

DOI:10.16136/j.joel.2022.04.0548

基于多锥晶体的多能点 X 射线光谱仪

施 军¹, 赵雨鑫¹, 黎 淼^{2*}, 王拂晓¹, 王 峰³, 尚万里³, 杨国洪³, 韦敏习³

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065; 3. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了克服传统弯曲晶体光谱仪存在检测的像差问题, 基于衍射聚焦 X 射线特征能量谱范围、衍射光源位置、聚焦成像距离等关键的物理参数, 设计了具有高光谱分辨率及宽光谱检测范围的多锥晶体 X 射线光谱仪。从结构原理上讨论了该光谱仪的特点, 研制完成了连续光滑的多锥表面 X 射线衍射聚焦弯曲晶体, 通过单次 X 射线衍射聚焦诊断实验即能实现不同能量 X 射线无像差检测。对 Ti 的 K_α 与 K_β 射线光谱进行了多次衍射聚焦检测实验, 获得了不同聚焦成像位置下的 K_α 与 K_β 特征谱线强度分布, 并完成了光谱仪谱线聚焦能力与光谱分辨率分析。根据晶体对 X 射线聚焦程度与成像位置的关系, 进行了不同聚焦成像位置处连续锥面光谱仪的聚焦性能分析, 确定了最佳聚焦位置。实验结果表明: 多锥晶体 X 射线光谱仪的聚焦能力得到显著提升, 能谱检测范围可以覆盖 4.51—5.14 keV, 且在较大尺寸光源基础上仍能保证光谱分辨率达到 600 以上。

关键词: X 射线光谱; 多锥晶体; 光谱范围; 聚焦能力

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)04-0342-07

Multiple energy points spectrometer based on multi-cone crystal

SHI Jun¹, ZHAO Yuxin¹, LI Miao^{2*}, WANG Fuxiao¹, WANG Feng³, SHANG Wanli³, YANG Guohong³, WEI Minxi³

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 3. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: Based on the key parameters, such as X-ray energy spectrum range, source position and imaging distance, a multi-cone crystal spectrometer with a wide spectral range and high spectral resolution was designed to overcome problems of aberration detection in the traditional curved crystal spectrometer. The characteristics of the spectrometer are discussed in terms of structure and principle. A continuous and smooth spectrometer has been developed. By single X-ray focal diagnosis, the aberration free detection of X-ray with different energy can be realized. The intensity distribution of the K_α and K_β spectra at different focusing imaging positions was obtained by multiple diffraction experiments, and the focusing ability and spectral resolution of the spectrometer were analyzed. According to the relationship between X-ray focusing degree and imaging position, the focusing performance of continuous cone spectrometer at different focusing imaging position is analyzed, and the best focusing position is determined. The experimental results show that the focusing ability of the multi-cone crystal X-ray spectrometer has been significantly improved, and the energy spectrum detection range can cover 4.51—5.14 keV, and the spectral resolution can reach more than 600 on the larger size of the light source.

