

引用格式: SHI Jun, LI Miao, LUO Lin-dong-ying, *et al.* An X-ray Detection Technology with Multi-curvature Bent Crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3): 0322001

施军, 黎森, 骆琳冬瑛, 等. 一种变曲率面晶体 X 射线检测技术[J]. 光子学报, 2020, 49(3): 0322001

一种变曲率面晶体 X 射线检测技术

施军¹, 黎森², 骆琳冬瑛¹, 王峰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:在惯性约束聚变光谱诊断物理实验研究中, 晶体衍射后 X 射线光谱信号较弱, 需要高收光效率及宽频谱范围的光谱诊断仪器. 在传统锥面弯曲晶体基础上提出变曲率弯晶多能点成像技术, 该技术具有宽频谱范围、强聚焦能力、高光谱分辨的特点. 在晶体衍射成像结构设计中, 由于能够确保成像光线的旋转对称性, 因此在原理上可消除传统弯晶 X 射线衍射成像像差. 利用研制的变曲率面石英晶体对钛靶 X 射线源进行 X 射线聚焦检测, 并与同种材料的平面晶体进行收光效率对比, 实验结果表明该变曲率面石英晶体的收光效率可以达到平面石英晶体的 100 倍, 检测 X 射线能量范围为 4.51~5.14 keV. 该晶体谱仪结合 X 射线条纹相机能够检测宽频谱范围的微弱 X 射线信号, 条纹相机探测面可与晶体检测光路方向垂直布局.

关键词:惯性约束聚变; X 射线; 变曲率面晶体; 聚焦; α 石英; 光谱仪

中图分类号: O536

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204903.0322001

An X-ray Detection Technology with Multi-curvature Bent Crystal

SHI Jun¹, LI Miao², LUO Lin-dong-ying¹, WANG Feng³, YANG Guo-hong³, WEI Min-xi³

(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: In the spectrum diagnostic physics experiment of inertial confinement fusion, the spectral signal is weak due to the X-ray diffraction efficiency with crystal. So a spectral diagnostic instrument with high light collection efficiency and wide spectral range is urgently needed. A multi-curvature bent crystal multi-energy point imaging technique is proposed based on traditional conical crystal structure. It has the characteristics of wide spectral range, strong focusing ability and high spectral resolution. At the same time, it can eliminate imaging aberration in principle due to the rotational symmetry of imaging light. The measuring spectra experiment of multi-curvature bent α -quartz crystal is conducted at a Ti X-ray tube device and the same experiment with plane α -quartz crystal is done to demonstrate the strong focusing ability. The result shows that the intensity of multi-curvature bent α -quartz crystal is 100 times than that of plane crystal, and the energy range of detected X-ray is 4.51~5.14 keV. This device combined with a streak camera at a vertical direction could be used to collect weak X-ray with wide spectral range.

基金项目:国家自然科学基金 (No.61604028), 重庆市留学创新基金项目 (No.cx2018023), 等离子体物理重点实验室基金项目 (No.6142A04180207)

第一作者:施军(1972-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为高温等离子体光谱及成像诊断. Email: shijun@cqu.edu.cn

收稿日期:2019-10-11; **录用日期:**2020-01-02

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Inertial confinement fusion; X-ray; Multi-curvature bent crystal; Focusing; α -quartz; Spectrometer

OCIS Codes: 220.4830; 340.7440; 340.7460; 340.7480

0 引言

在激光惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)实验和 X 射线激光实验中,等离子体聚爆靶成像及 X 射线能谱检测具有非常重要的诊断意义^[1-3].由于 X 射线衍射晶体的晶面间距与 X 射线的波长同数量级,故常采用 X 射线衍射晶体作为 X 射线诊断的分光元件.近年来,在 ICF 实验中需要检测微弱 X 射线信号并进行聚焦成像诊断,因此 X 射线晶体谱仪已经从前期的平面晶体结构发展到现在通用的弯曲晶体结构.

