



·惯性约束聚变物理与技术·

## 惯性约束聚变软 X 射线在线标定系统概念设计\*

曹磊峰, 杨祖华, 陈纪辉, 魏 来, 范全平, 陈 勇, 张强强, 周维民

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 长期以来, 惯性约束聚变(ICF)研究软 X 射线诊断科学仪器设备的元器件标定工作主要依赖同步辐射光源 X 射线辐射计量站进行。该类装置通常与用于开展 ICF 研究的大型激光装置分处两地, 难以满足 ICF 研究软 X 射线元器件实时实地的标定应用需求。另外, 由于同步辐射和 ICF 激光等离子体产生的 X 射线辐射特性存在较大差异, 同步辐射计量站的标定结果事实上也不能完全反映元器件在 ICF 实验应用中的计量响应特性。本文首先介绍一种基于单光学元件的软 X 射线紧凑型无谐波光源单色化技术, 以此为基础提出研制基于 ICF 激光等离子体 X 射线源的同源、同几何位形、双束比较校准的多能量通道光源单色化系统, 用于 ICF 应用软 X 射线元器件的在线标定。新系统一方面可望满足 ICF 软 X 射线元器件实时实地的标定应用需求; 另一方面, 其提供的标定光束的技术特征将最大可能地接近 ICF 激光等离子体 X 射线辐射本身。配备相应的 X 射线二极管(XRD)和标准探测器之后, 该系统将形成一套具有在线自校准功能的新型多通道  $\delta$  能量响应软 X 射线能谱仪。

**关键词:** 惯性约束聚变; 软 X 射线; 标定; 激光等离子体; 等离子体诊断

中图分类号: O536; O434.12

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.200141

## Conceptual design of soft X-ray online calibration system for ICF

Cao Leifeng, Yang Zuhua, Chen Jihui, Wei Lai, Fan Quanping, Chen Yong, Zhang Qiangqiang, Zhou Weimin

(Science & Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** For a long time, the calibration of soft X-ray diagnostic equipment components of ICF research mainly depends on the synchrotron radiation source X-ray metrology station. This kind of device is usually located in a different place from the large laser facility for ICF research, thus it is difficult to meet the real-time field calibration application requirements of ICF's research soft X-ray components research. In addition, in view of the great difference between the radiation characteristics of synchrotron radiation X-ray and ICF laser plasma X-ray, the calibration results of synchrotron radiation measurement station can not completely measure the response characteristics of components in ICF experiments. In this paper, a kind of monochromatic technology for compact non-harmonic soft X-ray source is introduced. Based on this technology, a monochromatic system of multi energy channel source based on ICF laser plasma X-ray source with homologous, geometric configuration and double beam comparison calibration is developed for on-line calibration of soft X-ray components in ICF applications. The new system is expected to meet the requirements of real-time calibration application of ICF's soft X-ray components, while the technical characteristics of its calibration beam will be as close as possible to that of the ICF laser plasma X-ray radiation.

**Key words:** inertial confinement fusion; soft X-ray; calibration; laser plasma; plasma diagnosis

ICF 实验研究<sup>[1-3]</sup> 涉及大量的 X 射线辐射测量工作<sup>[4-9]</sup>。正式实验之前甚至实验过程中, 需要对所使用的各类 X 射线测量仪器设备进行检定, 对涉及各种 X 射线元器件的能量响应特性进行标定(或校准)。譬如, 为了准确测量间接驱动惯性约束聚变研究中随时间演化的黑腔辐射场, 人们需要对所使用的软 X 射线能谱仪涉及的包括滤片、X 射线二极管(XRD)和反射镜在内的众多 X 射线元器件的能量响应函数进行逐一校准<sup>[10-12]</sup>。通常, ICF 研究 X 射线元器件能量响应特性的标定工作需要是在同步辐射光源的 X 射线计量站上进行<sup>[10-12]</sup>。为了配合国内 ICF 研究

\* 收稿日期: 2020-05-24; 修订日期: 2020-07-04

基金项目: 国家重大科技专项项目; 国家自然科学基金项目(11375160); 国家重大科学仪器设备开发专项项目(2012YQ130125)

作者简介: 曹磊峰(1967—), 男, 博士, 研究员, 从事惯性约束聚变激光等离子体诊断技术研究; leifeng.cao@caep.cn; caoleifeng@sztu.edu.cn.

工作,中国工程物理研究院和中国科学院高能物理研究所合作在北京同步辐射装置上先后建立了 3B1, 3W1B, 4B7A 和 4B7B<sup>[13-15]</sup> 四条专用束线用于 ICF 研究 X 射线测量涉及的元器件的标定工作,一定程度上满足了我国 ICF 研究的应用需求。

利用同步辐射光源开展 ICF 研究 X 射线元器件标定工作存在两个方面的不足:(1)开展 ICF 研究的大型激光装置(譬如我国的神光系列激光装置)和用于标定的同步辐射光源(譬如我国的北京同步辐射装置)通常分布于不同的地域,基于同步辐射光源开展的服务难以满足 ICF 研究 X 射线测量实时实地的标定应用需求;(2)同步辐射 X 射线源的高频准连续的辐射特性与 ICF 激光等离子体 X 射线源的单次、强流脉冲辐射特性存在较大的技术参数差异<sup>[16-17]</sup>。这种技术参数特性的差异是否会对 X 射线元器件的标定结果的置信水平带来影响尚不清楚,但是由于缺乏必要的实验技术手段,这种可能的技术影响并未通过认真的实验评估。

前期研究中,作者研制了一种新的软 X 射线色散聚焦元件:掠入射单级聚焦波带片,它可以从连续谱光源中挑选出某特定波长的 X 射线并对其进行点对点成像<sup>[18-20]</sup>。利用这种元件,配合使用与光源满足设定物像关系的针孔或者狭缝可以研发基于单个光学元件的紧凑型(固定能点)软 X 射线无谐波单色仪,从而从 ICF 激光等离子体光源中获取设定能点的单色光束。采用同样技术参数复制另外一台与之全同的单色仪排布于与前一单色仪对称的位置,将可以获得两束技术参数一致的全同 X 射线单色光束。两条光束线互为标准将可以用于 X 射线元器件的(在该设定能点)标定。对 ICF 激光等离子体软 X 射线光谱离散抽样,再针对抽样能点分别研制全同的单色 X 射线束线对,将可望实现 ICF 研究 X 射线元器件的在线标定,从而解决前述同步辐射标定技术现存的两个技术缺陷问题。

