

文章编号 1004-924X(2017)05-1192-05

## 激光等离子体 X 射线能谱诊断

刘利锋<sup>1\*</sup>, 肖沙里<sup>2</sup>, 钱家渝<sup>2</sup>

(1. 山西大同大学 物理与电子科学学院, 山西 大同 037009;  
2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 为了诊断激光装置聚爆靶辐射等离子体内部的分布及运动过程, 搭建了基于球面弯曲晶体的能谱成像系统。该系统的核心元件为弯曲半径为 200 mm 的石英球面弯曲晶体(1011), 利用晶体的晶格结构进行反射, 利用弯曲表面实现聚焦。在中国工程物理研究院神光 III 原型激光装置上利用该能谱成像系统首次进行 X 射线能谱成像实验。IP 成像板得到了清晰的高 Z 元素 Au 等离子体 X 射线能谱。能谱信息分析显示, 石英球面弯曲晶体得到的能谱分辨率约为 1 380, 与能谱分辨模型理论值的误差为 3.9%。该结果表明石英球面弯曲晶体具有很好能谱分辨能力。

**关键词:** 光谱学; 球面弯曲晶体; X 射线成像; 能谱分辨

**中图分类号:** O433.1; TH744 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1192

## X-ray spectral diagnosis for laser plasma

LIU Li-feng<sup>1\*</sup>, XIAO Sha-li<sup>2</sup>, QIAN Jia-yu<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Electronics Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China;  
2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System,  
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

\* Corresponding author, E-mail: liulf1305@cqu.edu.cn

**Abstract:** In order to diagnose the inner distribution and movement process of pellet implosion target plasma for laser-driven Inertial Confinement Fusion (ICF) facility, an energy spectrum imaging system based on spherically bent crystal was built. The core element of the system was a spherically bent quartz crystal (1011) with bending radius of 200 mm, of which the lattice structure enabled reflection and the bent surface made focus. The energy spectrum imaging system was performed to first conduct X-ray energy spectrum imaging on SG III prototype laser equipment at the Chinese Academy of Engineering Physics (CAEP). Clear X-ray energy spectrum of the high Z element Au plasma was obtained on IP imaging plate. The analysis on the energy spectrum information shows that the energy resolution ratio gained from spherically bent quartz crystal is approximately 1 380, and the error is 3.9% compared with the theory value of energy spectrum resolution model. The result shows that spherically bent quartz crystal has good energy spectrum resolution capacity.

**Key words:** spectroscopy; spherically bent crystal; X-ray imaging; spectral resolution

收稿日期: 2017-01-13; 修订日期: 2017-02-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10976033)

## 1 引言

在激光约束聚变实验中,靶丸内爆过程中产生的等离子体辐射主要是 X 射线,其特征温度在 keV 量级。辐射 X 射线中有丰富的信息,如温度梯度、密度梯度、平均离化度和不透明度等状态参数<sup>[1-6]</sup>。为了得到等离子体的内部状态及其相互作用过程,需要对高温等离子体的状态参数进行诊断。常用的 X 射线能谱诊断方法主要有探针干涉法、汤姆逊散射法及 X 射线光谱法等。其中,探针干涉法需要 X 射线做探针,探针光子能量有限,适用于低温等离子体区域;X 射线光谱法主要有光栅分光和晶体分光两种方法,光栅分光衍射效率低,适用于测量亚 keV 的 X 射线<sup>[7]</sup>,而晶体分光法可以测量 keV 量级的 X 射线光谱。球面弯曲晶体具有衍射效率高、视场大和能谱分辨力强等优点,可得到等离子体能谱信息<sup>[8]</sup>,目前主要用于激光约束聚变内爆过程中等离子体内部状态、相互作用过程等研究中。