Key words: X-ray spectrum; multi-cone crystal; spectral range; focus ability

* E-mail: limiao@cqupt.edu.cn

收稿日期: 2021-08-05 修订日期: 2021-09-12

基金项目: 等离子体物理重点实验室基金(6142A04180207)、重庆市留学创新基金(cx2018023)和国家自然科学基金(61604028)资助项目

1 引言

化石矿物燃料燃烧排放的温室气体持续增长导致了一系列严重危害自然生态系统平衡和人类生活的环境问题,因此寻找清洁无害的新能源成了相关领域学者迫在眉睫的任务。核聚变是一种高效而且清洁的能源,它利用几乎取之不尽、用之不竭的氘氚为原料,经过轻核聚变反应产生聚变能^[1-3]。激光惯性约束聚变是常见的轻核聚变途径之一,X射线光谱诊断是内爆混合研究中关键的诊断技术,其中,晶体光谱仪是X射线光谱诊断的重要设备^[4,5]。从1912年劳厄发现X射线的晶体衍射现象至今,关于X射线检测晶体光谱仪的研究已经持续了一百多年,然而同时具有宽能量范围和高分辨力的X射线光谱仪一直是难以解决的问题。许多科研工作者试图通过应用多元统计分析法来将目标能量区域中的信息分离成不同对象组,以对应于不同能带光谱^[6],然而设计出通过一次检测实验即能实现目标范围内多光谱检测仪显然能更高效地解决这一问题。此外微量杂质如Ti、Cu、Ar等元素常被掺杂于靶丸烧蚀层、燃料层、热斑等不同位置,通过诊断掺杂物质的X光线谱特性,能够获得电子温度密度、离子密度、内爆混合质量、R-T扰动特性等相关参量信息^[7,8],但是掺杂元素含量极低会造成诊断信号微弱,因此提高信号强度也是当今诊断仪器急需解决的难题。

目前使用的晶体光谱仪都是基于布拉格衍射原理的波长色散晶体光谱仪,其中Von Hamos型弯曲晶体光谱仪得到广泛研究^[9-12],此类光谱仪具有较高的集光效率,但光源和探测器必须位于圆柱的轴上,缺乏灵活性且工作距离短。HALL^[13]在Von Hamos型结构的基础上提出了圆锥形聚焦结构,不过由于其结构不具有旋转对称性导致此种结构只适用于小范围光谱的检测。为此KOHEL等^[14]提出用几个锥段连接形成晶体面型,再通过具有该表面型的上下模具压制晶体薄片来获得所需的晶体表面^[15],不过对非连续面压制时的弯折会影响晶格常数而导致光谱分辨力损失甚至成像发生形变,因此ROBLEDO等^[16]在此基础上提出利用许多一定宽度的窄段锥形环拼接形成近似连续表面,但这种结构中锥段间连接处的不平滑不可避免地会给光谱检测带来误差。

针对以上研究过程中出现的不足,本文成功研制出了具有连续光滑表面的多锥晶体光谱仪。本文提出的多锥晶体X射线光谱仪在较大光谱范

围内对于每个能点在理论上都可以产生点光源的完美无像差成像。本文描述了晶体分析器的结构及几何原理,研制多锥晶体光谱仪并在Ti靶X射线管装置上进行了多能点X射线光谱诊断实验。实验结果表明,此晶体光谱仪不仅在宽能谱范围下能够保证光谱分辨力,而且具有强聚焦能力和平焦场的优点。

2 连续锥面晶体衍射原理及光路结构

使用晶体作为衍射器件的光谱仪,必须符合晶体布拉格衍射原理,当X射线以与晶面成 θ 角入射时,晶面间的光程差是波长的整数倍,相邻晶面之间的衍射线因相互干涉而增强。因此只有当X射线能量满足下面等式时才能被晶体反射。

$$E = \frac{12.398}{2d\sin\theta}, \quad (1)$$

式中,12.398是普朗克常数 h 与真空中光速 c 的乘积, d 是晶面间的距离, θ 是布拉格角。

当晶体材料和布拉格角选定以后,根据该等式能够推算X射线的能量 E 。

连续锥面晶体成像光路结构如图1所示,图中包含了成像系统的3个主要部分:光源、多锥面晶体及接收器。设计的晶体是由无数个连续的具有不同曲率半径的圆构成的连续光滑曲面,这些圆在 z 轴方向最低点连线位于 x 轴上。可以得出由光源发出不同波长的X射线经特定的圆反射后能够聚焦于与 x 轴线垂直的接收平面的中心轴线上,即该结构具备平焦场特性,能够与包括X射线CCD在内的平面探测器耦合。

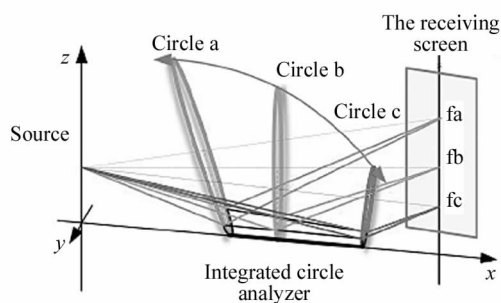


图1 多锥晶体检测示意图

Fig. 1 Diagram of detection with multi-cone crystal

为了更好地理解这种结构,现将图1中的3个圆分离出来,逐一进行分析。微圆柱在不同位置时光汇聚情况,如图2所示, S 代表光源位置, AN 代表接收器位置。射线由 S 点发出,在 M 点反射,反射线与 NA 交于 P 点,入射光线 SM 与反射面的夹角为布拉格角 θ ,将曲线 SMP 绕轴线 SP 旋转一周可得到

两个对称的锥面。如果把以点 H 为圆心, HM 为半径的圆看成有微小高度的圆柱, 则所有 S 点源发射至该微圆柱内表面的光线均汇聚于 P 点, 即所有参与成像的射线在理论上都具有旋转对称性。图 2(b) 和 2(c) 所示为了保证晶体的旋转对称性, 随着微圆柱位置 x_i 的改变, 微圆柱的倾角 δ_i , 以及对应的半径 R_i 也会有相应的改变。由于这些微圆柱与光源距离不同, 相应布拉格角也不同, 因此能够衍射不同的光子能量。

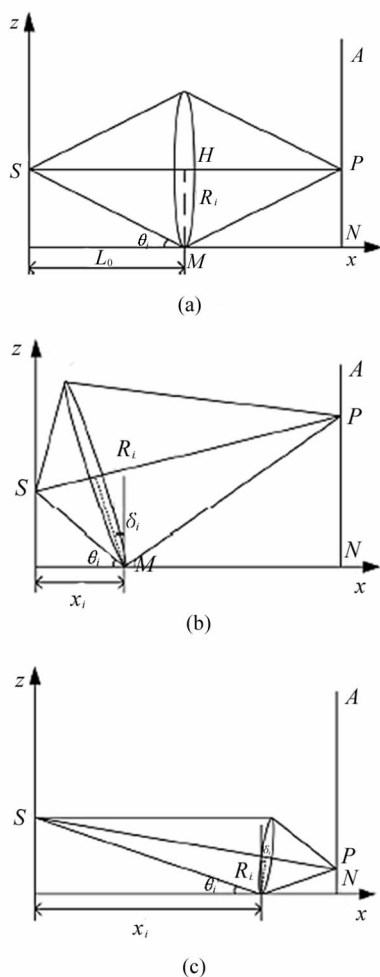


图 2 微圆柱在不同位置时光线汇聚情况:

- (a) 微圆柱在光路中间位置;
- (b) 微圆柱靠近光源侧;
- (c) 微圆柱靠近接收器侧

Fig. 2 The formation of focusing with the tiny ring in different positions:

- (a) The tiny ring at the center of the light path;
- (b) The tiny ring near the source;
- (c) The tiny ring near the receiver

接下来对该光谱仪结构的各参量关系进行量化分析。晶体面光路几何关系如图 3 所示, 光源 S 与

接收器 AN 之间的水平距离为 $2L_0$, 中心圆所在位置 $X_0 = L_0$, $HM = R_0$ 表示中心圆的半径。任意两个相邻圆之间的 x 坐标关系为:

$$x_i = x_{i-1} + w, \quad (2)$$

式中, w 定义为一微小的长度。在确定了中心圆半径 R_0 以及任意圆坐标 x_i 后, 即可根据图 3 中几何关系确定任意一个圆的布拉格角 θ_i 及其对应的倾斜角 δ_i 表达式为:

$$\theta_i = \arctan \frac{R_0}{x_i}, \quad (3)$$

$$\delta_i = \arctan \left[\frac{R_0 - (L_0 - w) \tan \theta_i}{2L_0} \right]. \quad (4)$$

