

高反射效率高定向性的热解石墨晶体 X 射线谱仪*

闫文超¹⁾ 苏鲁宁¹⁾ 林晓宣¹⁾ 杜飞¹⁾ 袁大伟¹⁾ 廖国前¹⁾ 刘成¹⁾
 沈忠伟¹⁾ 陈黎明¹⁾ 李玉同^{1)†} 马景龙¹⁾ 鲁欣¹⁾ 王瑄¹⁾ 王兆华¹⁾
 魏志义¹⁾ 盛政明²⁾ 张杰¹⁾²⁾

1)(中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100080)

2)(上海交通大学激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240)

(2014 年 3 月 31 日收到; 2014 年 4 月 28 日收到修改稿)

基于高定向热解石墨晶体 (highly oriented pyrolytic graphite, HOPG) 研制了一种新型反射式 X 射线谱仪. 该谱仪具有高反射效率、较高能谱分辨率及相对较宽的能谱测量范围. 根据计算, 在相同的入射条件下, 该谱仪的效率比一般 X 射线弯晶谱仪高 3 个量级; 谱仪能谱分辨率理论值最高达 350; 理论探测范围是 6.891 keV 至 9.193 keV. 我们将该谱仪应用在高功率密度激光与固体靶相互作用的实验中, 发现在普通弯晶谱仪无法采到信号的实验条件下, HOPG 谱仪依然采集到清晰的 Cu $K\alpha$ 谱线. 分析发现在 8.048 keV (Cu 的 $K\alpha$ 光子能量) 附近的能谱分辨能力最高达到 40 eV, 分辨率大于 200.

关键词: 高定向性的热解石墨晶体, X 射线, 高反射效率谱仪

PACS: 07.85.Nc, 41.50.+h, 52.70.La

DOI: 10.7498/aps.63.170701

1 引言

近些年来, 随着实验室高能量密度物理领域的发展, 通过对 X 射线发射的测量来诊断热稠密等离子体的性质已经成为了一种常用的方法^[1,2], 尤其在惯性约束核聚变^[3]和实验室天体物理^[4]中, 该方法已经被广泛应用. 利用这种方法可以研究超强超短激光脉冲和过临界密度等离子体相互作用中超热电子的输运^[5]. 例如, 在激光核聚变快点火研究中, 获得加热激光到热斑的转换效率是实验中最重要参数. 该效率由超热电子的转换效率、传输效率和能量沉积效率共同决定. 利用实验中产生的 $K\alpha$ X 射线对超热电子转换效率的测量是目前最重要的诊断方法之一. 因此, 诊断激光与等离子

相互作用中产生的 X 射线性质的具有非常重要的意义^[6,7].

常用的 $K\alpha$ X 射线材料方法包括单光子计数 CCD^[8-10]、准单色 $K\alpha$ 弯晶谱仪^[11]等. 单光子计数 CCD 可以测量弱光信号, 是激光等离子体光谱学重要的诊断设备, 但单光子计数 CCD 的谱分辨率很低, 一般只有 10—20^[10]; 准单色 $K\alpha$ 弯晶谱仪一般具有较高的谱分辨率, 但是其测量的 X 射线的谱宽范围很窄, 另外, 由于弯晶的积分反射率很低^[9], 导致弯晶谱仪的效率非常低, 对于较弱的信号很难探测到可用的信息. 我们利用 HOPG 晶体, 研制了一种新型的反射式晶体 X 射线谱仪. HOPG 谱仪相比于其他 X 射线设备, 同时具有高能量分辨能力、较高的反射率和相对较宽的能谱测量范围等特点, 非常适合对超热电子输运进行诊断.

* 国家重点基础研究发展计划 (973)(批准号: 2013CBA01501)、科技部国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2012YQ12004705) 和国家自然科学基金 (批准号: 11175192, 11334013, 1135012, 11375262) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: ytli@iphy.ac.cn

2 谱仪的设计

2.1 HOPG 晶体

HOPG 晶体全称高定向性的热解石墨晶体 (highly oriented pyrolytic graphite, HOPG), 该晶体具有独一无二的结构, 加上石墨本身对 X 射线较高的反射效率, 使其可以高效地反射 X 射线. 如图 1 所示, 构成 HOPG 的微晶 (crystallites) 取向不完全平行于晶体表面, 微晶面的取向偏离晶体表面法线方向的角度分布被称为马赛克分布 (mosaic spread) [12-14]. 由于 HOPG 内部微晶面法向的分布, 使得 HOPG 晶体通过可以马赛克聚焦效应实现对 X 射线的会聚. 一般的反射式 X 射线晶体, 要求 X 射线入射角必须严格等于布拉格角时, 才可以实现布拉格反射; 而对于 HOPG 晶体, 只要在布拉格角附近的角度范围内入射的 X 射线, 都可以被分布在罗兰圆上的微晶面所反射 (如图 1 红色虚线所示), 从而使 HOPG 晶体对 X 射线有较高的反射效率.