弯晶谱仪主要特点是采用特殊工艺将晶体衍射面弯曲成光滑的柱面或球面,其衍射 X 射线的强度比平面晶体谱仪要高若干倍.常用的聚光型弯晶谱仪有三种,即 Johann 型、Johansson 型与 V. Hamos 型^[4-5]. Johann 型弯晶谱仪是将晶体的衍射面弯曲成曲率半径为 R 的圆柱面,弯晶与半径为 $R/2$ 的罗兰圆相切,光源位于罗兰圆上, X 射线被弯晶衍射后聚焦在罗兰圆上.其优点是结构简单、分辨率高、亮度高,缺点是成像结果有几何像差. Johansson 型弯晶谱仪是 Johann 型的改进型,曲率半径为 R 的弯晶进行研磨后能够与半径为 $R/2$ 的罗兰圆相吻合;相对于 Johann 型弯晶谱仪,它消除了几何像差.在 V. Hamos 型弯晶谱仪中,将晶体的衍射面弯曲成圆柱面, X 射线源和探测器位于圆柱的轴上,相同波长的 X 射线经弯曲晶体衍射后都聚焦到一点^[6].不过在大型聚变装置上进行诊断物理实验时,探测器位于圆柱的轴上不利于耦合 X 射线条纹相机.故本文研究变曲率面晶体 X 射线检测技术,该检测方式具有宽频谱范围、强聚焦能力、高光谱分辨的特点,同时探测器表面可与晶体光路中心轴线垂直.

1 宽频谱弯曲晶体谱仪

1.1 圆柱与圆锥面晶体谱仪

聚变诊断实验通常需要在靶丸烧蚀区或燃烧区掺示踪材料,依据其 X 射线光谱特征对等离子体关键参量进行诊断,通常希望示踪材料含量尽可能少,同时能检测的 X 射线能谱范围尽可能宽,这样就需要宽能谱范围及高集光效率的 X 射线诊断仪器.由于 V. Hamos 型弯晶谱仪可以将多个能点的 X 射线光谱聚焦在中心轴线上,能带宽度随晶体长度增加而增大,同时投射到柱面上的所有谱线都能够被聚焦,谱线收集效率很高^[7-8],因此该结构在高温等离子体诊断中得到比较广泛的研究.不过在激光等离子体 X 射线光谱探测实验中, V. Hamos 型结构并不适用于耦合条纹相机的时间分辨诊断实验.原因在于条纹相机尺寸较大,为避免阻挡激光束和与其他诊断设备之间发生空间干扰,实验要求探测平面垂直于圆柱中心轴布置.虽然 V. Hamos 结构中垂直放置探测器也能够获取光谱并且易于操作调节,但是该情况下的光谱只在圆柱中心轴上的一点完全聚焦,而在垂直方向上远离对称轴位置的光谱则表现为同心的圆弧状,且在空间方向上展宽,导致光谱空间分辨下降,同时谱线亮度降低^[9].

针对上述问题, HALL T 在 V. Hamos 型结构的基础上,提出了圆锥聚焦结构,在垂直于对称轴方向获取空间聚焦的光谱图像^[10].如图 1 所示,晶体表面为圆锥面的一部分,衍射分光发生在圆锥面弯晶母线方向,而圆锥曲面只将光束聚焦到过圆锥顶点的轴上.探测器平面过圆锥顶点并垂直于母线,平行于 $y-z$ 平面.圆锥谱仪可以视为局部偏轴的圆柱谱仪,越靠近成像面其圆柱半径越小.

对于圆锥谱仪结构而言,由于偏轴圆柱的半径与圆锥局部半径并不相等,因此对于离轴 X 射线,近轴近似会导致两个问题:球差的存在展宽了像的横向尺寸,影响空间聚焦性能;相同波长的 X 射线在成像面上存在散焦现象,影响光谱分辨.所以对给定的光谱范围,只有晶体宽度有限时,该近似导致的影响

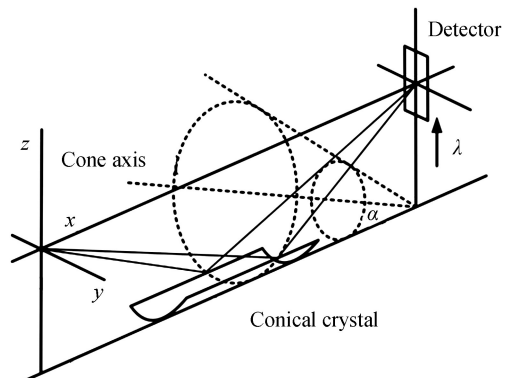


图 1 圆锥晶体光谱仪成像结构

Fig.1 Imaging structure of conical crystal spectrograph

才会比较小.