根据倾斜角 δ_i 及布拉格角 θ_i 可在直角三角形 CSF 中得到坐标 x_i 处的圆半径为:

$$R_i = R_0 \frac{\sin(\theta_i - \delta_i)}{\sin \theta_i}. \quad (5)$$

其他圆的位置及布拉格角、倾斜角等参数皆可通过以上几何关系迭代获得。这些圆对应衍射的 X 射线能量可以通过式(1)获得。

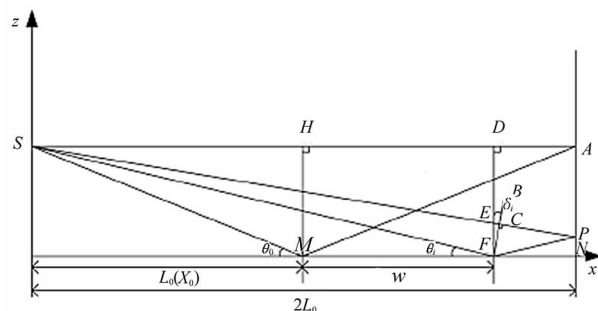


图 3 晶体面光路几何关系

Fig. 3 The geometrical relation of the optical path of the crystal

3 基于连续锥面晶体衍射的光谱检测实验

3.1 晶体几何参数设计

文中所提及的实验参数主要取决于晶体材料的选择以及待诊断 X 射线能谱范围。为了验证上述光路结构的光谱诊断效果, 必须设计一个符合上述几何关系的连续锥面晶体。首先考虑晶体材料的选择及其几何形状能够检测的能谱范围。制作晶体分析器首先需要加工出晶体的衬底, 所需表面的不规则性增加了加工的难度, 为保证晶体面型精度能够达到微米量级, 本研究小组利用机械加工手段, 借助于高精度机床制造出不锈钢衬底, 然后在特定温度和湿度条件下粘贴所需的晶体薄片。实验计划针对 Ti

的 K_α 射线与 K_β 射线进行检测,其能量在 4.75 keV 附近,由于多锥晶体弯曲加工难度高,而石英晶体有很好的弯曲性能,因此最终选用 α -石英(2020)作为衍射晶体,其晶格常数 $2d=0.4256$ nm。为了减少诊断过程中能量在空气中的衰减,应使光源与接收器之间的距离尽可能小,这种对于距离的限制既保证了实验过程中光子的接收效率又兼顾了光谱仪结构的紧凑性。本实验中光源与接收器之间的距离为 $2L_0=283.4$ mm。接收器检测面与光源关于晶体中心面对称分布。包含的布拉格角最小为 34.31° ,最大为 41.99° ,对应的X射线能谱范围为 4.355—5.169 keV。如果需要探测更宽的光谱范围,可以通过增加晶体的几何长度来实现。

3.2 多能点X射线光谱仪改变接收器位置实验

在 Ti 靶 X 射线管装置上进行基于多锥晶体的 X 射线线谱诊断实验。使用耦合针状 CsI 闪烁体的大面阵 CMOS 相机作为 X 射线光谱检测器件。首先对光路进行等高校准以及中心校准。利用激光水平仪进行等高校准,使 X 射线源中心、晶体中心、射线在检测面中心的汇聚线三者等高。然后将激光点源设置于检测面中心,对晶体进行方位校准,确保光线经曲面晶体反射后能够精确到达 X 射线源发射中心。再打开 X 射线源进入正常工作状态,利用 CMOS 检测器对晶体衍射的 X 射线进行接收检测,实验中的 X 射线管电压参数为 20 kV,电流参数为 25 mA,光源辐照时间设为 10 s。实验装置布置如图 4 所示。

