

# 使用离轴光学系统的气体切伦科夫探测器

徐 涛 苏 明 彭晓世 王 峰 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** 基于探测器的测量原理,并针对卡塞格林光学系统的不足,分析了一种新型气体切伦科夫探测器的光学结构。该探测器采用 3 片  $90^\circ$  离轴抛物镜和 1 片平面反射镜组成的离轴光学系统以减少对光线的阻挡,并将探测窗口置于光学系统的出瞳以提高光收集效率。分析了光学系统的光束限制和光线追迹结果。设计了探测器的集成结构,从提高探测器效率和减少信号干扰等角度分析了探测器的关键设计和制造要求。

**关键词** 光学设计;聚变反应历程;气体切伦科夫探测器;离轴光学系统;光收集效率

**中图分类号** TN206 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1022001

## Gas Cherenkov Detectors Using Off-Axis Optical System

Xu Tao Su Ming Peng Xiaoshi Wang Feng Liu Shenye

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

**Abstract** A novel design of the gas Cherenkov detector (GCD) using three pieces of  $90^\circ$  off-axis parabolic mirror and a turning flat mirror will take place the conventional GCD using Cassegrain reflector optics. Light collection is more effective by the using of the off-axis optical system and positioning the optical detector at the exit pupil of the optical system. Optical ray tracing demonstrates that how light can be collected by the optical detector from different object surface. An integration design of the whole GCD is given and the details are analyzed to enhance light collection efficiency and offer better radiation shield.

**Key words** optical design; fusion reaction history; gas Cherenkov detector; off-axis optical system; light collection efficiency

**OCIS codes** 220.2740; 080.2740; 110.2960

## 1 引 言

聚变反应历程测量是间接驱动惯性约束聚变技术的基本诊断项目之一。任何对于氘氘聚变反应及多重冲击波的基本研究,都包括反应的时间过程测量,它为研究内爆流体动力学和驱动与靶的耦合表现提供了重要依据<sup>[1]</sup>。

氘氘聚变反应的主要产物有中子、带电粒子及  $\gamma$  粒子,聚变产物产额随时间的变化率实际上就反映了聚变反应历程,对聚变反应历程的诊断可以通过测量聚变产物得到。中子和  $\gamma$  粒子因为其容易穿透压缩气体、玻璃丸和金腔,通常被用于聚变反应历程测量<sup>[2]</sup>。由于中子在等离子体区的热运动会

其能量谱的多普勒展宽,这段展宽的大小正比于等离子体区的温度及中子探测器同目标靶(TCC)的距离,故中子探测器的闪烁体需尽量靠近离靶丸以提高时间分辨率,对闪烁体的厚度和大小也会有比较严格的限制<sup>[3]</sup>。中子探测适合中子产额较低的情况,其时间分辨率能达到  $30\sim 45$  ps<sup>[4,5]</sup>。 $\gamma$  粒子不受等离子体区温度的影响,没有飞行时间展宽,探测器可放置在离 TCC 较远的位置。切伦科夫探测器能将  $\gamma$  粒子转换成光信号进行记录,可用于记录氘氘聚变反应产生的 16.7 MeV 的  $\gamma$  粒子<sup>[6~8]</sup>。由于聚变反应中  $\gamma$  粒子的产额与中子相比约为  $5\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-4}$ ,因此  $\gamma$  粒子探测适合在中子产额较

收稿日期: 2011-04-07; 收到修改稿日期: 2011-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(10805041)和高温高密度等离子体国防科技重点实验室基金(9140C6801021001)资助课题。