1.2 变曲面晶体检测原理

虽然 T. Hall 锥面结构能够减小成像误差,不过由于其参与成像的射线在理论上不具有旋转对称性,因此仍然不是无像差的完美成像.为了消除传统锥面晶体谱仪存在的像差缺陷^[11-14],提出变曲面晶体谱仪结构,其原理分析如图 2 所示.在图 2(a)中, O 点为坐标原点,光源 S 点位于 z 轴, N 、 A 位于与 z 轴平行的检测面上,点 M 为源与检测面距离 ON 的中点.射线由 S 点发出,在 M 点反射,反射线与 NA 交于 B 点, $SR = RB$,则 RM 垂直于中心光轴 SB ,入射光线 SM 与反射面的夹角为布拉格角 θ ,将曲线 SMB 绕轴线 SB 旋转一周可得到两个对称的锥面.如果把以点 R 为圆心, RM 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 B 点,即所有参与成像的射线在理论上都具有旋转对称性.

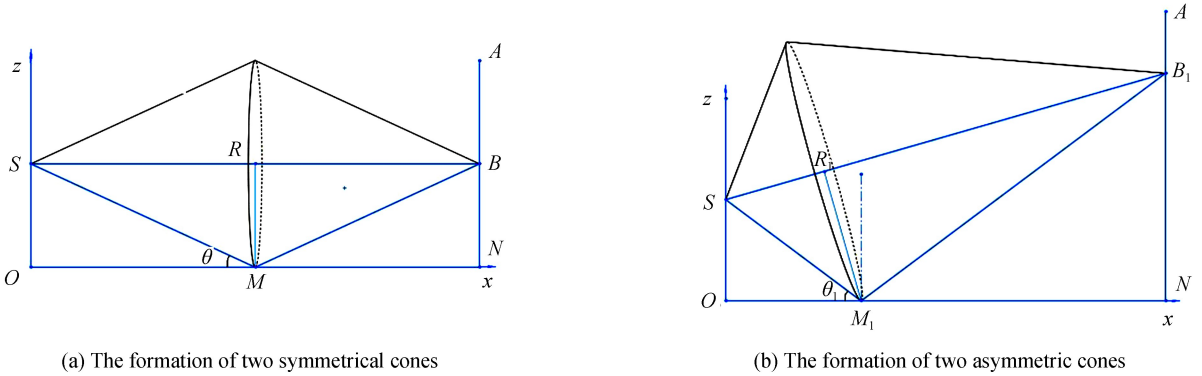


图 2 两个锥面的形成
Fig.2 The formation of two cones

如果保持光源 S 和检测器 NA 位置不变,当反射点 M_1 在中点 M 左侧时(见图 2(b)),入射光线与反射面的夹角为 θ_1 ($\theta_1 > \theta$),反射线与 NA 交于 B_1 点,曲线 SM_1B_1 绕轴线 SB_1 旋转一周可得到两个非对称锥面.把以点 R_1 为圆心, R_1M_1 为半径的圆看成有微小高度的圆锥,则所有 S 点源发射至该微圆锥内表面的光线均汇聚于 B_1 点,这些射线同样具有旋转对称性.

当反射点 M_2 在中点 M 右侧时,同样存在微圆锥及汇聚点 B_2 .总体来说就有无数个微圆锥面形成变曲面,变曲率面的内表面就是设计需要的晶体反射面,相应地也有无数个汇聚点都位于直线 NA 上,这样就可以实现将点源发散的光线经变曲面晶体衍射后聚焦于与晶体表面垂直的平面上.

1.3 晶体面形误差影响分析

理想情况下,在变曲面晶体表面,由光源 S 发出的光,入射角相同的光线将汇聚于同一点.其中一条光线的光路示意图如图 3 所示,圆弧曲线系列表示反射曲面,折线表示由光源发射的其中一条光线入射至曲面