为充分检验晶体对 X 射线的聚焦特性以及光谱分辨能力,实验在保持光源和晶体位置不变的前提下,通过改变 CMOS 检测器位置进行了多次成像实验。图 5 是检测器在不同位置检测到的 X 射线束聚焦情况。图 5(a)—5(g)依次是 CMOS 检测器位于 -40 mm、-20 mm、中点位置、+20 mm、+40 mm、+60 mm、+80 mm 处观察到的成像图(中心位置指使 CMOS 检测器位于理论设计位置。“+”代表 CMOS 偏离中心位置移动而远离光源,“-”代表 CMOS 靠近光源)。图中上下两个亮斑分别是 Ti 的 K_β 射线与 K_α 射线聚焦形成的光斑。需要说明的是,图 5 中各图竖直白色亮线是 CMOS 检测器自身的因素造成,没有 X 射线信号输入时也会出现。经直观的观察比较,不难发现随着 CMOS 位置相对于中心位置的不断偏离,光谱仪对 X 射线的聚焦能力逐渐减弱,这主要体现在光斑在水平方向上的宽度变大,形状扁平即晶体的汇聚效果变差。

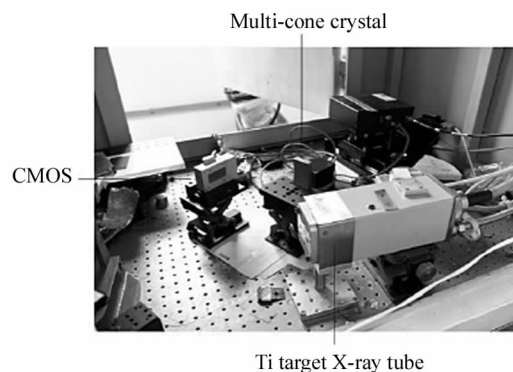


图 4 实验装置布置图

Fig. 4 The schematic diagram experimental device

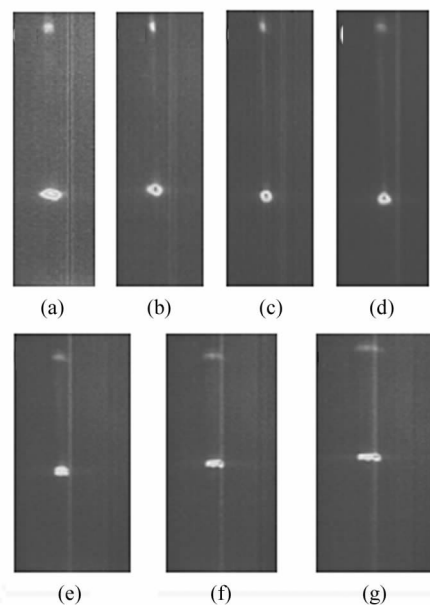


图 5 CMOS 在 (a) -40 mm, (b) -20 mm, (c) 中心位置, (d) +20 mm, (e) +40 mm, (f) +60 mm, (g) +80 mm 检测到的像

Fig. 5 The images detected by CMOS at (a) -40 mm, (b) -20 mm, (c) the center, (d) +20 mm, (e) +40 mm, (f) +60 mm, and (g) +80 mm

4 光谱检测实验结果分析

由于图 5 中显示当 CMOS 于中心位置及偏离中心位置 +20 mm 时的聚焦效果较好,因此以此图像对探测实验结果进行进一步的数据分析,利用 Win-View 软件对图 5 中光斑进行处理,得到沿垂直于光谱分布方向的谱线强度变化如图 6 所示。

图 6 中 x 轴代表位置, y 轴代表谱线强度。聚焦谱线的峰值半高宽可以表征晶体对于 X 射线的聚焦能力。图中右边的小尖峰是上文提到的由于 CMOS 自带亮线产生的强度峰。通过改变 CMOS 位置进行 7 次实验,对聚焦谱线强度的峰值半高宽进行测算,可得到 7 组关于 CMOS 位置与光谱仪聚焦谱线峰值

半高宽的数据如图7所示。对七组数据进行拟合得到图7中蓝色的曲线,可更加直观地反映光谱仪聚焦能力, x 轴代表检测器位置, y 轴代表该位置下的峰值半高宽,当晶体处于光源中点时X射线光谱仪达到最佳聚焦效果,此时聚焦谱线宽度尺寸为 $525\text{ }\mu\text{m}$ 。随着CMOS位置相对于理想成像位置的偏离,聚焦效果逐渐变差,但仍然具有很强的聚焦效果。

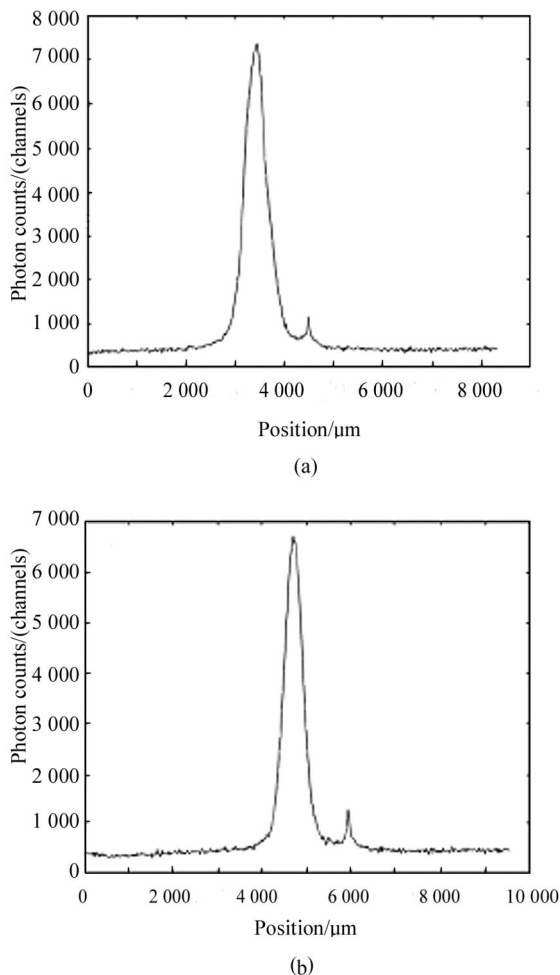


图6 沿垂直光谱分布方向强度分布:
(a) CMOS在+20 mm处谱线沿垂直光谱分布方向的强度变化;(b) CMOS在设计位置时谱线沿垂直光谱分布方向强度变化
Fig. 6 The change of intensity in the vertical spectral distribution direction: (a) The change of the intensity with CMOS at +20 mm; (b) The change of intensity with CMOS at the center

利用WinView软件对偏离中心位置+20 mm以及中心位置时的光斑进行处理,得到谱线沿光谱分布方向的强度随波长分布图,如图8所示。

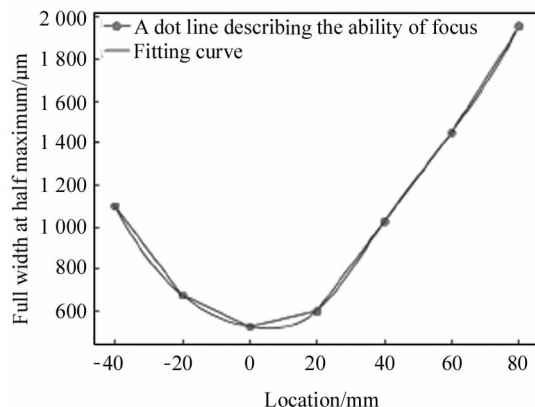


图7 CMOS位置与光谱仪聚焦能力关系
Fig. 7 The relationship between CMOS position and the detector's focus ability

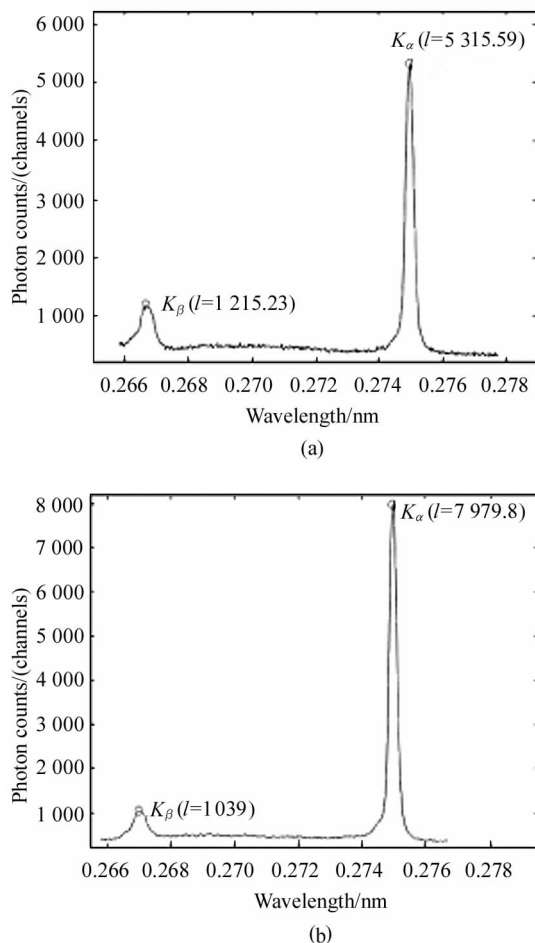


图8 谱线强度随波长分布:
(a) CMOS在+20 mm处的波长强度分布;
(b) CMOS在中心位置的波长强度分布
Fig. 8 The relationship between spectral intensity and wavelength: (a) The intensity distribution with CMOS at +20 mm; (b) The intensity distribution with CMOS in center

由于本次实验检测的是Ti的 K_α 及 K_β 特征谱线,没有连续谱,因此这里针对该2处能点进行分析。在CMOS检测器上能谱分布方向以计数的方式确定光斑的大小,可得到 K_α 谱线的半高宽。已知Ti的 K_α 能量为4511 eV, K_β 能量为4932 eV,经此可推算出其光谱分辨力 $\lambda/\Delta\lambda$ 。将七组实验数据拟合得到CMOS位置与X射线诊断器光谱仪分辨力的关系曲线如图9所示。

光谱仪的光谱分辨力在CMOS位于中心位置时达到最高值最约615,主要是由于实验使用的Ti靶X射线源尺寸较大(8 mm×1 mm),这限制了本晶体光谱仪的光谱分辨能力,如果在大型聚变装置(光源尺寸约200 μm)或微焦点X射线源(光源尺寸20 μm 以下)设备上进行检测实验,多锥晶体光谱仪的光谱分辨力能够得到显著提升。

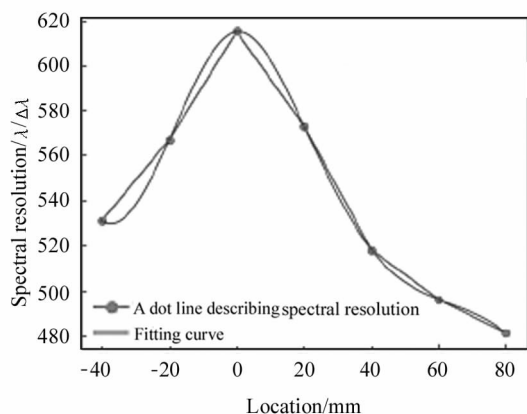


图9 CMOS位置与光谱仪分辨力关系

Fig. 9 The relationship between the CMOS position and the detector's spectral resolution

5 结 论

本文研究的多锥晶体X射线光谱仪具有宽光谱范围、高光谱分辨力、强聚焦能力等优势,且具备平焦场特性。光谱仪结构优化、空间利用率高,适用于多种诊断设备同时工作。多能点X射线光谱仪的能谱检测范围达4.51—5.14 keV甚至更宽,且在较大光源尺寸条件下仍能保证光谱分辨力达到615,可兼顾宽能谱范围与高分辨能力,解决了目前本研究领域中晶体光谱仪宽能谱范围与分辨能力间的取舍问题。当CMOS处于理论设计位置时本多锥晶体光谱仪的光谱聚焦能力和谱分辨力达到最佳,此时 K_α 聚焦谱线宽度尺寸为525 μm ,聚焦能力显著增强,能够满足激光惯性约束聚变过程对X射线晶体光谱仪强聚焦能力的要求。