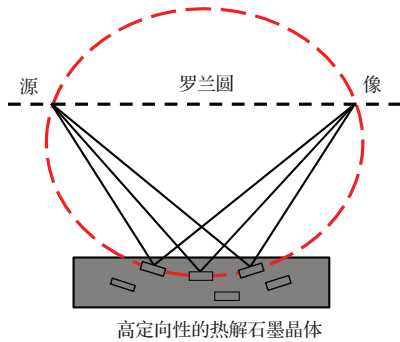


图1 HOPG 晶体马赛克聚焦原理图

2.2 谱仪的参数设计

2.2.1 能谱范围探测范围

能谱色散由布拉格关系决定: $n\lambda = 2d \sin \theta_B$, 其中 n 是反射级数为整数, λ 为 X 射线的波长, d 为原子晶格内的平面间距, θ_B 是布拉格角. 晶体两端的位置对应的 X 射线的布拉格角决定了晶体可以探测 X 射线能量的最大值和最小值. 能量探测范围由 X 射线源和晶体中心的距离以及晶体到探测器的位置决定. 布拉格角随着晶体上位置的变化由下面的公式给出:

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{2L \sin(2\theta_0) + x \cos(2\theta_0)}{2L \cos(2\theta_0) - x \sin(2\theta_0)} - \theta_0, \quad (1)$$

其中 θ_0 是 Cu 的 $K\alpha$ 线 (8.048 keV) 在中心位置时的布拉格角, x 是其他 X 射线相对于 Cu 的 $K\alpha$ 线在 IP 板上的位置, L 是 X 射线聚焦长度.

2.2.2 能谱分辨率

能谱分辨率主要由四个因素决定: 几何相差、源尺寸大小、探测器的像素大小、晶体摇摆曲线. 能量分辨率定义为

$$E/\delta E = \tan(\theta_B)/\delta\theta, \quad (2)$$

其中 $\delta\theta = \sqrt{\delta\theta_s^2 + \delta\theta_d^2 + \delta\theta_c^2}$, $\delta\theta_s = s/2L$ 是由于有限源尺寸导致的角发散度. $\delta\theta_d = \delta s_d/2L$ 是由于 IP 成像板的像素大小 δs_d 导致的角分辨率. $\delta\theta_c$ 是晶体本身的贡献, 来自于两个部分: 晶体的摇摆曲线的本征半宽和有限厚度; 由平面聚焦误差和 X 射线在马赛克晶体中的穿透力而引起的几何相差 [15].

2.2.3 谱仪的效率

谱仪的效率决定于其照度 η , 照度定义为单位积分时间单位立体角内成像面的光子数 (I_{det} 单位: 光子/ μm^2) 与源亮度的光子数 (I_s 单位: 光子/ $\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr}$) 的比值

$$\eta = I_{\text{det}}/I_s = TR\Omega \sin^2 \theta_B, \quad (3)$$

其中 T 是谱仪入射孔处铝膜的透射率, Ω 是谱仪可以接收的立体角, R 是晶体的积分反射率. HOPG 的积分反射率在 10^{-2} 量级, 而一般弯晶的积分反射率在 10^5 的量级 [11], 因此, 在入射条件相同的情况下, HOPG 谱仪的效率比一般弯晶谱仪高 3 个量级.

2.3 谱仪的工程设计

我们研制的谱仪采用的是 2 mm 厚的 ZYA 型平面 HOPG 晶体, 宽 $w_k = 25$ mm (非色散方向), 长 $w_l = 50$ mm (色散方向), 晶格间距 $d = 0.3354$ nm, 积分反射率 1.3×10^{-2} , 如图 2 (a) 所示. 图 2 (b) 是我们设计的 HOPG 谱仪示意图, 谱仪内部的 HOPG 晶体被固定在一个精密角位台上, 可以实现对晶体位置的精密调整. 为了防止杂散的 X 射线直接进入被探测器, 整个谱仪全部安装在一个铝屏蔽盒中. 等离子体源和探测器之间, 我们使用带状铅皮进行了屏蔽.