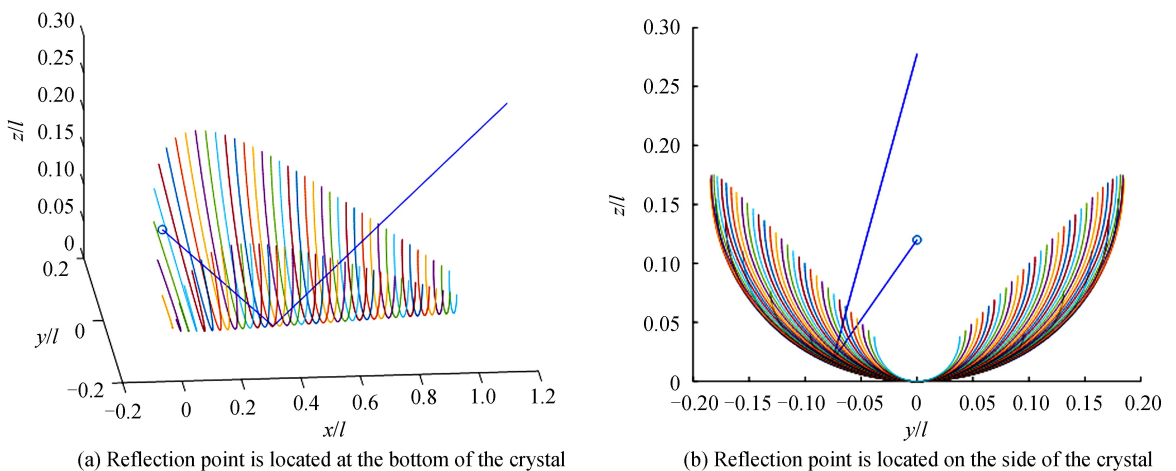


图 3 X 射线在变曲面晶体表面反射示意图
Fig.3 Reflection of an X-ray from the multi-curvature bent crystal surface

后再反射的情形,折线端部的小圆圈表示光源. l 为光源至检测器的距离, x/l 、 y/l 、 z/l 分别是 x 、 y 、 z 坐标值与 l 的比值.

不过在实际加工过程中,由于加工制造方面引入的偏差,实际得到的曲面不可能是理想曲面,变曲率面会有面形误差.在图 4 中在 xoz 平面上进行分析, Q 点为 x 轴上理论反射点位置,而实际反射点假定在理论位置 Q 点偏下的 Q' 位置,入射点 Q 位置沿 z 轴负方向偏移 Δz ,光路会由原来的折线 SQI 变为 $SQ'I'$,此时接收屏上的 I 点偏移至 I' 点,且 $II' = Q'P = 2\Delta z$,即 I 点偏移量为 $2\Delta z$.

当光线不在 xoz 平面时,由于旋转对称性,在微圆柱表面所有反射的光线都满足图 5(a)中的几何关系.此时全部反射光线形成一个以 SI 为轴线, $Q'I'$ 为母线的圆锥面,如图 5(b)所示,全部汇聚点在检测面会形成一个椭圆,该椭圆为圆锥面与检测接收面的交线.

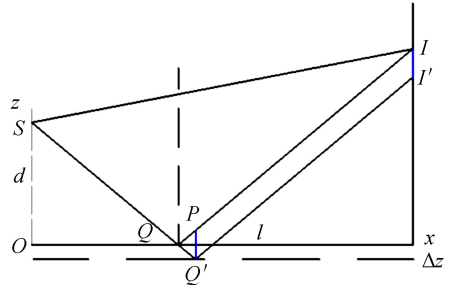


图 4 反射点偏差 Δz 情况下的 xoz 平面光路
Fig.4 X-ray path in xoz plane with the reflection point offset of Δz

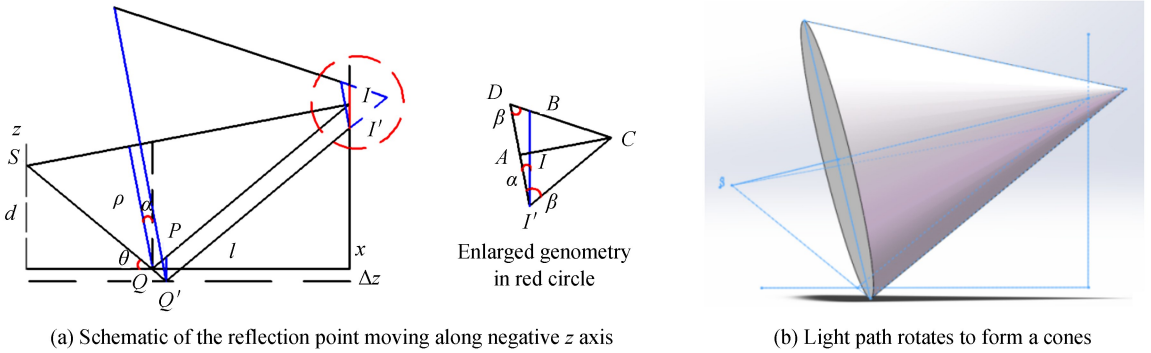


图 5 反射点沿负 z 轴移动示意图

Fig.5 Schematic of the reflection point moving along negative z axis

在图 5(a)中,椭圆的长轴为图中的 BI' , d 为光源点至 x 轴距离,光源与检测面在 x 轴方向距离为 l ,与入射点在 x 轴方向距离为 x .由图 5(a)中几何关系可推导

$$\alpha = \arctan \frac{d}{\frac{1}{x} - \frac{2}{l}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \theta + \alpha \quad (2)$$