参考文献:

- [1] KIM J H, YOU S J, SEONG D J, et al. Electron temperature measurements in plasmas with surface wave absorption and wave cutoff frequency[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(20): 201502.
- [2] SHANG W L, YANG J M, ZHANG W H, et al. Experimental demonstration of laser to X-ray conversion enhancements with low density gold targets[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(6): 064102.
- [3] HILL K W, BITTER M, DELGADO-APARICIO L, et al. Characterization of spatially resolved high resolution X-ray spectrometers for high energy density physics and light source experiments[J]. The Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11): 11D612.
- [4] SHI J, LIU F, YANG Z H, et al. X-ray backlighting imaging diagnosis by spherically bent crystal analyzer[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2017, 28(3): 238-242.
施军, 刘锋, 杨祖华, 等. 用于等离子体诊断的新型X射线谱仪[J]. 光电子·激光, 2017, 28(3): 238-242.
- [5] STOECKL C, BEDZYK M, BRENT G, et al. Soft X-ray backlighting of cryogenic implosions using a narrowband crystal imaging system [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85: 11E501.
- [6] KIRSANOV D, PANCHUK V, GOYVDENKO A, et al. Improving precision of X-ray fluorescence analysis of lanthanide mixtures using partial least squares regression [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2015, 113: 126-131.
- [7] LINDL J, LANDEN O, EDWARDS J, et al. Review of the National Ignition Campaign [J]. Phys. Plasmas, 2014, 21(2): 020501.
- [8] HURRICANE O A, CALLAHAN D A, CASEY D T, et al. Inertially confined fusion plasmas dominated by alpha-particle self-heating [J]. Nature Phys, 2016, 12(8): 800-807.
- [9] ABRAHAM B, NOWAK S, WENINGER C, et al. A high-throughput energy-dispersive tender X-ray spectrometer for shot-to-shot sulfur measurements[J]. Synchrotron Rad, 2019, 26(3): 629-634.
- [10] SZLACHETKO J, NACHTEGAAL M, BONI E D, et al. X-ray spectrometer based on a segmented-type diffraction crystal for single-shot X-ray emission spectroscopy and time-resolved resonant inelastic X-ray scattering studies [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(10):

103105.

- [11] SZLACHETKO J, DOUSSE J C I, HOSZOWSKA J, et al. High-resolution study of x-ray resonant Raman scattering at the K edge of silicon[J]. Physical Review letters, 2006, 97(7): 073001.
- [12] ANDIEL U, EIDMANN K, PISANI F, et al. Conical x-ray crystal spectrometer for time integrated and time resolved measurements[J]. Review of Scientific Instruments 2003, 74(4): 2369-2374.
- [13] HALL T A. A focusing X-ray crystal spectrograph [J]. Review of Scientific Instruments, 1984, 17, 110-112.
- [14] KOHEL M, KOUICHI H, KAZO N. One-shot spectrometer for several elements using an integrated conical crystal analyzer[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(1): 013112.
- [15] KAZUO N, KOZO F, WUGEN P, et al. Shaped silicon-crystal wafers obtained by plastic deformation and their application to silicon-crystal lenses[J]. Nature Materials, 2005, 4(1): 47-50.
- [16] ROBLEDO J, CARLOS A, SANCHEZ HECTOR J. A compact high-resolution spectrometer based on a segmented conical crystal analyzer[J]. The Review of Scientific Instruments, 2020, 91(4): 0431052.

作者简介:

黎 森 (1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事半导体高能辐射探测技术、高分辨率高能辐射诊断技术、半导体核电子学、低秩诊断影像重构及校正技术等方面的研究。