该谱仪要求 HOPG 晶体中心位置与靶点的距离和与探测器的距离相等, 该距离为 170 mm. 谱

仪设计晶体中心对应Cu的 $K\alpha$ X射线, 相应的布拉格角是 $\theta_0 = 13.26^\circ$, 晶体边缘对应的布拉格角分别是 11.6° 和 15.56° , 由此(1)式可以计算出谱仪的能谱探测范围是6.891 keV至9.193 keV.

根据文献[16], $\delta\theta_s, \delta\theta_d, \delta\theta_c$ 对 $\delta\theta$ 的贡献分别是 $1 \times 10^3, 5 \times 10^2, 1 \times 10^3$, 对于布拉格角 θ_B 在 11.6° — 15.56° 范围, 由(2)式得出, 可以得到对应的能量分辨率的理论值范围260—350.

谱仪的入射孔使用 $13 \mu\text{m}$ 厚的铝膜包裹, 对Cu的 $K\alpha$ X射线的透过率 $T = 0.85$ [17], 积分反射率 $R = 1.3 \times 10^{-2}$, 由几何关系计算, 可以得出接收立体角 $\Omega = w_k \tan \theta_A / (L - w_k \cos \theta)$, 其中 θ_A 为接收顶角, 由平面几何关系 $\theta_A = 3.96^\circ$. 由此计算得出 $\Omega = 1.2 \times 10^{-2}$. 通过(3)式, 计算得到谱仪效率 $\eta = 6.5 \times 10^{-6}$.

探测器放置在布拉格散射角的成像平面上. 探测器采用Fujifilm公司BAS-SR型IP成像板(Imaging Plate). IP成像板被 $13 \mu\text{m}$ 的铝膜包围, 用来屏蔽低能的X射线和可见光. 为提高打靶和信号采集效率, 通过在真空中运转的电控旋转台依次切换四块IP板, 保证靶室一次抽放真空能采集四发能谱信号.

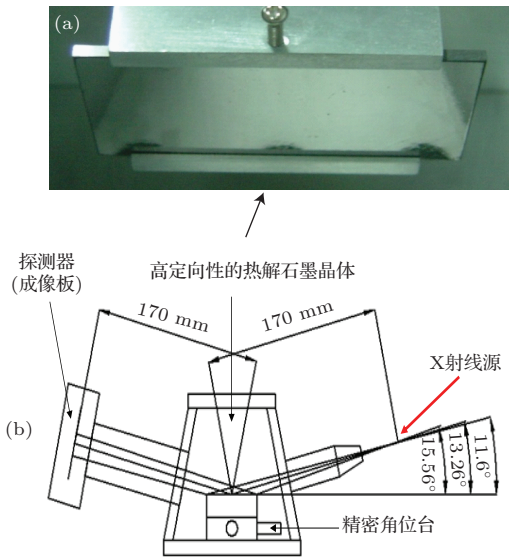


图2 (a) ZYA型平面HOPG晶体实物图; (b) HOPG谱仪的设计工程图

3 实验应用与讨论

我们将该谱仪应用在了激光与固体靶相互作用的实验中. 该实验在中国科学院物理研究所光物理重点实验室的极光II号激光器上展开的. 极光II

号是一台可以输出30 fs, 10 Hz, 800 nm的掺钛蓝宝石飞秒脉冲激光器. 本次实验中, 激光功率为3 TW. 我们使用 $f/6$ 的离轴抛物面镜(OAP)将激光脉冲聚焦到 $10 \mu\text{m}$ 的焦斑上. 靶为三明治结构, 由Al, Cu, Ti叠加组成, 共 $10 \mu\text{m}$ 厚, 激光入射角为 45° . 图3(a)为根据极光II号靶场设计的HOPG谱仪实验布局图, 我们利用HOPG谱仪测量示踪元素(Cu)的K谱线. 谱仪整体放置于真空靶室内部, 保证X射线沿激反射方向入射晶体中心, 晶体中心位置距靶点170 mm.