本文针对神光 III 原型激光装置技术参数<sup>[21]</sup>,设计了一套 10 能点 20 通道的 ICF 研究软 X 射线元器件在线标定系统。该系统未来可望实现 ICF 软 X 射线元器件在这 10 个能点的标定。另外,为本系统配套 10 个标准探测器和 10 个 XRD 的情况下,该系统将构成一套具有在线自校准功能的、具有  $\delta$  能量响应特征的 10 通道软 X 射线能谱仪。这套能谱仪一方面其元器件无需再送到同步辐射计量站校准,另一方面,由于各能量通道均为  $\delta$  能量响应,其获得的测量数据将直接反映激光等离子体辐射的(随时间演化的)软 X 射线能谱,不再需要传统 ICF 应用多通道软 X 射线能谱仪(Dante 谱仪)所需的复杂的解谱过程<sup>[22-23]</sup>。

## 1 单光学元件软 X 射线无谐波单色仪

同步辐射软 X 射线计量站所采用的光源单色化系统通常复杂而且昂贵。以北京同步辐射 4B7B 光束线(图 1)为例<sup>[13]</sup>,系统包含一块承载高通量热负载、需要配备真空水冷系统的大口径软 X 射线超环面反射镜(TM1),构成单色仪部分的一块球面软 X 射线反射镜(SM)、一块软 X 射线平面反射镜 PM、(多块可切换)反射式软 X 射线衍射光栅(grating)和一块后端面向用户的软 X 射线超环面反射镜(TM2)。其中光栅要配备具有平移和旋转功能的精密真空机械的调节系统以确保光束线可输出指定能点的单能 X 射线光束。

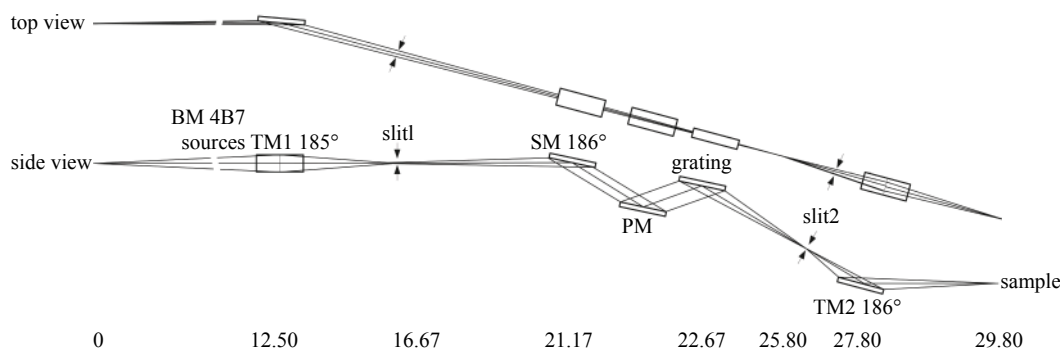


Fig. 1 Layout of beamline 4B7B

图 1 4B7B 光束线布局图

另外,由于传统的衍射光栅是一种多级衍射元件,因而,采用类似 4B7B 光束线的单色化技术的所有同步辐射软 X 射线单能光束线无一例外地存在高次谐波组分。高次谐波的存在对 X 射线计量学和 ICF 软 X 射线元器件的标定应用显然会带来严重的负面影响。为了克服相关影响,人们需要在光束线中插入特殊设计的谐波抑制系统。在北京同步辐射 4B7B 束线中,为了确保在工作能区的谐波被有效抑制,采用了四组四平面镜谐波抑制系统插入图 1 的光束线布局当中<sup>[24]</sup>。这四组四平面镜谐波抑制系统共需 16 块分四组镀不同材料膜层的大口径软 X 射线平

面反射镜。谐波抑制系统的介入进一步增加了光束线的结构复杂性和应用成本。

为了研发装备于 ICF 研究激光装置的软 X 射线光源单色化系统,本研究采用基于单光学元件的光源单色化技术,如图 2 所示,单色仪仅由一个软 X 射线掠入射反射单级聚焦波带片 (Single-order RZP, 简称为 SRZP) 和一个限光狭缝构成。这里的软 X 射线 SRZP 兼具色散、聚焦和抑制高次谐波的功能。这种特殊设计的 SRZP 和限光狭缝相配合可以从连续谱 X 射线光源中挑选形成指定能点的单能 X 射线光束。与同步辐射计量站通常采用的光源单色化系统相比,光源单色化系统结构紧凑、建设成本低,同时具有高得多的从连续谱光源到单能光束的转化效率。

下文将分步骤介绍 SRZP、基于 SRZP 的软 X 射线无谐波单色仪以及 ICF 软 X 射线元器件在线标定系统的设计方法和技术实现途径。

### 1.1 掠入射反射 Fresnel 波带片

掠入射反射 Fresnel 波带片 (RZP) 最早在 1993 年由 Basov 等人提出<sup>[24]</sup>。按照文献 [20] 给出的技术途径,图 3 诠释了这种波带片的构造方法。众所周知,旋转椭球面是一种理想的点对点反射成像曲面。基于这种考虑,以成像系统的物点和像点为基准可以勾画出无穷多不同长短轴的椭圆

$$x^2 = a_i^2 + y^2/b_i^2 = 1 \quad (1)$$

式中:  $a_i$  是这些椭圆的半长轴;  $b_i$  是这些椭圆的短半轴;  $c^2 = a_i^2 - b_i^2$ ,  $c$  是椭圆的 2 倍焦距。将这些椭圆围绕其共同的长轴旋转将可以形成一系列相应的可实现物像理想点对点成像的旋转椭球面。