作者简介: 徐 涛(1985—),男,硕士,研究实习员,主要从事光学诊断技术方面的研究。E-mail: xutzo@163.com

高的情况下进行<sup>[9]</sup>,并且要求探测器具有较高的转换和光收集效率。

本文介绍了气体切伦科夫探测器(GCD)的系统组成,阐述了离轴光学系统的结构参数,并分析了此光学系统在光收集效率和减小干扰信号方面的优势。

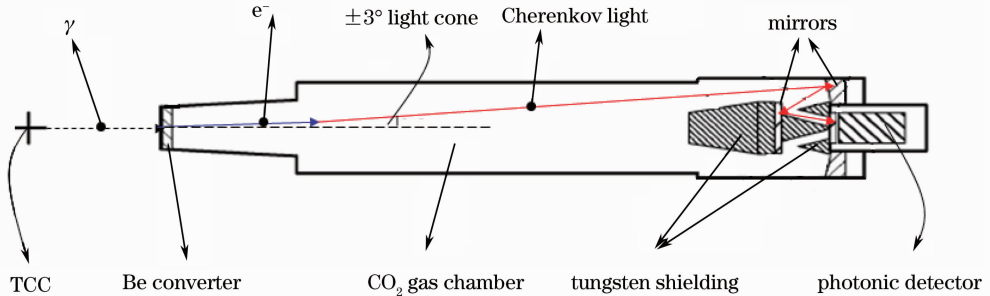


图1 GCD的传统结构

Fig.1 Traditional structure of GCD

辐射转换体指的是一块金属板,通常使用的材料为铍,由 TCC 释放的  $\gamma$  粒子与其作用后产生发散角较小且能量较高的电子,电子的运动轨迹与  $\gamma$  粒子轨迹夹角为  $\pm 2^\circ$ <sup>[11]</sup>。电子进入  $\text{CO}_2$  气室后,如果其飞行速度大于介质中的光速,会产生切伦科夫光(光谱范围 250~700 nm),切伦科夫光子与电子运动轨迹的最大夹角满足<sup>[8]</sup>:

$$\cos \theta = 1/(\eta\beta), \quad (1)$$

式中  $\beta = v/c$ ,说明夹角大小与  $\text{CO}_2$  折射率  $n$  和电子速度  $v$  有关。聚变反应产生的中子通过目标靶周围的材料时会引起瞬发  $\gamma$  粒子,这种低能(一般小于 10 MeV)  $\gamma$  粒子会给实际聚变反应产生的  $\gamma$  粒子带来干扰。由于可以产生切伦科夫辐射的  $\gamma$  粒子能量受气体折射率的限制,而气体折射率受压强和温度控制,因此可利用气体压强来控制  $\gamma$  粒子的能量阈值。 $\text{CO}_2$  气体压强通常设置为 200 kPa(0  $^\circ\text{C}$ ),此时气体折射率为 1.00083,可产生转换的  $\gamma$  粒子能量需大于 12 MeV,切伦科夫光子与电子运动轨迹的最大夹角为  $\pm 1^\circ$ 左右<sup>[12]</sup>。光学系统对这些与  $\gamma$  粒子运动轨迹夹角大致为  $\pm 3^\circ$ 的切伦科夫光进行收集,由于切伦科夫光具有较宽的光谱范围,为避免透射元件的色散对时间分辨率的影响,探测器采用反射镜进行光线收集,并利用记录系统对收集到的光信号进行记录。光信号强度随时间的变化率实际表征了  $\gamma$  粒子产额随时间的变化率,依据打靶激光信号的时间基准就可以判定聚变反应的峰值时间和燃烧过程情况。

由于对转换辐射体和  $\text{CO}_2$  气室的研究已基本成型,其技术指标已经通过计算和实验验证得以确定,提高切伦科夫探测器效率的主要改进点在于光

## 2 GCD 的系统组成

GCD 由辐射转换体、 $\text{CO}_2$  气室、光学系统和记录系统组成,图 1 为聚变反应历程测量中通常使用的探测器结构<sup>[10]</sup>。

学系统的收集效率。图 1 所示的光学系统是卡塞格林式结构。为了减小  $\gamma$  粒子对记录设备的影响,次镜后表面会加装一定厚度的钨块进行防护。这种同轴结构既会阻挡部分光线,影响光收集效率,也不能避免直穿  $\gamma$  粒子对记录设备产生的本底影响。离轴反射结构则能同时避免这两种不利因素,因此拟在聚变反应历程测量实验中使用新型的 GCD,它的主要改进在于使用一个由 3 片离轴  $90^\circ$  抛物镜组成的离轴光学系统。