在国外,球面弯曲晶体成像已经应用于 X 射线能谱成像。Koch 等在 Nova 激光装置上利用石英球面晶体(2023)实现了 Ti 靶能谱成像,用于研究靶丸烧蚀<sup>[9-10]</sup>。Bitter 等在托卡马克装置上利用球面弯曲晶体得到了 Ar 的类 He 辐射 X 射线,用于测量靶丸内爆过程中电子的温度<sup>[11]</sup>。本文研制的球面弯曲晶体是弯曲半径为 200 mm 的石英晶体(1011),通过实验利用该晶体在中国工程物理研究院神光 III 原型激光装置上完成了高 Z 元素 Au 靶的等离子体 X 射线能谱成像。

## 2 基于球面晶体的 X 射线能谱分辨理论

### 2.1 球面弯曲晶体成像原理

球面弯曲晶体成像主要基于晶体布拉格衍射理论和“罗兰圆”结构,其原理如图 1 所示。晶体成像与其他离轴的成像类似,罗兰圆上任意点处的点光源辐射出的 X 射线被球面弯曲晶体反射后聚焦不对称,形成两个焦点,一个焦点  $F_m$  在罗兰圆面上(子午面),另一个焦点  $F_s$  垂直罗兰圆面(弧矢面)。球面弯曲晶体到子午面焦点  $F_m$  的距离为  $q_m$ ,到弧矢面焦点  $F_s$  的距离为  $q_s$ 。那么子午和弧

矢面的焦点分别满足<sup>[12]</sup>:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_m} = \frac{2}{R_m \sin \theta}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_s} = \frac{2 \sin \theta}{R_s}, \quad (2)$$

式中: $p$  是点源到球面弯曲晶体的距离, $R$  是球面弯曲晶体的弯曲半径, $\theta$  是 X 射线的布拉格角。

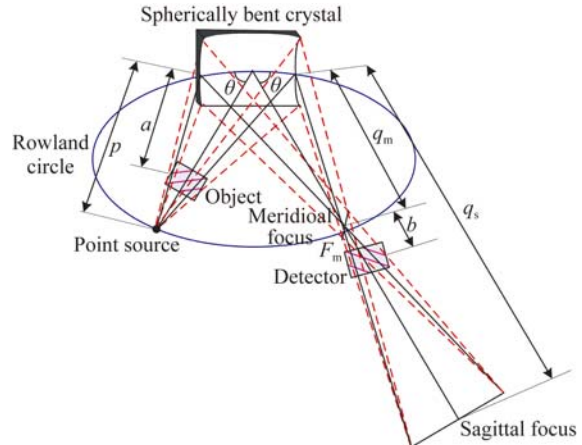


图 1 球面弯曲晶体成像理论

Fig. 1 Backlight imaging of spherically bent crystal

那么,子午和弧矢面上相应的放大率分别为:

$$M_m = \frac{p}{q_m} \cdot \frac{b}{(p-a)}, \quad (3)$$

$$M_s = \frac{p}{q_s} \cdot \frac{q_s - (q_m + b)}{(p-a)}, \quad (4)$$

式中: $a$  是球面弯曲晶体到成像物体的距离, $b$  是子午面焦点到探测器的距离。如果探测器放置在距离子午面焦距为  $b$  的地方,可以得到最佳成像(子午面和弧矢面两个方向的放大率相同),那么距离  $b$  为:

$$b = \frac{q_m q_s - q_m^2}{q_m + q_s}. \quad (5)$$

### 2.2 基于球面弯曲晶体的能谱分辨理论

为了得到等离子体 X 射线能谱分辨,Young 等建立了基于球面弯曲晶体的 X 射线能谱分辨几何模型<sup>[13]</sup>,如图 2 所示。在子午面上,光源 S 与球面弯曲晶体 C 的距离为  $a$ ;光源 X 射线的入射角为  $\varphi$ ,能谱分辨几何模型中布拉格角  $\theta = 90^\circ - \varphi$ 。球面弯曲晶体的球心 O 与谱线位置的距离为:

$$f = \frac{R \sin \theta}{\sin \gamma}, \quad (6)$$

其中:夹角  $\gamma = \pi - 2\varphi - \sin^{-1} \left[ R \sin \frac{\varphi}{s} \right]$ ,  $R$  为球面晶体的弯曲半径,  $s$  是光源  $S$  到球面弯曲晶体球心  $O$  的距离。