因此在等腰三角形 $\triangle DCI'$ 中,底边

$$DI' = 2AI' = 4\Delta z \cos \alpha \quad (3)$$

$$\frac{BI'}{\sin \beta} = \frac{DI'}{\sin (\pi - \alpha - \beta)} \quad (4)$$

故可以得到

$$BI' = 4\Delta z \frac{\cos \alpha \sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)} \quad (5)$$

由圆锥斜截面几何性质可知,斜截面为椭圆时,该截面在圆锥底面的投影为圆,故椭圆短轴长为该截面在底面投影的直径,能够得到椭圆短轴长为

$$BI' \cos \alpha = 4\Delta z \frac{\cos^2 \alpha \sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)} \quad (6)$$

分析可知,当曲面沿半径方向下移 Δz 时,将不再能得到汇聚点 I ,取而代之的是一个椭圆,且最大 y 方向偏差为

$$\delta_{\pm y} = \pm 2\Delta z \frac{\cos^2 \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (7)$$

最大 z 负方向偏差为 $\delta_{-z} = 2\Delta z$, 最大 z 正方向偏差为

$$\delta_z = 4\Delta z \frac{\cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} - 2\Delta z \quad (8)$$

2 变曲率面晶体 X 射线检测实验与结果

制作晶体分析器首先需要加工出晶体衬底,其材料可以采用金属或玻璃,由于变曲率表面并非规则面形,要保证高精度的面形加工难度很高,难以达到通用面形的精度,如常用的圆柱面或球面,因此这里采用玻璃材料,以确保面形精度在微米量级.先利用机械加工手段制造出玻璃衬底,然后在一定温度及湿度环境下粘贴上需要的晶体薄片.实验计划针对 Ti 的 K_α 射线进行检测,其能量在 4 750 eV 附近.由于 α 石英晶体相对其他晶体材料具有更佳的弯曲性能,故选用 α 石英(1 011)作为衍射晶片,其晶格常数 $2d = 0.6687$ nm.变曲率面晶体在检测能谱方向的长度设定为 44 mm,包含的布拉格角范围为 $21.15^\circ \sim 24.28^\circ$,对应的 X 射线能量范围为 4.51~5.14 keV,相对于其他如球面、超环面等,其检测 X 射线范围明显宽得多.如果变曲率面晶体在能谱方向的长度尺寸继续增加,则检测 X 射线的范围也会相应增加.探测实验将证实研制的变曲率面晶体既可以检测 X 射线管发射的 K_α 与 K_β 光谱,也可以探测大型装置 Ti 平面靶产生的类 H 及类 He 光谱.

探测实验首先在中国工程物理研究院激光聚变研究中心的 Ti 靶 X 射线管装置上进行,按照图 6 布置器件初始位置.使用耦合针状 CsI(Tl) 闪烁体的大面阵 CMOS 相机作为 X 射线光谱检测器件^[15].CMOS 检测面与图 6 中纸面垂直,其中心与晶体中心在 x 轴方向的距离 290 mm.光源点与晶体的距离也为 290 mm,检测面与光源点关于晶体中心面对称布置.利用激光水平仪调整光路,确保光源点、晶体中心、激光在晶体面反射后在成像板(Image Plate, IP)上的汇聚线三者等高.然后打开 Ti 靶 X 射线管,利用 X 射线 IP 板显示屏观察出射光斑.出射光斑为标准圆形时,光源位于过该圆心的光轴上.微调晶体方位,使晶体中心与光斑圆心重合,然后利用 CMOS 相机对曲面晶体衍射 X 射线进行接收检测,X 射线辐照累计时间为 10 s,得到的聚焦谱图见图 7(a).观察图中所示光斑,CMOS 相机获得的聚焦光谱图亮度极高,有显著聚焦效果, K_α 与 K_β 光谱均接近一圆点,实验成像效果与理论分析完全符合.