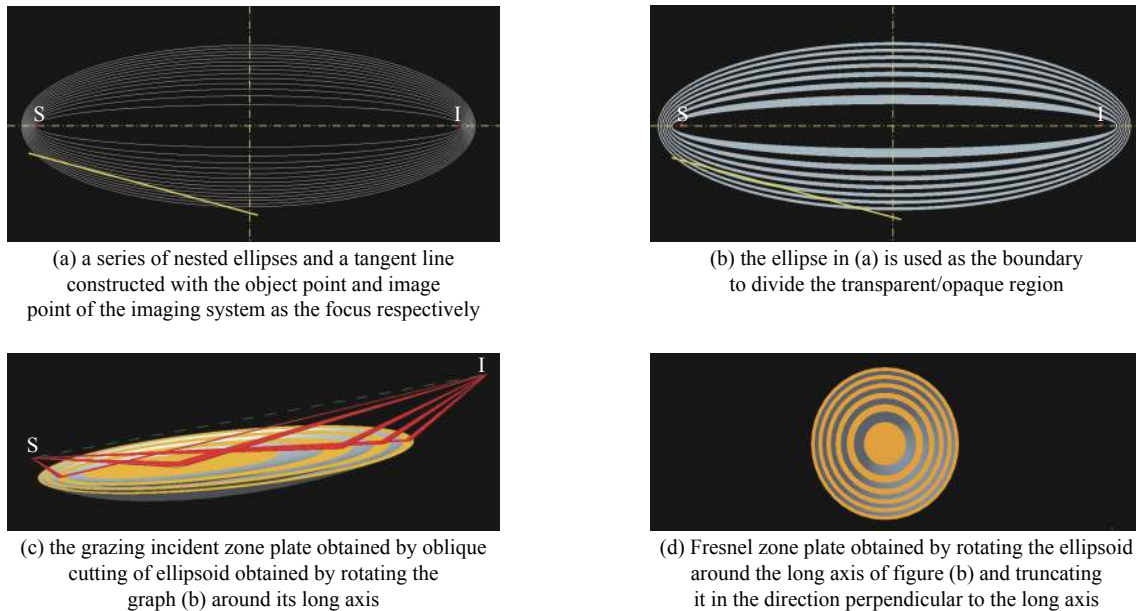


Fig. 3 Method to construct a grazing incidence reflection Fresnel zone plate

图 3 掠入射反射 Fresnel 波带片的构造方法

考虑光源的波长为  $\lambda$ , 使  $a_n = c + n\lambda/2$  ( $n$  为正整数), 可以勾画出一系列的椭球面边界从而划分出一系列的椭圆面区域。为了实现色散功能, 我们可以将前述系列曲面按照这些边界 (图 3(a)) 进行区分、并分别定义这些区间内曲面的反射率使其分别等于 1 或者等于 0 (图 3(b))。随后沿图 3(a)、图 3(b) 左下角黄线所代表的平面对前述定义的椭球面系列进行斜切, 即形成图 3(c) 所示的 RZP。RZP 对软 X 射线兼具色散和聚焦的功能, 其工作原理参见文献 [20]。沿图 3(a) 中任意与长轴垂直的平面对前述定义曲面系列正切将均可形成标准的传统波带片 (FZP, 图 3(d))。从图 3 中可以看出, RZP 的环带宽度比 FZP 要大很多倍, 因而更易于加工制造。

众所周知, 基于 FZP 的衍射聚焦可以实现单能 X 射线的傍轴点对点成像; 而从图 3(c) 可以看出, 基于 RZP 的衍射聚焦则可以实现单能 X 射线的离轴点对点成像。需要特别说明的是, 对于 FZP 傍轴成像而言, 波带片的零级衍射将叠加于像点造成不利影响; 而对利用 RZP 的成像系统来说, 由于其零级衍射与一级聚焦不在同一个方向, 因而 RZP 零级衍射对成像造成的这种不利影响可以被有效规避。



Fig. 2 Layout of single-element monochromator

图 2 单光学元件单色仪布局



RZP 的设计和技术实现中,需要考虑镀膜材料和掠入射角的选择。为了确保 RZP 有效工作,需要保证软 X 射线到 RZP 的掠入射角全部限制在小于镀膜材料镜面的全反射角。对于硅基底镀金薄膜的软 X 射线反射光学元件而言,其全反射角一般小于  $4^\circ$ 。

## 1.2 掠入射反射单级聚焦波带片 (SRZP)

按照图 2 的布局,利用 RZP 配合限光狭缝将可以构成一个结构紧凑的软 X 射线单色仪。原因是我们设计的 RZP 仅针对某一指定波长  $\lambda$ ,因而仅有波长为  $\lambda$  的软 X 射线才满足图 2 所示的物像关系,从光源发出的光才能顺利地穿过狭缝。而其他不同波长的 X 射线将因物像关系不匹配从而被狭缝遮挡。但是需要说明的是,同衍射光栅和 FZP 一样,这里的 RZP 也是一种多级衍射元件,除了具有 0 级、1 级衍射而外,同时也具有 2 级、3 级……等高级衍射。只是由于这些高级衍射不能在图中的狭缝处有效聚焦,因而也无法有效地穿过狭缝。但是,如果图 2 中的 X 射线源如果含有有波长为  $\lambda/2, \lambda/3, \dots$  等高次谐波的 X 射线的组分,这些高次谐波相应的 2 级、3 级……等高级衍射将会和波长  $\lambda$  的 1 级衍射一样满足图 2 所示的物像关系,也能够顺利穿过狭缝。换句话说,图 2 的单色仪如果用 RZP 做光学元件,获得的单能光束同样地存在高次谐波问题。

前期研究中<sup>[25-31]</sup>,我们提出了利用二值化正弦函数替代方波函数实现 X 射线单级衍射光栅和单级聚焦波带片的技术方法,在实践中取得了良好的应用效果。文献 [25] 给出的设计方法加工难度相对更小一些,相对更容易实现:将光栅透明狭缝或波带片透明环带截成小段、左右错位构造二值化正弦函数(图 4)。图 4 中,在黑白透射光栅基础上,将透光狭缝划分成许多小矩形孔,矩形孔中心在原中心的  $\pm d/4$  以内呈正弦分布函数分布,其中  $d$  为光栅周期,则将透过率函数沿  $y$  轴积分可以得到沿  $x$  轴的正弦透过率函数。准正弦光栅可以把高级衍射抑制到 1 级衍射的 0.6% 及以下的水平<sup>[25-29]</sup>。