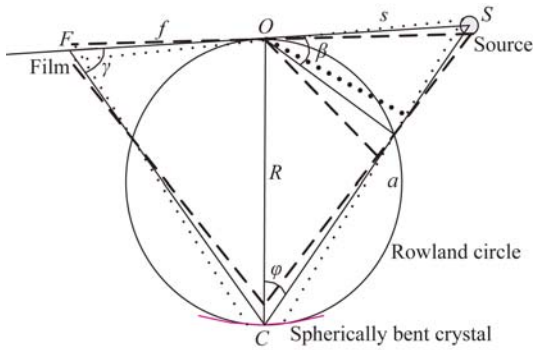


图 2 球面弯曲晶体能谱分辨原理

Fig. 2 Schematic of spectrum resolved in spherically bent crystal

由于几何模型中射线源是半径为  $r$  的柱形源,空间分布的源辐射将引起成像板上 X 射线谱线的加宽。X 射线的谱线展宽可以用波长展宽来表示,波长展宽与射线源( $f = f(\lambda)$ )的关系为:

$$\Delta f_{\lambda} = \left( \frac{df}{d\lambda} \right)_s \Delta \lambda = \left( \frac{df}{d\varphi} \right)_s \left( \frac{d \log \lambda}{d\varphi} \right)^{-1} \left( \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right). \quad (7)$$

根据晶体布拉格衍射,得到:

$$\left( \frac{d \log \lambda}{d\varphi} \right) = -\tan \varphi. \quad (8)$$

根据式(7)和式(8),得到能谱分辨率为:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \left| \frac{\Delta f_{\lambda} \tan \varphi}{(df/d\varphi)_s} \right|. \quad (9)$$

那么,光源尺寸为  $r$  的辐射源能谱分辨率为<sup>[13]</sup>:

$$\left( \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right) = \frac{2rcot \beta \tan \varphi}{R[(a/R - \cos \varphi)(cot \varphi \tan \gamma + 1) + a/R]}. \quad (10)$$

### 3 单色 X 射线能谱成像实验

#### 3.1 神光-III 原型装置的能谱成像实验

等离子 X 射线能谱成像实验首次在中国工程物理研究院的神光-III 原型装置上进行。该装置采用单端注入的方式,靶腔上下两个方向 8 路三倍频激光聚焦到靶腔注入口辐射到腔内,激光聚焦焦点分别位于上、下激光注入孔中心。每束激光的波长均为  $0.35 \mu\text{m}$ ,脉冲宽度为  $3 \text{ ns}$ ,每路激光的输出能量约为  $1500 \text{ J}^{[14]}$ ,靶腔真空度为

$5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。在神光-III 原型装置赤道中央窗口搭建 X 射线能谱成像系统。系统的核心色散原件为反射率和分辨率都很高的  $\alpha$ -石英(1011)球面弯曲晶体;基于晶体弯曲特性,球面弯曲晶体的弯曲半径为  $200 \text{ mm}$ ;根据布拉格衍射条件  $\lambda = 2d \sin \theta$ ,球面弯曲晶体的布拉格角  $\theta$  为  $34^\circ$ 。系统中探测装置为 IP 成像板,成像板的动态响应为  $10^5 \sim 10^6$ ,成像板上磷光剂颗粒的尺寸约  $5 \mu\text{m}$ ,分辨率可以达到微米量级。能谱成像实验中,柱状 Au 靶放置于靶腔赤道中心位置处(即上、下激光注入孔中心),能谱系统光轴与靶中心重合, $\alpha$ -石英(1011)球面晶体与柱状靶中心成  $34^\circ$ 角,与靶的距离约为  $1300 \text{ mm}$ ,IP 成像板放置于赤道平面距离球面晶体  $500 \text{ mm}$  的位置。上下各 4 路激光聚焦到高 Z 元素 Au 靶产生等离子体 X 射线,辐射到球面弯曲晶体被反射,IP 成像板得到清晰的 Au 等离子体 X 射线能谱成像,如图 3 所示。