## 3 离轴光学系统的结构

### 3.1 光束限制及模型分析

在惯性约束聚变实验中,氘氟气体被压缩后发生聚变反应, $\gamma$  粒子向整个空间传播。经过探测器辐射转换体和气体介质中的转换,形成了与  $\gamma$  粒子运动轨迹夹角为  $\pm 3^\circ$ 的切伦科夫光。切伦科夫探测器使用的气体腔室长度约为 600 mm,直径为 100 mm,气体腔室端面(即辐射转换体位置)距离靶室中心为 3500 mm。产生切伦科夫辐射的位置可能是气体腔室中的任何一个截面,因此光学系统中的物不是某一个发光面,而是无数个发光面组成的圆柱形发光体。所有聚变反应产生的  $\gamma$  粒子都来源于设置在靶室中心的靶丸,发光面上的切伦科夫光束则相当于受到一个设置在靶心处的虚拟孔径光阑限制,每一条通过发光面的  $\gamma$  粒子轨迹相当于切伦科夫光束的主光线,如图 2 所示,图中的虚线表示  $\gamma$  粒子的飞行轨迹,而实线表示切伦科夫光线。对于不同位置的发光面,实际限制光束的是  $\pm 3^\circ$ 的孔径角而不是孔径光阑的大小,虚拟孔径光阑的大小对于不同发光面是不同的,气体

腔室两端的发光面同靶心的距离分别为 3500 mm 和 4100 mm,对应的光阑半径应分别为 183.4 mm 和 214.9 mm。文献[12,13]中提到一个结论:限制切伦

科夫光线的孔径光阑大小不随发光面的位置改变而产生变化,整个系统的出瞳大小也保持不变。由上述分析可知,这种结论欠妥当。

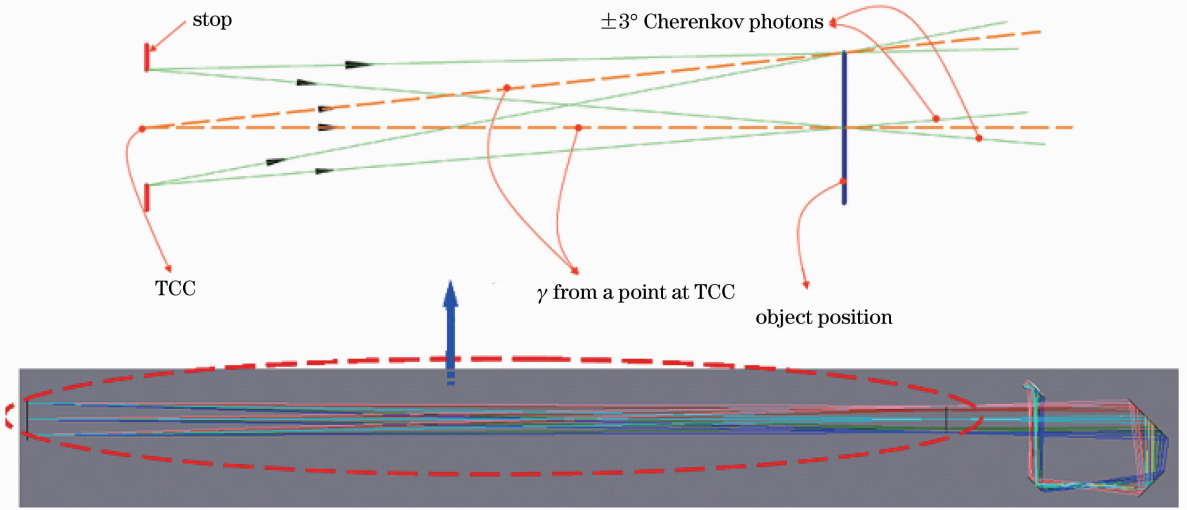


图 2 GCD 中的光束限制  
Fig. 2 Beam confinement of the GCD

由于记录设备的探测窗口大小有限制,为记录到足够多的光线,需将探测窗口置于光学截面较小的位置。对于一个成像型的光学结构,探测窗口通常会被置于光学系统的像面位置,这样能保证记录到物方的空间结构信息。而切伦科夫探测器的主要目的是记录尽可能多的微弱光信号,不是对某一个物面成像,故探测器关心的技术指标是光收集效率而非成像质量。对于一个圆柱形的发光体,每个发光面所形成的像面是不同的,且不同的共轭面放大倍数不一样。当探测器位置固定后,它与虚拟孔径光阑之间的相互位置也是固定的,对于光学系统,其

对应的出瞳位置也是固定的,如图 3 所示。用 3 个双胶合透镜 OAP1,OAP2 和 OAP3 表示离轴光学系统的 3 个抛物镜,Be converter 表示铍转换体。当物面在不同位置时,对应的像面也在不同位置,大小也不相同,位置不变的是中间光阑面和出瞳面。在此光学系统中,虚拟孔径光阑比发光面离光学系统更远,光阑通过光学系统所成的像(出瞳)比像面更靠近光学系统。故出瞳是像方空间中限制光束的最小光孔,光学系统收集的光线都会通过这个光孔。将探测窗口置于光学系统的出瞳位置,能确保探测窗口处于最小的光线截面位置,保证光线的充分收

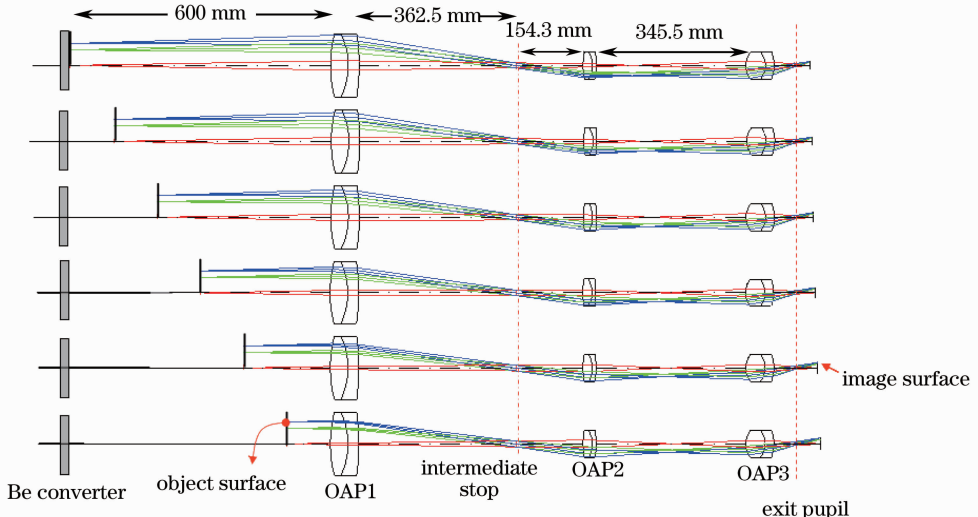


图 3 物面、像面和光阑面的位置关系  
Fig. 3 Positions of object surface, image surface and exit pupil

集。理论上,所有经由光学系统传递的光线都能通过探测器窗口而被记录,但该系统存在的问题是:当物面位置改变时,虚拟孔径光阑面的位置不变而大小在改变,相应地出瞳的位置不变但大小在改变。当探测器窗口大小一定时,如果要保证很高的光收集效率,必需保证探测器窗口尺寸大于最大的出瞳尺寸。而实际应用时,探测窗口无法满足上述要求,这是限制离轴系统光学收集效率的重要因素,文献[12]中并未考虑到这一点。

### 3.2 离轴光学系统结构

离轴光学系统由3片 $90^\circ$ 离轴抛物镜和1片转向平面反射镜组成,其结构如图4所示。其中3片抛物镜的参数如表1所示。切伦科夫光束经第1片抛物镜OAP1反射后缩束,中间光阑面处于平面反射镜和第2片抛物镜OAP2之间。中间光阑面与零视场主光线夹角为 $30^\circ$ 左右,且口径很大,记录设备的探测窗口不适合放在此处。经过第2片抛物镜和第3片抛物镜OAP3的两次缩束,光束最后通过处于OAP3焦点附近的出瞳。出瞳直径较中间光阑缩小很多,可以将探测窗口置于此处。由于设计的原因,出瞳面仍有一个很小的角度倾斜,探测器窗口也应当相应倾斜,这对安装和调整是不利的,这个问题可通过优化结构来解决。图5为若干个发光面

位置的光线追迹结果,图5(a)~(d)中的发光面位置分别处于辐射转换后0,100,200和400 mm。追迹结果表明,当物面改变时出瞳面的位置是不变的。

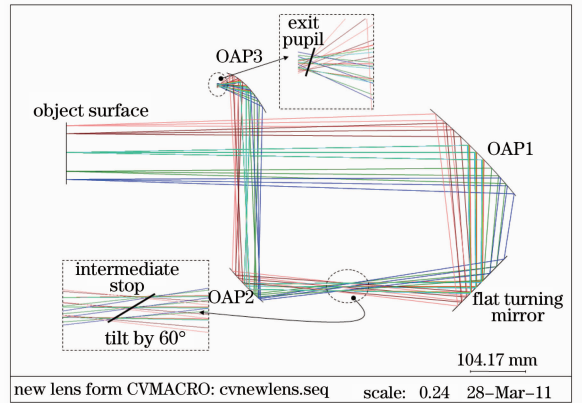


图4 离轴光学系统的结构图

Fig. 4 Optical configuration of the off-axis system

表1 离轴抛物镜的参数

Table 1 Parameters of the off-axis parabolic mirrors

Surface number	Radius /mm	Off-axis distance /mm	Size $\Phi$ /mm
OAP 1	-450	450	170
OAP 2	-180	180	64
OAP 3	50	50	35

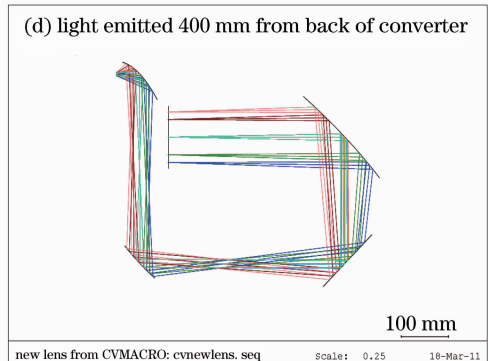
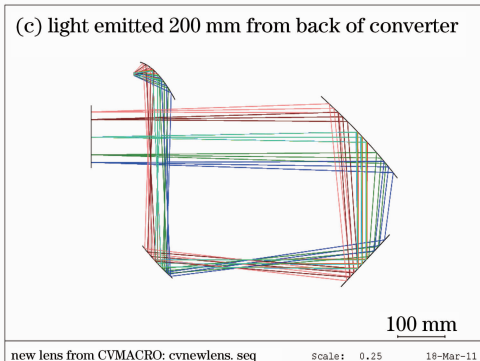
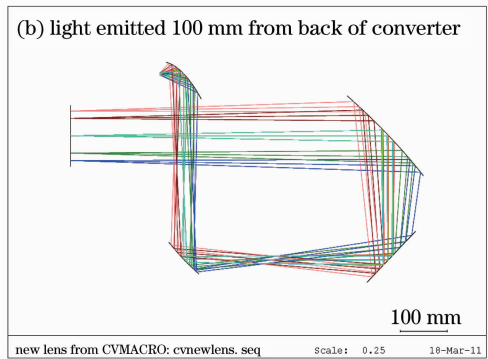
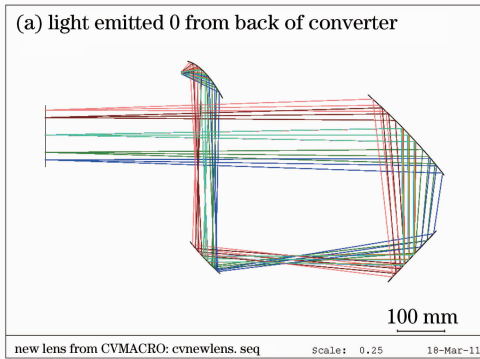


图5 物面位置变化时的光线追迹结果

Fig. 5 Optical ray tracing when the object surface move

相比于卡塞格林结构,离轴系统有两个方面的优势:1)避免卡塞格林结构的次反射镜对光线的阻挡;2)减小干扰信号对记录设备的影响。直穿 $\gamma$ 粒子会在记录设备上形成一个较强的干扰信号,这个信号与切伦科夫光信号存在记录时间上的差异,由于 $\gamma$ 粒子与切伦科夫光信号具有几乎相同的速度,经过卡塞格林结构的两次反射,切伦科夫光的光程比 $\gamma$ 粒子光程约长200 mm,两种信号的时间差约为0.7 ns, $\gamma$ 粒子引起的干扰信号很容易融入切伦科夫光信号中,造成记录的不准确;而在离轴系统中,到达探测器的直穿 $\gamma$ 粒子光程约为靶室半径长度,而切伦科夫光需在光学系统中传递,其光程比 $\gamma$ 粒子长约1400 mm,两种信号的时间差约为4.5 ns,记录设备能从干扰信号的影响中恢复,从而准确记录切伦科夫光信号。同时,使用卡塞格林结构,必须使探测器窗口正对靶室,而离轴系统中,探测器尾端是朝向靶室的,且探测器尾端加装有较厚的钨块,可明显减小 $\gamma$ 粒子信号的干扰。

光线收集效率除受到光学系统的结构限制外,还受到反射镜的反射率影响。片数更多的反射系统,其光线传递效率会比同等条件下片数少的反射系统低。相比于卡塞格林结构采用的2片反射镜,离轴光学系统使用了4片反射镜,收集到的光线数量受到4片反射镜反射率的限制。为保证紫外-可见光谱段的反射率,反射镜的表明粗糙度要求很高,这就增加了生产的成本和难度。同时,多片离轴抛物镜的生产和装校也比2片同轴反射镜的难度更大。

## 4 探测器系统集成和研制分析

### 4.1 探测器系统集成

聚变反应历程测量实验中,切伦科夫探测器需安装在靶室外。为避免探测器整体结构对其他诊断设备的影响,整个探测系统尽量排布紧凑。为减小强辐射环境对记录设备产生的不利影响,探测器应加装辐射防护装置。同时,为监控 $\text{CO}_2$ 气体的状态,以便控制产生切伦科夫光的 $\gamma$ 粒子的能量阈值,探测器需安装气压和温度监控设备。考虑到靶室内需要的真空环境,整个探测器需要较高的真空度要求。图6是采用离轴光学系统的新型切伦科夫探测器结构示意图。探测器通过连接法兰连通到靶室法兰上,钨板既作为辐射转换体,也用于气室封真空。离轴镜OAP1和平面反射镜均置于气室当中,在气室侧壁安装气体控制和监控系统,中间光阑附近的

管腔中用平板材料对气室进行密封。光线在气室中产生后,依次通过OAP1、平面反射镜、OAP2、OAP3后进入探测器,探测器尾部和OPA2所在的腔室壁均设置有一定厚度的钨防护块进行辐射防护。

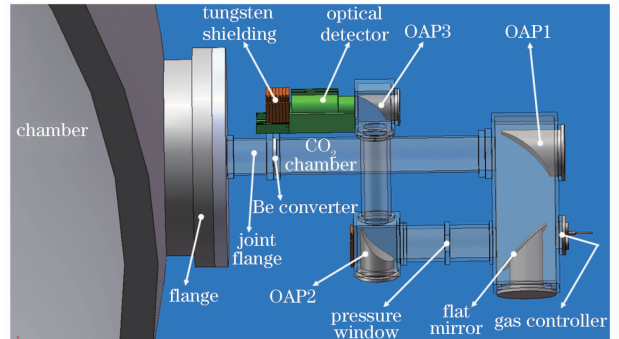


图6 新型GCD的系统集成效果图

Fig. 6 Integration system of the novel GCD

### 4.2 研制分析

GCD系统的两个关键技术指标为:光收集效率和时间分辨率。由于是对微弱光信号的记录,光收集效率决定了探测器记录到的信号强度是否满足判定要求。而惯性约束聚变反应一般发生在100~200 ps的时间范围之内,探测系统的时间分辨率决定了记录信号是否真实可靠,一般要求整个探测系统的时间分辨小于50 ps。

光收集效率受光学系统的结构限制,除使用离轴系统并将探测窗口置于系统出瞳面外,还要求反射镜有较高的反射率。反射率由于入射光的角度和表面粗糙度的限制,在离轴光学系统中,光束对每块镜子的入射角度大致为 $45^\circ$ 。对于通常使用的铝镜,要求在其反射面上镀镍,表面粗糙度峰谷(PV)值要求小于 $1/50$ 波长,以减小紫外波段的散射损失,保证足够大的反射率。由于光路中需使用一块平板材料,要求材料具有良好的紫外-可见光谱段透过率,并且镀紫外-可见光谱段的增透膜,要求250~500 nm的反射率小于1%,500~700 nm的反射率小于1.5%。

密封材料不仅需要较好的透过性,还需注意到材料厚度对宽光谱切伦科夫光造成的色散影响,故要求使用蓝宝石材料或石英材料。蓝宝石材料因其强度高,在承受相同气压和机械强度时能更轻薄,适于提高系统的时间分辨率。从各部分引起的时间分辨率来看,15 mm厚的钨层和600 mm的 $\text{CO}_2$ 的时间分辨率约为6 ps,收光系统和密封材料引起的时间分辨率约为10 ps<sup>[13]</sup>,条纹相机时间分辨率小

于15 ps<sup>[14]</sup>,总的时间分辨率约为19 ps。如果使用快光电管(时间分辨率约35 ps)搭配示波器的记录方式,整个探测器的时间分辨率能达到37 ps。

## 5 结 论

GCD是惯性约束聚变中的重要诊断设备,它将氘氘聚变反应产生的 $\gamma$ 粒子通过两次转换形成切伦科夫光,利用对光信号强度的记录来测量聚变反应历程。使用同轴卡塞格林反射镜的GCD在光收集效率和避免干扰信号等方面存在不足,因此拟在聚变反应历程测量中使用新型的探测器,这种探测器采用了离轴抛物镜和平面反射镜组成的离轴光学系统,并将探测器窗口置于系统的出瞳位置。分析了离轴系统的光束限制和光学结构,并对不同位置发光面发出的光束进行光线追迹,结果表明出瞳的位置是不变的,所有被光学系统收集的光线都会通过这个位置。设计了新型探测器的集成结构,并针对提高光收集效率和时间分辨率等要求,分析了一些关键器件的设计和制造要求,为实际研制提供了依据。

## 参 考 文 献

- 1 H. W. Herrmann, S. E. Caldwell, D. Drew *et al.*. Improved gamma bang time measurements on omega [C]. *Journal of Physics; Conference Series*, 2008, **112**: 032084
- 2 S. E. Caldwell, S. S. Han, J. R. Joseph *et al.*. Burn history measurements in laser based fusion [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, **68**(1): 603~606
- 3 R. A. Lerche, M. D. Cable. Fusion reaction-rate measurement in Nova and NIF [R]. UCRL-LR-105821-96-3, 1996

- 4 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Tang Daorun *et al.*. Development and application of a system for fusion reaction history measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112006  
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): 0112006
- 5 J. M. Mack, S. E. Caldwell, S. C. Evans *et al.*. Multiplexed gas Cherenkov detector for reaction-history measurements [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10): 10E728
- 6 M. J. Moran. Detector development for  $\gamma$ -ray diagnostics of D-T fusion reactions [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1985, **56**(5): 1066~1068
- 7 K. P. Lewis, M. J. Moran, J. Hall *et al.*. A high-efficiency focusing Cherenkov radiation detector [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(3): 1988~1990
- 8 S. E. Caldwell, R. R. Berggren, B. A. Davis *et al.*. Observation of d-t fusion gamma rays [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(3): 1837~1841
- 9 V. Y. Glebov, D. D. Meyerhofer, T. C. Sangster *et al.*. Development of nuclear diagnostics for the National Ignition Facility [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10): 10E715
- 10 C. J. Horsfield, S. E. Caldwell, C. R. Christensen *et al.*.  $\gamma$ -ray 'bang-time' measurements with a gas-Cherenkov detector for inertial-confinement fusion experiments [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10): 10E724
- 11 H. W. Herrmann, J. M. Mack, C. S. Young *et al.*. Cherenkov radiation conversion and collection considerations for a gamma bang time/reaction history diagnostic for the NIF [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, **79**(10): 10E531
- 12 R. M. Malone, H. W. Herrmann, W. Stoeff *et al.*. Gamma bang time/reaction history diagnostics for the National Ignition Facility using 90° off-axis parabolic mirrors [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, **79**(10): 10E532
- 13 A. M. McEvoy, H. W. Herrmann, C. J. Horsfield *et al.*. Gamma bang time analysis at OMEGA [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, **81**(10): 10D322
- 14 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