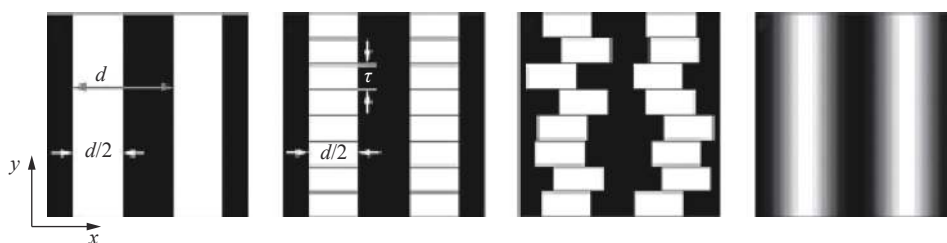


Fig. 4 Method to construct single-order diffraction grating by Kuang Longyu et al<sup>[25]</sup>

图 4 文献 [25] 中单级衍射光栅的设计方法

利用文献 [25] 的方法改进 RZP 的设计,可以有效地抑制高级衍射,使之形成单级聚焦 RZP(SRZP)。将 RZP 的无反射环带(黑色)或反射环带(白色)截断切割成横向尺寸不一的足够多的小段,使每小段沿当前环带周期内的中心椭圆线法线按照正弦函数进行准随机排布,即可实现 SRZP 的新型结构设计(图 5)。

图 6 给出硅基底镀金 SRZP 应用于图 2 单色仪的一个设计仿真计算结果,有关参数参见表 1。这个算例中,单色仪的输入 X 射线源假设为激光等离子体产生的黑体辐射软 X 射线源,响应的辐射温度设为 200 eV。图 6 给出的单色仪输出能谱中看不到对应能点为 1.0, 1.5 keV 的高次谐波组分,这说明我们设计的单光学元件单色仪可以有效地抑制高次谐波。

## 1.3 多层膜 SRZP

通常而言,单层镀膜 X 射线反射元件仅应用于非常软的 X 射线(光子能量小于 2 keV)。ICF 研究黑腔等离子体软 X 射线能谱测量中,人们关心的能区通常会延伸到 5 keV 或者更高(甚至达到 10~20 keV 的水平)。这时人们需要用晶体或者多层膜(多层膜又被称为一维人造晶体)。由于多层膜自身具有色散或波长选择功能,利用多层膜制作的 SRZP 将性能更好。引入多层膜技术制作的 SRZP 一方面可以将图 2 所示的单色仪设计技术向更高的能区扩展,另一方面,可以更有效地抑制 SRZP 随机结构导致的其他波长 X 射线的杂散光本底,其能量响应曲线将更加锐利,背景更弱。关于多层膜单级衍射光栅的最新研究参见文献 [32]。

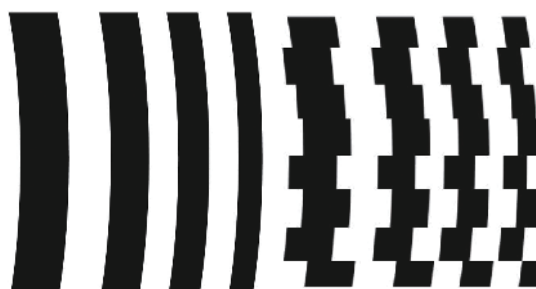


Fig. 5 Method to construct SRZP from an RZP

图 5 从 RZP 到 SRZP 的技术实现方法

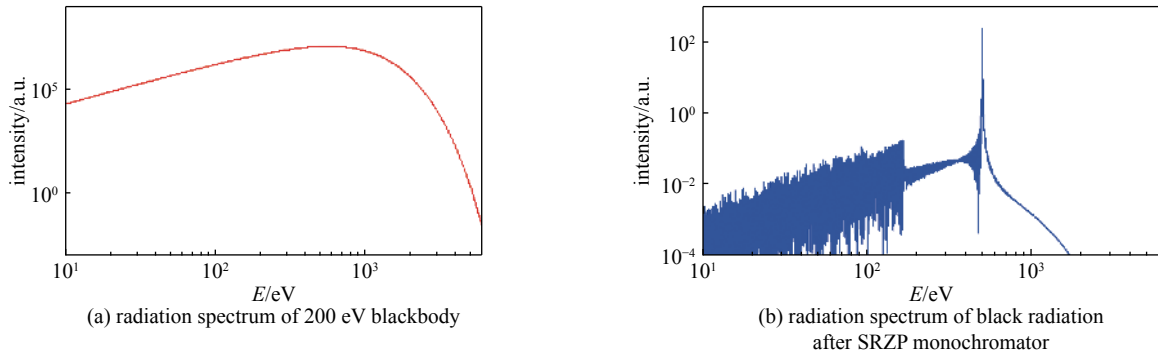


Fig. 6 Energy response of SRZP monochromator to blackbody radiation spectrum (design energy point 500 eV)

图 6 SRZP 单色仪对黑体辐射谱的能量响应(设计能点 500 eV)

表 1 一款单元件软 X 射线单色仪的设计参数

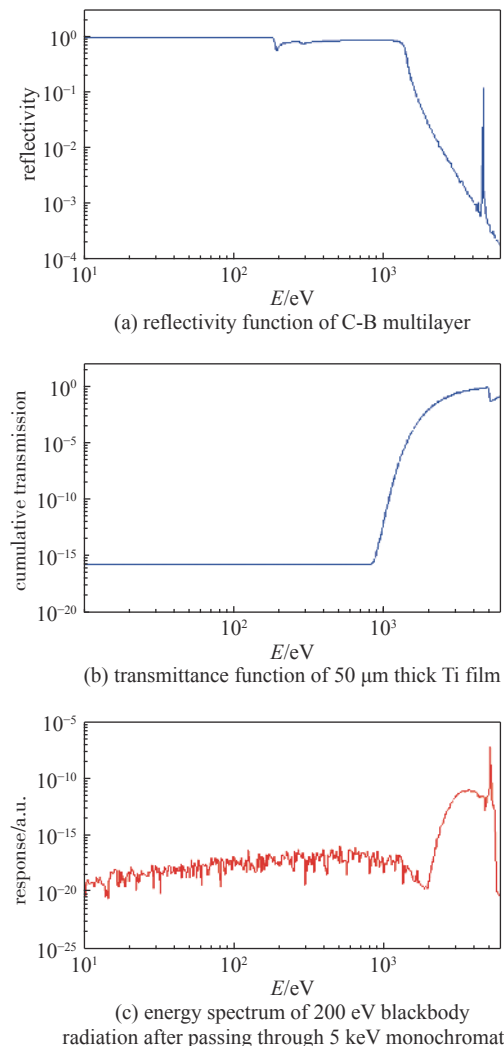
Table 1 Design parameters of a single optical element soft X-ray monochromator