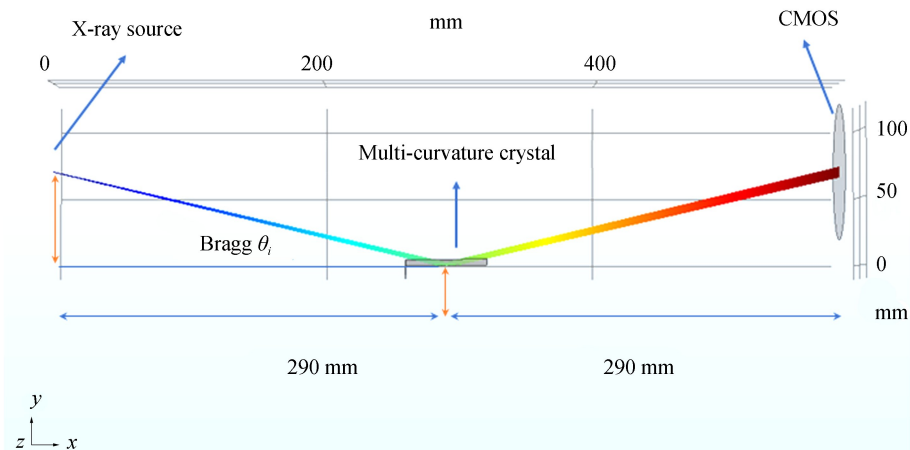


图 6 光源、晶体及检测器布置示意图

Fig.6 Schematic of the source, bent crystal and detector

变曲率面晶体一个最重要的作用是其聚焦能力,因此采用同种材料的平面晶体与之进行对比检测实验,检测光路不另行调整,只需要把变曲率面石英晶体替换成平面石英晶体即可.X 射线辐照累计时间同样为 10 s,平面石英晶体衍射得到的光谱见图 7(b),由于平面晶体没有聚焦功能,故该光谱图近似为一条直线.另外图 7(a)、(b)的中间均有一条竖直的亮线,这是 CMOS 相机自身具有的特性,没有 X 射线输入时也有此现象.

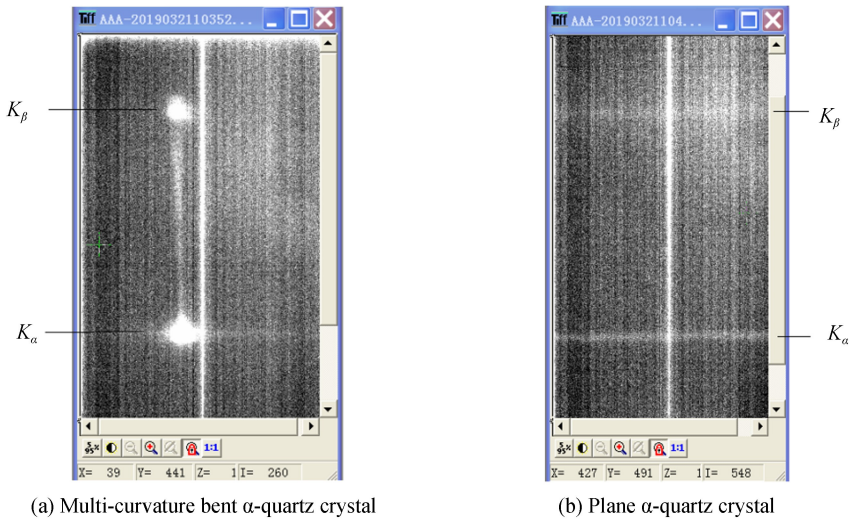


图7 CMOS相机获取的X射线谱图
Fig.7 X-ray spectrum obtained by CMOS camera

对图7光谱探测结果进行数据分析,可得到图8所示光谱强度分布.图8(a)、(b)分别对应变曲率晶体和平面晶体获取的谱线检测结果,谱线强度最高分别为8180与390,扣除本底强度后,其实际强度分别为6280与40,因此变曲率晶体X射线衍射聚焦强度是平面晶体聚焦强度的157倍.从谱线图像对比容易看出,变曲率石英晶体得到的光谱分布相比于平面晶体更平滑,其信噪比也更佳,适合于后续诊断研究工作的分析处理.但是图8(b)谱线图像的信噪比较差,这种高本地噪声的数据可信度并不高,因此聚光效果的量化数据还需要进一步实验验证.