图 3 等离子 X 射线谱线

Fig. 3 X-ray spectra of Au plasma

#### 3.2 能谱成像结果分析

通过软件 WinView32 和 Origin 对 Au 等离子体 X 射线谱线图像进行处理,得到 X 射线谱线强度与像素点分布,如图 4 所示。

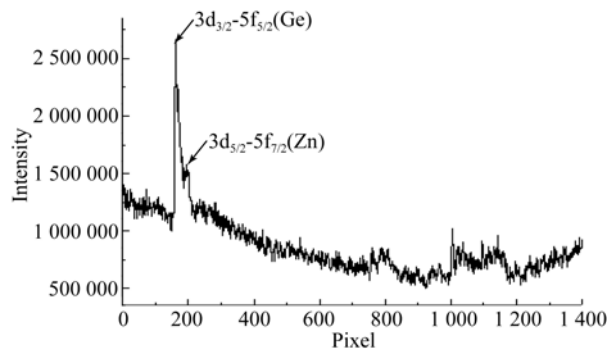


图 4 Au 等离子体谱线强度分布

Fig. 4 Spectral intensity distribution of Au plasma

低  $Z$  元素的等离子体发射谱相对简单,一般都是 K 壳层的激发谱线,主要包括类 H 离子的跃迁和类 He 离子的跃迁等。高原子序数( $Z$ )元素的等离子体激发谱线比较复杂,两个电子组态间跃迁线很多,多条跃迁线波长非常接近,再加上各种展宽效应(如 Stark 展宽、Doppler 展宽、等离子体的碰撞展宽等),使得大量谱线集中在一个较小的波长范围内。实验得到了高  $Z$  元素 Au 等离子体  $3d-nf(n=5)$  跃迁光谱,主要是波长为  $3.737 \times 10^{-10}$  的类 Ge  $3d_{3/2}-5f_{5/2}$  谱线和波长为  $3.758 \times 10^{-10}$  类 Zn  $3d_{5/2}-5f_{7/2}$  谱线,其谱线的相对强度很强,分别为 2 500 000 和 1 500 000。以波长为  $3.737 \times 10^{-10}$  的类 Ge  $3d_{3/2}-5f_{5/2}$  谱线为对象,得到成像系统的能谱分辨率( $\Delta\lambda/\lambda$ )约为 1 380。能谱实验中,柱状 Au 靶的半径约为 5 mm, X 射线入射角  $\varphi$  为  $56^\circ$ (布拉格角  $\theta$  的余角),夹角  $\gamma$  为  $60.06^\circ$ 。根据 X 射线能谱分辨几何模型,利用能谱成像实验的相关参量,代入式(10)得到类 Ge  $3d_{3/2}-5f_{5/2}$  谱线能谱分辨率( $\Delta\lambda/\lambda$ )的理论值约为 1 437,相对误差为 3.9%。实验得到的能谱分辨率与理论值基本符合。

#### 参考文献:

- [1] GLENZER S H, MACGOWAN B J, MEEZAN N B, *et al.*. Demonstration of ignition radiation temperatures in indirect-drive inertial confinement fusion hohlraums [J]. *Physical Review Letter*, 2011, 106(8): 085004.
- [2] FUJIOKA S, FUJIWARA T, TANABE M, *et al.*. Monochromatic X-ray radiography for areal-density measurement of inertial fusion energy fuel in fast ignition experiment [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10):10E529.
- [3] BENNETT G R, SINARS D B, WENGER D F, *et al.*. High-brightness, high-spatial-resolution, 6.151 keV X-ray imaging of inertial confinement fusion capsule implosion and complex hydrodynamics experiments on Sandia's Z accelerator(invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77 ( 10 ): 10E322-1-10E322-8.
- [4] ALKHIMOVA M A, PIKUZ S A, SKOBLEV I Y, *et al.*. Determination of the reflectivity curve of a spherically bent mica crystal used to diagnose X-ray radiation of relativistic laser plasma [J]. *Bulletin of the Lebedev*