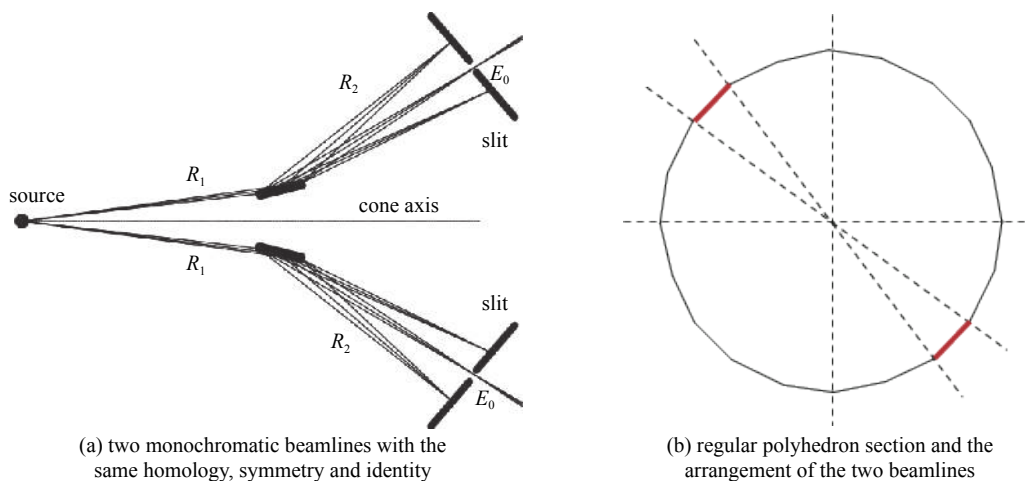
selected energy/ eV	object distance/ mm	image distance/ mm	RZP size	grazing incident angle/(°)	exit angle/ (°)	source size (HHFW)/ $\mu\text{m}$	slit width/ $\mu\text{m}$	band width ( $E/\Delta E$ )
500	1650	596	50 mm $\times$ 10 mm	1.3	4.1	200	100	1000

图 7(a) 给出针对 5 keV 能点设计的 C-B 多层膜在表 1 几何位形情形下的能谱响应特性; 图 7(b) 给出的是 50  $\mu\text{m}$  厚 Ti 滤片的能谱响应特性; 图 7(c) 给出针对 5 keV 能点设计的多层膜 SRZP 单色仪对 200 eV 黑体辐射谱的能量响应曲线。从图 6(a) 可以看出, 200 eV 黑体辐射谱中, 光子能量在 2 keV 以下的 X 射线辐射成分几乎可以理解为绝对主导成分, 更高光子能量的 X 射线辐射在这个黑体辐射谱中含量极少。5 keV 能点的 X 射线辐射份额较之亚 keV X 射线的占比更是要低 5 个数量级以上。为了抑制低能 X 射线给单色仪带来的噪声本底, 图 7 所示的多层膜 SRZP 单色仪还配合使用了 50  $\mu\text{m}$  厚的 Ti 滤片(图 7(b))。

## 2 基于单光学元件软 X 射线无谐波单色仪的 ICF 在线标定系统

利用 SRZP 或者多层膜 RZP 采用图 2 布局构成的软 X 射线无谐波单色仪结构紧凑, 可望安装于大型激光聚变装置, 从激光等离子体 X 射线辐射源中获取指定波长的软 X 射线单能光束。利用这样的光束可以实现 ICF 研究中软 X 射线元器件的标定工作。与同步辐射 X 射线不同, ICF 激光等离子体 X 射线源具有强流单脉冲的技术特性。通常而言, ICF 实验激光打靶的实验参数发与发之间具有独立性, 彼此难以完全重复。因此要实现 ICF 研究中软 X 射线元器件的标定工作, 仅有一束单能 X 射线是不够的。完成这些元器件在某一能点的能量响应标定工作需要两束全同光束。这种全同光束可以采用图 8(a) 所示的结构布局来实现。图 8(a) 中两条光束的几何位形、光学元件和限光狭缝均完全一致。从技术实现的层面上, 我们可以设计一个横断面为如图 8(b) 所示的正多边形锥, 将图 8(a) 所示的两条束线装配于正多边形锥体的任意两个镜像对称的面上以确保两者之间几何位形一致。图 8(b) 的其他锥面可以装配其他不同能点的单能束线对, 以实现更多能点的标定。

Fig. 7 Energy response of multilayer (a) SRZP monochromator combined with 50  $\mu\text{m}$  thick Ti filter (b) to 200 eV blackbody radiation spectrum (c)图 7 多层膜 (a) SRZP (b) 单色仪配合 50  $\mu\text{m}$  厚 Ti 滤片对 200 eV 黑体辐射谱的能量响应 (c)



(a) two monochromatic beamlines with the same homology, symmetry and identity

(b) regular polyhedron section and the arrangement of the two beamlines

Fig. 8 Layout of two whole-same monochromatic soft X-ray beams from a share laser plasma source

图 8 基于激光等离子体的两条同源全同单能软 X 射线光束线布局

图 9 给出针对神光-III 原型装置设计的一套 ICF 软 X 射线元器件 10 能点 20 通道标定系统(表 2)概念设计。这个系统中,各个通道的单能束线统一采用表 1 中的几何参数和结构位形。该标定系统主要包括模拟靶组件、锥形筒组件、波纹管法兰组件、二十面锥体组件和狭缝安装组件等 22 个组件。该系统可事先利用其他的激光等离子体 X 射线源进行线下安装和集成调试,完成后可整体搬运、安装并应用于神光激光装置中。应用中成对的指定能点单能束线可以互为标准,用于开展软 X 射线元器件的标定工作。举例说明,人们可以首先用两套标准探测器完成 1#和 11#能量通道的能量响应关系,这可通过一次激光打靶完成对标;随后,在 1#通道安装待标定元件、11#通道仍采用标准探测器的情况下,利用第二次打靶完成对光学元件在 20 eV 能点的绝对标定。

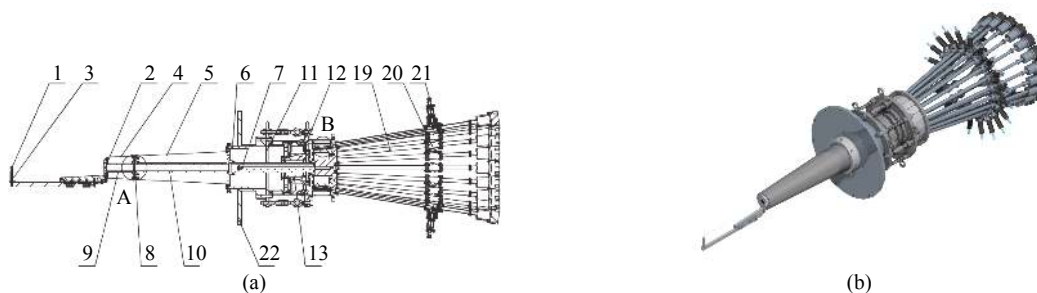


Fig. 9 Conceptual design of on-line calibration system for ICF soft X-ray components for Shenguang-III prototype facility

图 9 神光-III 原型装置 ICF 软 X 射线元器件在线标定系统概念设计图

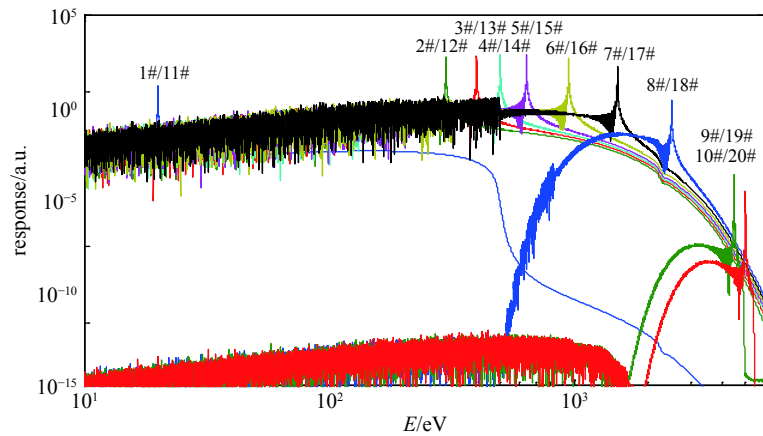
图 10(a)给出设计的神光-III 原型装置 ICF 软 X 射线元器件在线标定系统 10 个能量通道单能束线的光谱特征曲线。图 10(b)给出了利用 X-LAB 软件<sup>[31]</sup>仿真计算诠释的系统单能束线的谱分辨能力。图 10(b)表明,系统的各条束线的光谱分辨  $E/\Delta E$  均大于 1 000。

图 9 所示的在线标定系统中,如果将 1#~10#通道配备普通的 XRD, 11#~20#通道安装标准探测器,该系统将构成一套在线自校准的 10 通道  $\delta$  能量响应软 X 射线能谱仪。利用该套能谱仪将可以直接获得激光等离子体随时间演化的软 X 射线能谱。与传统的 Dante 谱仪不同,这套谱仪测量激光等离子体软 X 射线光谱将大幅度降低其应用成本。该谱仪无需送往同步辐射计量站校准,一次性直接获得激光等离子体软 X 射线经过绝对校准的、无须解谱的、随时间演化的能谱。

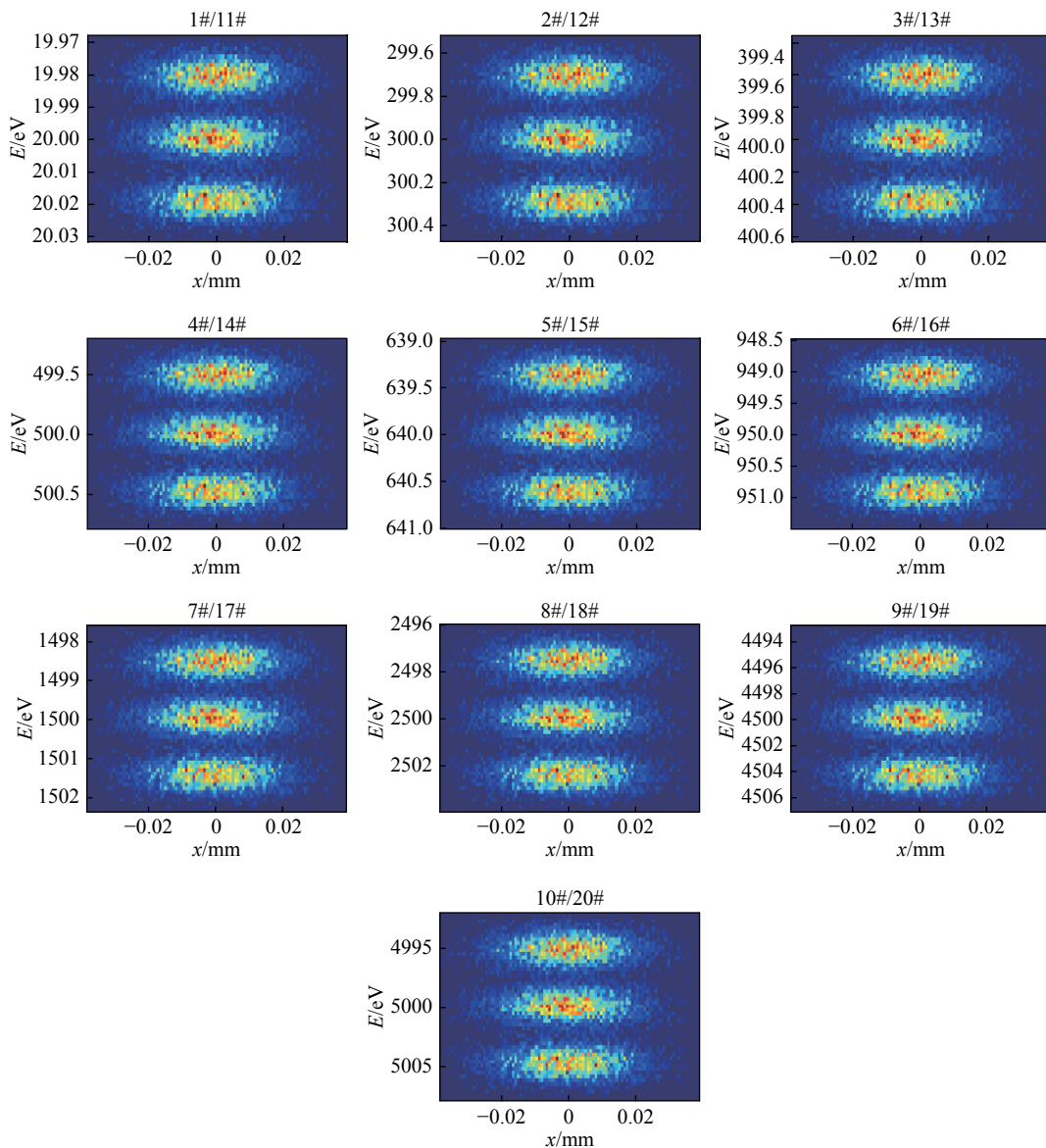
表 2 神光-III 原型装置 ICF 软 X 射线元器件在线标定系统能点分布

Table 2 Energy channel distribution of ICF soft X-ray component online calibration system for Shenguang-III prototype facility

channel No.	energy /eV
1#/11#	20
2#/12#	300
3#/13#	400
4#/14#	500
5#/15#	640
6#/16#	950
7#/17#	1500
8#/18#	2500
9#/19#	4500
10#/20#	5000



(a) energy spectrum characteristics of 10 designed monochromatic beam lines at 200 eV



(b) the energy resolution on the slit plane of the 10 designed beam lines [for the target energy point  $E_0$ , the energy corresponding to the three facula is  $(1-0.001) E_0$ ,  $E_0$  and  $(1+0.001) E_0$ ]

Fig. 10 Energy spectrum characteristics and resolution level of each channel of ICF soft X-ray component online calibration system for Shenguang-III prototype facility

图 10 神光-III 原型装置 ICF 软 X 射线元器件在线标定系统各个通道的能谱特性及分辨水平



作为比较,利用传统的10通道Dante谱仪获取类似数据的过程将非常复杂:首先需要将10种不同的X射线滤片、10块不同的反射镜和10个XRD送往同步辐射计量站分别标定;完成后送回ICF实验现场重新组装调试,确保可以有效获得实验数据;ICF实验获得相应的测量数据之后,需要基于前述标定结果采用精心开发的反演程序对测量谱解谱。

### 3 结 论

本文基于单光学元件SRZP的紧凑型无谐波光源单色化技术为神光III原型装置,设计了一套双束比较工作模式的ICF软X射线元器件在线标定系统。该系统由 $2 \times 10$ 条不同指定能点的同源软X射线无谐波单能束线构成。采用的输入X射线源来自于神光III装置自己产生的激光等离子体软X射线,从而可满足神光III原型装置ICF软X射线元器件实时实地标定应用的需求。同时,由于和ICF研究应用环境同源,该系统可望提供较同步辐射计量站更符合应用需求的标定结果。如果在该系统的10个不同指定能点的能量通道配备XRD,且在另外10个通道配备标准能量探测器,将构成一套使用方便、具有在线自校准功能的10通道 $\delta$ 能量响应软X射线能谱仪。与传统的Dante谱仪相比,新谱仪具有应用环境实时实地的自校准的功能,使用前不再需要拆解送往同步辐射计量站校准,在大幅度节约使用成本的同时可显著提升ICF研究黑腔辐射软X射线辐射能谱的测量置信水平。

### 参考文献:

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [2] 候立飞, 李芳, 袁永腾, 等. 化学气相沉积金刚石探测器测量软X射线能谱[J]. *物理学报*, 2010, 59(2): 1137-1142. (Hou Lifei, Li Fang, Yuan Yongteng, et al. Chemical vapor deposited diamond detectors for soft X-ray power measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(2): 1137-1142)
- [3] 李志超. 大尺度激光等离子体相互作用的实验研究[D]. 合肥: 中国科学与技术大学, 2011: 155-180. (Li Zhichao. Experimental study on large scale laser plasma interaction [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011: 155-180)
- [4] 孙可煦, 杨建国, 郑志坚. 用于激光等离子体诊断的亚千X射线能谱仪[J]. *强激光与粒子束*, 1990, 2(1): 16-22. (Sun Kexu, Yang Jianguo, Zheng Zhijian. A sub keV X-ray spectrometer used in laser plasma interaction experiments[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1990, 2(1): 16-22)
- [5] Tirsell K G. Time resolved sub-keV X-ray measurements using filtered X-ray diodes[R]. UCRL 81478, 1979.
- [6] 孙可煦. 滤光片-XRD系统响应时间测量[C]//中国工程物理研究院科技年报. 2003: 94-95. (Sun Kexu. Measurement of response time of filter XRD system[C]//Annual Report of Science and Technology of China Academy of Engineering Physics. 2003: 94-95)
- [7] 董建军, 曹柱荣, 杨正华, 等. 辐射驱动内爆流线实验测量[J]. *物理学报*, 2012, 61(15): 374-378. (Dong Jianjun, Cao Zhurong, Yang Zhenghua, et al. Measurement of implosion trajectory for hohlraum-radiative-driven[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(15): 374-378)
- [8] 江少恩, 孙可煦, 黄天暄, 等. 神光II基频光辐射输运实验与分析[J]. *物理学报*, 2004, 53(5): 1425-1432. (Jiang Shaoen, Sun Kexu, Huang Tianxuan, et al. Investigation of radiation transport experiments with a wavelength 1.053  $\mu\text{m}$  on 'Shengguang II' facilities[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(5): 1425-1432)
- [9] 易荣清, 孙可煦, 黄天暄, 等. 双盘靶等离子体运动和X光辐射[J]. *原子与分子物理学报*, 1998, 15(2): 139-142. (Yi Rongqing, Sun Kexu, Huang Tianxuan, et al. Plasma motion and X-ray radiation of double disk target[J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 1998, 15(2): 139-142)
- [10] 孙可煦, 马洪良, 徐和平, 等. X光掠入射平面镜反射率标定及应用[J]. *光学学报*, 1993, 13(10): 934-939. (Sun Kexu, Ma Hongliang, Xu Heping, et al. the reflectance of X-ray grazing planar mirror and application[J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, 13(10): 934-939)
- [11] Heinle R A, Tirse L K G. Filtered mirror sub-keV X-ray measurement system[J]. *Laser Program Annual Report*, 1979, 5: 5-57.
- [12] 孙可煦, 崔延莉, 易荣清, 等. 多种材料软X光平面镜反射率标定[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(4): 349-353. (Sun Kexu, Cui Yanli, Yi Rongqing, et al. Reflectance calibration of different material soft X-ray planar mirrors by BSRF[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(4): 349-353)
- [13] 郑雷, 赵屹东, 崔明启, 等. 北京同步辐射装置4B7A、4B7B光束线高次谐波抑制系统初步设计[J]. *核技术*, 2007, 30(9): 721-724. (Zheng Lei, Zhao Yidong, Cui Mingqi, et al. The primary design of higher-harmonics suppressor for Beamline 4B7A and 4B7B at Beijing Synchrotron Radiation Facility[J]. *Nuclear Techniques*, 2007, 30(9): 721-724)
- [14] 钱海杰, 阎永康, 陶冶. 3B1B光束线单色器设计及标定[J]. *高能物理与核物理*, 2003, 27(12): 125-128. (Qian Haijie, Yan Yonglian, Tao Ye. Design and calibration of the monochromator in 3B1B beamline[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2003, 27(12): 125-128)
- [15] Zhu Jie, Cui Mingqi, Sun Lijuan, et al. Polarization measurement of 3W1B beamline at BSRF in soft X-ray range[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2007, 31(6): 602-606.
- [16] 易荣清, 曹建林, 孙可煦. 强脉冲单色软X光标定源的研制[J]. *原子与分子物理学报*, 1997, 14(2): 311-315. (Yi Rongqing, Cao Jianlin, Sun Kexu, et al. Development of the high intensity pulse source of soft X-ray for calibration[J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 1997, 14(2): 311-315)
- [17] 候立飞, 易荣清, 刘慎业, 等. 激光等离子体脉冲软X光标定源[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(1): 79-82. (Hou Lifei, Yi Rongqing, Liu Shenye, et al. Laser plasma pulse source of soft X-ray for calibration[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(1): 79-82)
- [18] Yang Zuhua, Zhao Zongqing, Wei Lai, et al. Design of elliptical reflection zone plate for monochromatization of the ultrafast betatron radiation at low energy band[J]. *Chin Phys Lett*, 2014, 31: 050701.



- [19] 杨祖华, 魏来, 张强强, 等. 椭圆反射式波带片光线追迹算法[J]. 光学学报, 2017, 29(9): 240-245. (Yang Zuhua, Wei Lai, Zhang Qiangqiang, et al. Ray-tracing algorithm of elliptical reflection zone plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 29(9): 240-245)
- [20] 曹磊峰, 杨祖华, 王静, 等. 一种具有色散聚焦的椭圆反射式波带片设计和制作方法: CN104570180A[P].2015-04-29. (Cao Leifeng, Yang Zuhua, Wang Jing, et al. Design and fabrication of an elliptical reflection zone plate with dispersion focusing: CN104570180A[P].2015-04-29)
- [21] 薛全喜, 江少恩, 王哲斌, 等. 基于神光III原型装置开展的激光直接驱动准等熵压缩研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67: 045202. (Xue Quanxi, Jiang Shaoen, Wang Zhebin, et al. Progress of laser-driven quasi-isentropic compression study performed on SHENGUANG III prototype laser facility[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 045202)
- [22] 李晶, 黄显宾, 张思群, 等. 软X光Dante谱仪的平滑解谱算法及其在Z箍缩诊断中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(11): 1655-1660. (Li Jing, Huang Xianbin, Zhang Siqun, et al. Smooth unfolding algorithm for soft X-ray Dante spectrometer and its application to Z-pinch diagnostic[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1655-1660)
- [23] 张思群, 黄显宾, 李晶, 等. 多通道软X射线Dante谱仪标定及实验[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(7): 1106-1110. (Zhang Siqun, Huang Xianbin, Li Jing, et al. Calibration and application of multi-channel soft X-ray Dante spectrometer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(7): 1106-1110)
- [24] Basov Y A, Roshchupkin D V, Schelokov I A, et al. Two-dimensional X-ray focusing by a phase Fresnel zone plate at grazing incidence[C]//Proc 4th Int Conf X-ray Microscopy. 1993: 593.
- [25] Kuang Longyu, Cao Leifeng, Zhu Xiaoli, et al. Quasi-sinusoidal single-order diffraction transmission grating used in X-ray spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 3954-3956.
- [26] Wei Lai, Kuang Longyu, Fan Wei, et al. Annulus-sector-element coded Gabor zone plate at the X-ray wavelength[J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21419-21424.
- [27] Cao Leifeng, Foster E, Fuhrmann A, et al. Single-order X-ray diffraction with binary sinusoidal transmission grating[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90: 053501.
- [28] Li H L, Shi L N, Wei L, et al. Higher-order diffraction suppression of free-stranding quasiperiodic nanohole arrays in the X-ray region[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110: 041104.
- [29] Liu Y, Zhu X L, Gao Y L, et al. Quasi suppression of higher-order diffractions with inclined rectangular apertures grating[J]. *Scientific Report*, 2015, 5(5): 16502.
- [30] Fan Q, Liu Y, Wang C, et al. Single-order diffraction grating designed by trapezoidal transmission function[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2657-2660.
- [31] 杨祖华, 周维民, 李鹏飞, 等. 光学设计仿真软件X-LAB及其工程化应用[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 112002. (Yang Zuhua, Zhou Weimin, Li Pengfei, et al. Optical simulation software X-LAB and its application[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 112002)
- [32] Chen J H, Wei L, Yang Z H, et al. Binary sinusoidal single-order multilayer gratings for tender X-ray region[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(6): 1008-1013.