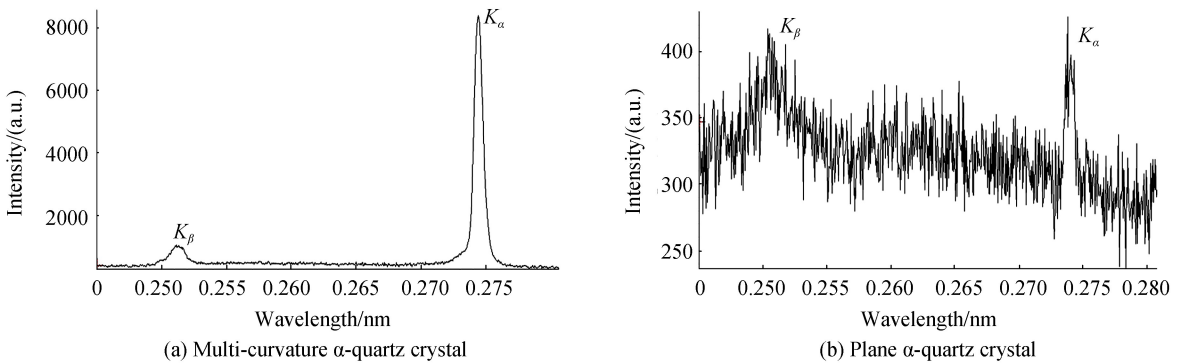


图8 光谱强度分布
Fig.8 Distribution of spectral intensity

谱线光谱分辨力是测谱分析中非常重要的指标.Ti的 K_α 能量为4.511 keV, K_β 能量为4.932 keV,能谱差别为421 eV.图8(a)中可以测算 K_α 谱线半高宽约为13.6 eV,故其光谱分辨($\lambda/\Delta\lambda$)约331,变曲率晶体和平面晶体获取的光谱分辨几乎一致.该数据相对于其他晶体没有明显优势,主要原因是本次实验所用Ti靶X射线源尺寸较大(长约10 mm),过大的X射线源尺寸限制了晶体谱仪光谱分辨力.

在神光装置上进行了Ti平面靶的X射线探测实验,采用相同光路结构的变曲率石英晶体与平面石英晶体同时衍射Ti平面靶辐射的光谱,利用IP板接收光谱信号.图9(a)、(b)分别为变曲率面晶体与平面晶体在同一发次中获取的光谱结果,实验过程中确保二者打靶的条件、IP板扫描时间完全一致.直接对照观察图9与图7能够发现,图9的信噪比显著增加.

图9(a)的类He光谱经过扫描确认,其强度已经达到饱和,即由于强度超过检测上限而不能得到准确数据,因此只针对类H光谱进行分析,分析方法和对图7的处理方式一致.变曲率面石英晶体得到的类H谱线最高强度为52400,本底强度约535,平面晶体得到的类H谱线最高强度为572,本底强度约129,两谱线强度分别减去本底后为51865与443,变曲率面石英晶体得到光谱的强度约为平面晶体强度的110倍.实验结

果表明变曲率石英晶体相对于平面石英晶体得到的谱线有两个数量级的强度优势。

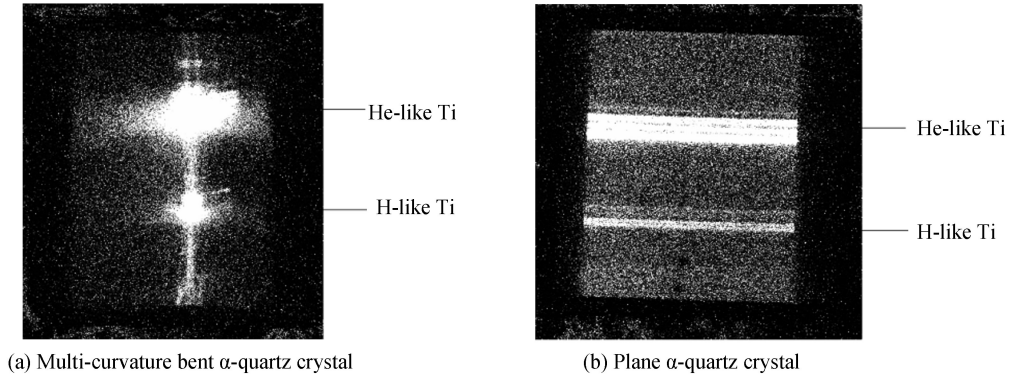


图9 成像板记录的 Ti 靶光谱图
Fig.9 Image of image plate recording Ti target shot

基于同样的光谱分析方法对图 9(a) 变曲率面晶体获取的光谱进行分析, Ti 的 He_e 光谱能量约为 4.750 keV, Ly_e 光谱能量约为 4.970 keV, 能谱差别为 220 eV, 据此可以计算类 H 谱线半高宽约为 7.4 eV, 故其光谱分辨力为 671, 该数据相对于在 X 射线管装置上得到的光谱分辨有显著提升, 究其原因是 X 射线源尺寸变小, 实测聚爆靶光斑直径约 400 μm .

3 结论

本文研究的变曲率面 X 射线检测技术可以提高 X 射线晶体谱仪的收光效率、检测范围, 优化结构以便于更多诊断设备同时工作. 实验结果表明: 变曲率面石英晶体光谱仪的收光强度能够达到石英平面晶体的 100 倍, 光谱分辨力为 671, 检测 X 射线能量范围为 4.51~5.14 keV, 同时变曲率面晶体具有明显优于平面晶体的信噪比. 设计的变曲率面 X 射线衍射晶体谱仪能够为激光聚变诊断实验提供一种更优性能的光谱诊断仪器, 所研制的变曲率石英晶体能够满足大型聚变装置诊断要求.

参考文献

- [1] SHI Jun, XIAO Sha-li, WANG Hong-jian, *et al.* Measurement of polarization of X-ray with polarization spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 396-400.
施军, 肖沙里, 王洪建, 等. 用极化晶体谱仪探测 X 射线极化度[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 396-400.
- [2] WANG Hong-jian, XIAO Sha-li, SHI Jun, *et al.* Diagnosis of electron density by polarized X-ray lines for Al laser-produced plasmas[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1196-1200.
王洪建, 肖沙里, 施军, 等. 极化 X 光谱诊断铝激光等离子体的电子密度[J]. *光子学报*, 2011, **40**(8): 1196-1200.
- [3] WANG R R, AN H H, GUO E F, *et al.* Elliptically bent crystal X-ray spectrometer for time-resolved laser plasma experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, **89**: 093109.
- [4] PETRUNIN A A, SOVESTNOV A E, TYUNIS A V, *et al.* Johann crystal diffraction spectrometer for measuring small chemical shifts of soft X-ray lines[J]. *Technical Physics Letters*, 2009, **35**(1): 73-75.
- [5] SHEVELKO A P, KASYANOV Y S, YAKUSHEV O F, *et al.* Compact focusing von Hamos spectrometer for quantitative x-ray spectroscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, **73**(10): 3458-3463.
- [6] SHEVELKO A P, ANTONOV A A, GRIGORIEVA I G, *et al.* A focusing crystal von Hamos spectrometer for X-ray spectroscopy and X-ray fluorescence applications[C]. SPIE, 2000, **4144**: 148-154.
- [7] SHEVELKO A P, ANTONOV A A, GRIGORIEVA I G, *et al.* X-ray focusing crystal von hamos spectrometer with a CCD linear array as a detector[J]. *Advances in X-ray Analysis*, 2002, **45**: 433-440.
- [8] SHEVELKO A P. X-ray spectroscopy of laser-produced plasmas using a von Hamos spectrograph[C]. SPIE, 1998, **3406**: 91-108.
- [9] ZAMPONI F, KAMPFER T, MORAK A, *et al.* Characterization of a deep depletion, back-illuminated charge-coupled device in the X-ray range[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, **76**: 116101.
- [10] YUAN X H, CARROLL D C, COURY M, *et al.* Spatially resolved X-ray spectroscopy using a flat HOPG crystal[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011, **653**: 145-149.
- [11] HALL T A. A focusing x-ray crystal spectrograph[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1984, **17**: 110-112.
- [12] BITTER M, HILL K W, GAO L, *et al.* A multi-cone X-ray imaging Bragg crystal spectrometer[J]. *Review of*

- Scientific Instruments*, 2016, **87**: 11E333.
- [13] SHI J, BITTER M, HILL K W, *et al.* Investigation of multi-cone geometry imaging with laser lights[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, **88**: 123116.
- [14] 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.
- [15] WEI Min-xi, HOU Li-fei, YANG Guo-hong, *et al.* CMOS detector systems for soft X-ray imaging diagnosis[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**(12):122003.
- 韦敏习,侯立飞,杨国洪,等.用于软 X 射线图像诊断的 CMOS 探测系统[J].强激光与粒子束,2014,**26**(12):122003.