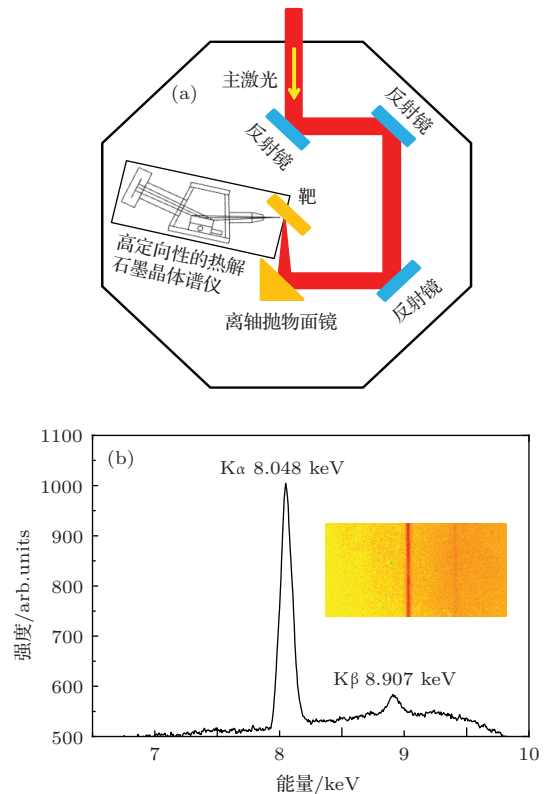


图3 (网刊彩色) (a) 实验布局图; (b) HOPG谱仪实测X射线能谱图(插图为HOPG X射线能谱信号)

通过实验我们发现, HOPG谱仪清楚的探测到了Cu $K\alpha$ (8048 eV), Cu $K\beta$ (8907 eV) 两条不同的线, 如图3(b)所示. 被探测到的两条线的半高全宽(FWHM)分别是 $45 \pm 5 \text{ eV}$, $48 \pm 5 \text{ eV}$. 由(2)式可以计算出对应的分辨率 >20 . 在同样的实验条件下, 我们使用普通弯晶谱仪进行了对比实验, 由于其较低的反效率, 没有采集到可用信号. 实验中得到的X射线谱线可以有效反映超热电子的数目、能谱分布及温度, 等离子体密度和源的尺寸[8], 总体的X射线产生效率可以准确反映激光能量的吸收率[9].

4 结 论

我们研制了HOPG晶体X射线谱仪并在实验中进行应用. 这种谱仪使用了高效率HOPG晶体, 对能量为8.048 keV的铜 $K\alpha$ 射线, HOPG晶体的积分反射效率为 1.3×10^{-2} , 而一般的弯晶成像系统对铜 $K\alpha$ 射线的积分反射效率只有 10^5 水平, 可见, 由马赛克聚焦效应和石墨本身较高的反射率, 谱仪效率比弯晶高出两个数量级. 该谱仪在8.048 keV处的能量分辨($E/\delta E$)理论值为260—350, 我们实验测得HOPG能谱仪的能量分辨能力大于200. 使用这种谱仪, 通过现有飞秒激光装置, 采用三明治靶构型, 获得了靶中Cu的 $K\alpha$ 谱分布. 如果利用蒙特卡洛程序, 结合实测的 $K\alpha$ 强度, 可以用来研究超热电子的输运过程, 这可为快点火整体和分解实验提供有效的诊断方法.