## 4 结 论

本文利用球面弯曲晶体得到等离子体 X 射线的能谱成像信息,用于研究激光约束聚变过程中爆靶丸辐射高温等离子体的内部状态及相互作用过程。在神光 III 原型上进行了激光等离子体 X 射线能谱成像实验,获得了清晰的 Au 等离子体 X 射线谱线。通过分析所得谱线,得到石英球面晶体(1011)的能谱分辨率为 1 380,与能谱分辨几何模型的理论值比较吻合。结果表明,石英球面弯曲晶体(1011)具有较高的能谱分辨能力,可以用于等离子体 X 射线能谱诊断。对于球面弯曲晶体成像系统,弯曲晶体的自身特性、晶体物理特性、系统安装误差及探测器性能等因素都会影响系统的能谱分辨率。但是实际实验时,成像系统要进行精确光路对中、测试,系统自身误差对最后能谱成像的影响不明显;探测器容易受到靶丸聚爆溅射及其他波段射线的影响,实验时会在探测器前加相应的滤光膜来减少其他因素的影响。而晶体物理特性和弯曲晶体自身特性等的影响则是下一步的研究重点。

*Physics Institute*, 2016, 43(10):291-294.

- [5] BITTER M, HILL K W, STRATTON B, *et al.*. Spatially resolved spectra from a new X-ray imaging crystal spectrometer for measurements of ion and electron temperature profiles (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10):3660-3665.
- [6] HONKANEN A P, VERBENI R, SIMONELLI L, *et al.*. Study on the reflectivity properties of spherically bent analyser crystals [J]. *Corrigendum J. Synchrotron Rad.*, 2017, 24:545-546.
- [7] 孙景文. 高温等离子体 X 射线谱学[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- SUN J W. *High Temperature Plasma X-ray Spectroscopy* [M]. Beijing: National defence of Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [8] W X Y, X SH L, L J, *et al.*. Simulation and experimental research of X-ray toroidally bent crystal imaging with laser-produced plasma [J]. *Laser Physics*, 2016, 26(4):045701.
- [9] YAAKOBI B, CRAXTON R S, EPSTEIN R, *et al.*. Areal-density measurements of laser targets using absorption lines spectrosc [J]. *Journal of*

*Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1997, 58(1): 75-83.

- [10] KOCH J A, LANDEN O L, HAMMEL B A, *et al.*. Recent progress in high-energy, high-resolution X-ray imaging techniques for application to the National Ignition Facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(1): 525-530.
- [11] BITTER M, HILL K W, STRATTON B, *et al.*. Spatially resolved spectra from a new X-ray imaging crystal spectrometer for measurements of ion and electron temperature profiles [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 3660-3665.
- [12] SCANDALE W, KOVALENKO A D, TARATIN A M. Possibility of high efficient beam extraction from the CERN SPS with a bent crystal. Simulation results [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2017, 848: 166-169.
- [13] YOUNG B K, OSTERHELD A L, PRICE D F, *et al.*. High-resolution X-ray spectrometer based on spherically bent crystals for investigations of femtosecond laser plasmas [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 59(12): 4049-4053.
- [14] ZHANG X M, ZHENG W G, WEI X F, *et al.*. Preliminary experimental results of shengguang III technical integration experiment line [J]. *SPIE*, 2005, 5627: 6-12.

#### 作者简介:



刘利锋(1981—),男,山西忻州人,讲师,2009年、2012年于重庆大学分别获得硕士、博士学位,主要从事X射线探测等的研究。E-mail: liulf1305@cqu.edu.cn



肖沙里(1953—),男,重庆人,教授,博士生导师,主要从事光电探测,X射线探测等的研究。E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn