紫外透过率高的光学材料。一方面,在紫外波段光学材料的选取受到极大的限制;另一方面,系统要求选取多种材料进行消色差设计,以减小系统的时间弥散。因此,材料的选取是该光学系统设计中的最大难题。设计中以 CaF_2 晶体为主,辅以高紫外透射的其它几种材料进行消色差设计。

(3) 控制光学元件的中心厚度,减少材料的体吸收。

(4) 尽量简化光学系统,减少光学元件的个数。

(5) 在光学元件表面镀高质量的增透膜。

但是,由于材料选取受限,加之系统相对口径较大,使得系统设计结果较为复杂。该系统包含 18 个光学元件,中心总厚度达到 170 mm,这些限制了系统透过率的提高。

根据设计结果,若光学元件表面都镀增透膜,透过率 $\geq 99\%$,则计算得到的优化后的光学系统透过率如表 1 所示。

表 1 优化后的光学系统透过率

Tab. 1 Transmission ratio of optimized optical system

Wavelength/ μm	0.35	0.37	0.39	0.41	0.43	0.45
Transmission/%	0.56	0.64	0.68	0.71	0.72	0.72
Total transmission/%						0.67

5 光学系统时间弥散特性

光学系统的时间弥散指标是通过大量成像光线取样,由其相互之间的最大光程差计算出来的。

因本系统为圆对称系统,物面任意一条径向上点的时间弥散情况都能够反映整个物面的时间弥散情况。在考察时,首先抽取物面的 0, 0.3, 0.5, 0.707, 0.85, 1.0 共 6 个归一化视场点;对每一视场点,再考察其发出的通过入瞳不同位置的 41 条光线;并按照波长 0.35, 0.37, 0.39, 0.41, 0.43,

0.45 分别记录每条光线在整个光学系统中的总光程;整个系统共考察 $6 \times 41 \times 6$, 共计 1 476 条光线。通过对比这 1 476 条光线的总光程, 得出相互之间的最大光程差, 用光速除最大光程差即得到光学系统的最大时间弥散。

按照上述光线取样方法得出的优化后的光学系统的时间弥散量为 7.3 ps, 而一般条纹相机的时间分辨率为几十皮秒, 因此光学系统的时间弥散能够满足实验需求。

6 系统实验

利用聚变反应速率测量系统在神光-III 原型装置上进行了聚变速率测量实验^[11,12], 其结果如图 8、图 9 所示。图 8 为条纹相机记录的聚变时中子的发射历程; 图 9 是根据图 8 计算得到的聚变反应历程曲线。由图可见, 实验结果图像清晰, 对比度较高; 系统满足了弱信号探测的需求。

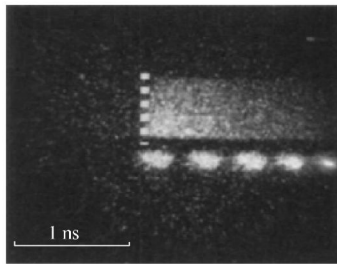


图 8 条纹相机记录的聚变反应历程

Fig. 8 Streak camera image of burn history

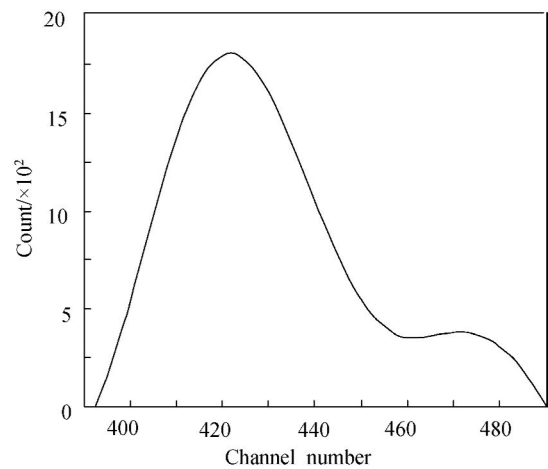


图 9 聚变反应历程曲线

Fig. 9 Curves of reaction history

7 结 论

聚变反应速率测量系统是一个在强辐射环境下的紫外弱信号探测光学系统, 本文详细论述了光学系统设计中的若干问题, 如防辐射措施、紫外光学材料的选取、光学系统结构、时间弥散以及光学系统与条纹相机的耦合等, 实现了强辐射环境下紫外弱信号的大数值孔径收集, 小口径、低损耗、低时间弥散传输, 小 $F/\#$ 数聚焦。该系统能够适应不同中子产额的实验需求, 在激光打靶实验中取得了较好的实验效果。

参考文献:

- [1] LERCHE R A, CABLE M D. Fusion reaction-rate measurements-Nova and NIF[S]. *ICF Quarterly Report*, 1996, 6(3):115-122.
- [2] STOECKL C, GLEBOV V Y, ROBERTS S, et al.. A TIM-based neutron temporal diagnostic for cryogenic experiments on OMEGA[J]. *LLE Review*, 2004, 92:156-160.
- [3] LERCHE R A, PHILLION D W, TIETBOHL G L. 25ps neutron detector for measuring ICF-target burn history[C]. *Presented at the 10th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, Rochester, NY, 1994*, 5:8-12.
- [4] Stoeckl S, Glebov V Y, Zuegel J D, et al.. Wide-dynamic-range neutron bang time detector on OMEGA[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(11):3796-3800.
- [5] LERCHE R A, CABLE M D, PHILLION D W, et al.. Fast Pb-glass neutron-to-light converter for ICF target burn history measurements[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1990, 61(10):3187-3189.
- [6] MICHAEL D C, HATCHETT S P, NELSON M B. Neutron spectroscopy with a large neutron time-of-flight detector array (LaNSA) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(10):4823-4827.
- [7] GARCONNET J P, BOURGADE J L, NAIL M, et al.. Ultrafast photoconductive detectors for burn time and bang time measurements on Phebus[J].

- Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(10): 4871-4873.
- [8] MIYANAGA N, OHBA N, FUJIMOTO K. Fiber scintillator/streak camera detector for burn history measurement in inertial confinement fusion experiment[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(1):621-623.
- [9] STOECKL C, GLEBOV V Y, ROBERTS S, *et al.*. Ten-inch manipulator-based neutron temporal diagnostic for cryogenic experiments on OMEGA [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 71(3):1713-1716.
- [10] LERCHE R A, PHILLION D W, TIETBOHL G L. Neutron detector for fusion reaction-rate measurements[C], *AIP Conf. Proc.*, 1994, 318:251-259.
- [11] 彭晓世,王峰,唐道润,等. 惯性约束聚变反应速率测量[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(8):2197-2200.
- PENG X SH, WANG F, TANG D R, *et al.*. Measurement of inertial confinement fusion reaction rate[J]. *High Power and Particle Beams*, 2011, 23(8):2197-2200. (in Chinese)
- [12] 彭晓世,王峰,唐道润,等. 聚变反应历程测量系统研制及应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(1):129-134.
- PENG X SH, WANG F, TANG D R, *et al.*. Development and application of a system for fusion reaction history measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1):129-134. (in Chinese)

作者简介:



闫亚东(1979—),男,河南周口人,博士,副研究员,2003年于郑州大学获得学士学位,2008年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事强激光精密诊断与应用技术方面的研究。E-mail: yyd@opt. ac. cn



何俊华(1968—),男,江西人,研究员,硕士生导师,1991于郑州航空工业管理学院获学士学位,1998年于中国科学院西安光学精密机械研究所获硕士学位,主要从事水下光电成像与探测技术、强激光精密诊断与应用技术方面的研究。E-mail: hjh@opt. ac. cn