参考文献

- [1] Wang S J, Dong Q L, Zhang Y, Li Y T, Zhang L, Shinsuke Fujioka, Norimasa Yamamoto, Hiroaki Nishimura, Zhang J 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 125202
- [2] 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 035201
- [3] Wang R R, Chen W M, Wang W, Dong J Q, Xiao S L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 075202
- [4] Kahn S M, Behar E, Kinkhabwala A, Savin D W 2002 *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* **360** 1923
- [5] Koester P, Akli K, Antonicci A, Batani D, Baton S, Evans R G, Foerster E 2009 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **51** 014007
- [6] Faenov A Y, Magunov A I, Pikuz T A, Skobelev I Y, Gasilov S V, Stagira S, Calegari F, Nisoli M, De Silvestri S, Poletto L, Villoresi P, Andreev A A 2007 *Laser Part. Beams* **25** 267
- [7] Brambrink E, Wei H G, Barbrel B, Audebert P, Benuzzi-Mounaix A, Boehly T, Endo T, Gregory C, Kimura T, Kodama R, Ozaki N, Park H S, Gloaghec M R I, Koenig M 2009 *Phys. Plasmas* **16** 033101
- [8] Chen L M, Kando M, Xu M H, Li Y T, Koga J, Chen M, Xu H, Yuan X H, Dong Q L, Sheng Z M, Bulanov S V, Kato Y, Zhang J, Tajima T 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 045004
- [9] Chen L M, Liu F, Wang W M, Kando M, Mao J Y, Zhang L, Ma J L, Li Y T, Bulanov S V, Tajima T, Kato Y, Sheng Z M, Wei Z Y, Zhang J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 215004
- [10] Sun Y Q, Chen L M, Zhang L, Mao J Y, Liu F, Li D Z, Liu C, Li W C, Wang Z H, Li Y J, Wei Z Y, Zhang J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 075206 (in Chinese) [孙彦乾, 陈黎明, 张璐, 毛婧一, 刘峰, 李大章, 刘成, 李伟昌, 王兆华, 李英骏, 魏志义, 张杰 2012 物理学报 **61** 075206]
- [11] Lin X X, Li Y T, Liu B C, Liu F, Du F, Wang S J, Lu X, Chen L M, Zhang L, Liu X, Wang J, Liu F, Liu X L, Wang Z H, Ma J L, Wei Z Y, Zhang J 2010 *Phys. Rev. E* **82** 046401
- [12] Ohleraz M, Baruchel J, Moore A W, Ph. Galezd A 1997 *Freund Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **129** 257
- [13] Moore A W, *Chemistry and Physics of Carbon*. Vol. 11, ed. P. L. Walker Jr. (Marcel Dekker, New York) p69
- [14] Zabel H, Solin S A, eds. 1990 *Graphite Intercalation Compounds I, Springer Series in Material Science* (Springer: Berlin)
- [15] Yuan X H, Carroll D C, Coury M, Gray R J, Brenner C M, Lin X X, Li Y T, Quinn M N, Tresca O, Zielbauer B, Neely D, McKenna P 2011 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **653** 145
- [16] Pak A, Gregori G, Knight J, Campbell K, Price D, Hammel B, Landen O L, Glenzer S H 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3747
- [17] <http://henke.lbl.gov/opticalconstants/filter2.html>

A high efficiency highly oriented pyrolytic graphite X-ray spectrometer*

Yan Wen-Chao¹⁾ Su Lu-Ning¹⁾ Lin Xiao-Xuan¹⁾ Du Fei¹⁾ Yuan Da-Wei¹⁾
Liao Guo-Qian¹⁾ Liu Cheng¹⁾ Shen Zhong-Wei¹⁾ Chen Li-Ming¹⁾ Li Yu-Tong^{1)†}
Ma Jing-Long¹⁾ Lu Xin¹⁾ Wang Xuan¹⁾ Wang Zhao-Hua¹⁾ Wei Zhi-Yi¹⁾
Sheng Zheng-Ming²⁾ Zhang Jie¹⁾²⁾

1) (*Beijing National Laboratory of Condensed Matter Physics, Institute of Physics, CAS, Beijing 100080, China*)

2) (*Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

(Received 31 March 2014; revised manuscript received 28 April 2014)

Abstract

A novel design of X-ray spectrometer is implemented, using a high efficiency HOPG (highly oriented pyrolytic graphite) Bragg crystal. The spectral resolution of it can reach above 350 with energy ranging from 6.891 to 9.193 keV, theoretically. And the efficiency are 3 order of magnitude higher than the ordinary X-ray crystal spectrometer. Application of this instrument is demonstrated in high intensity laser-foil interaction experiments. It is shown that HOPG spectrometer has much lower threshold of X-ray intensity than ordinary one. The spectral resolution for 8.048 keV (Cu $K\alpha$ -line) can reach 40 eV, which gives the spectral resolution greater than 200.

Keywords: highly oriented pyrolytic graphite Bragg crystal, X-ray, high efficiency spectrometer

PACS: 07.85.Nc, 41.50.+h, 52.70.La

DOI: 10.7498/aps.63.170701

* Project supported by the National Key Basic Research Development of China (Grant No. 2013CBA01504), the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China (Grant No. 2012YQ12004705), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11175192, 11334013, 1135012, 11375262).

† Corresponding author. E-mail: ytli@iphy.ac.cn