

准单色近平行光束的X射线源

王瑞荣 安红海 熊俊 谢志勇 王伟

X-ray source with quasi-monochromatic parallel beam

Wang Rui-Rong An Hong-Hai Xiong Jun Xie Zhi-Yong Wang Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 240701 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180861

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180861>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Gd 掺杂对无氟金属有机物沉积法制备 \$Y_{1-x}Gd_x\$ BCO 薄膜的应力调控](#)

Stress mechanism of $Y_{1-x}Gd_x$ BCO thin film with Gd substitution prepared by F-free metal organic deposition method

物理学报.2017, 66(15): 156101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.156101>

[基于原位 X 射线衍射技术的动态晶格响应测量方法研究](#)

Experimental investigation on dynamic lattice response by in-situ Xray diffraction method

物理学报.2017, 66(13): 136101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.136101>

[金属有机物化学气相沉积同质外延 GaN 薄膜表面形貌的改善](#)

Surface morphology improvement of homoepitaxial GaN grown on free-standing GaN substrate by metalorganic chemical vapor deposition

物理学报.2017, 66(10): 106101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.106101>

[一种 X 射线聚焦光学及其在 X 射线通信中的应用](#)

X-ray focusing optics and its application in X-ray communication system

物理学报.2016, 65(1): 010703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.010703>

[Cu 掺杂 \$AgSbTe_2\$ 化合物的相稳定、晶体结构及热电性能](#)

Phase stability, crystal structure and thermoelectric properties of Cu doped $AgSbTe_2$

物理学报.2012, 61(8): 086101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.086101>

准单色近平行光束的X射线源*

王瑞荣† 安红海 熊俊 谢志勇 王伟

(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2018年5月1日收到; 2018年11月18日收到修改稿)

针对准单色近平行光束X射线背光成像诊断需求, 提出了一种用球面弯晶进行X射线衍射选单从而获取准直光束的新方案. 在神光II装置上, 设计了基于球面弯晶X射线衍射选单准直光束系统, 完成了该系统的安装、调试和实验应用, 获得了准单色 ($10^{-3} < \Delta\lambda/\lambda < 10^{-2}$)、小发散角 (< 2 mrad) 和大辐照匀斑 (直径 $\phi 500$ m) 的X射线光源. 同时基于衍射光学和球面镜成像理论, 研究了不同布拉格角对球面弯晶X射线衍射光束发散角及其像散差的影响. 结果表明, 布拉格角会影响球面弯晶X射线衍射光束的发散角. 用控制布拉格角范围的方法有望获得发散角优于1 mrad的近平行光束X射线光源. 这种准单色、极小发散度和均匀角分布的X射线光源可应用于高分辨X射线成像诊断.

关键词: X射线源, 衍射单色性, 准直光束

PACS: 07.85.-m, 61.05.cp, 87.56.nk

DOI: 10.7498/aps.67.20180861

1 引言

激光驱动X射线背光照相诊断技术常用于高温稠密等离子体、惯性约束聚变中小球内爆过程的诊断^[1,2]. 由于成像系统分辨力有限, 靶芯自发辐射干扰和背光源局部不均匀等不利因素, 常常出现由靶球内爆的高阶不对称性导致的内爆后期内界面位置和尺寸无法从图像中获取的情况. 为了从图像中精准获取界面位置和尺寸, 需要对X光照相技术进行两点改进: 一是将背光X射线光束变成平行光束, 以提高界面对比度; 二是对待测物体进行成像放大, 以获取更高的空间分辨率. X射线激光有光束准直性好的特点, 可大幅度提升显微学和光谱学在纳米空间尺度上的研究能力, 但目前仍处在研究发展阶段^[3]. 利用光学器件反射同步辐射X射线可得到极好的单色性和平行度的X射线, 但由于同步辐射源稀缺, 加上辐射防护和高成本因素限制了同步辐射准单色平行光束X射线应用^[4]. 目前, 激光驱动X射线背光照相诊断技术指的是利用激光

辐照金属靶片产生特征线的X光作为背光照明光源, 对目标(物体)辐射照相. 对于界面测定这种背光实验, 已有理论研究表明采用平行光束光源比传统X射线光源要好, 可提高高收缩比样品的界面对比度. 为了内爆推进层内界面精度运动轨迹等物理实验, 在“神光II”激光装置上发展一种用于激光等离子体辐射X射线选单准直光束低成本方法, 获取具有高度方向性和单色性的X射线光源是有必要的.

迄今为止, 激光辐照金属片靶产生等离子体辐射X射线效率及其背光照相得到了广泛应用^[5-7], 但将平行光束引入X射线成像方案^[8,9]中, 实现高对比度和分辨率的背光成像例子很少, 尤其在大中型激光装置上, 利用自产的准单色近平行光束X射线光源对靶丸压缩过程背光照相诊断还没有先例. 但要获得优良的准单色近平行光束X射线除要依赖现有激光装置的能量输出能力外, 还需要发展准直X射线光束的方法和光学器件. 用毛细管X射线光学器件得到了准单色平行光束X射线和用定向晶体将特定能量的X射线衍射成单色性或多色

* 国家自然科学基金(批准号: 11575168)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangrr59@sina.com

平行光束 X 射线已有先例^[10], 用反射双通道切割冷凝准直单色器^[11]、平曲抛物型多层膜反射镜^[12]、交叉梯度抛物型多层膜反射镜^[13]、对数螺旋镜与凸面镜组合^[14]、衍射与折射镜^[15]等光学器件, 获得了实验室光束发散度小的 X 射线源.

尽管在 X 射线光束的准直技术和应用方面取得了长足进步, 准直 X 射线光束发散度均可以达到毫弧度 (mrad) 量级, 但主要采用的是用两块反射镜进行耦合的方式, 在掠入射条件下实现 X 射线光束准直. 而多光学器件组成的 X 射线光束准直系统难免会增加实验布局的复杂程度, 且准直 X 射线光束要求极高的装调精度, 这无形中增加了其装调的难度. 由于光学器件对 X 射线具有强吸收, 多反射镜还会降低像面对比度和调制传递函数, 因而这种方法是牺牲 X 射线光子流量来换取 X 射线光束准直性的提升.

针对上述这些问题, 本文提出了一种基于球面弯晶 X 射线衍射选单准直光束方案, 简要介绍利用球面弯晶 X 射线衍射准直光束原理及设计的基本思想, 并研究布拉格角对球面弯晶 X 射线衍射选单准直光束发散度的影响, 给出相应的应用演示实验的细节和结果.

2 X 射线光束准直系统设计

X 射线光束准直系统是一种以球面弯晶为主要元件的非对称性选单和成像系统, 其结构原理如图 1 所示. 物体发出的 X 射线经球面弯晶衍射选单成像变成准单色近平行光束 X 射线. 对于非对称性的离轴系统, 在掠入射反射成像时球面镜要产生像散像差, 其子午和弧矢方向成像公式为

$$\begin{cases} \frac{1}{p} + \frac{1}{q_t} = \frac{2}{R \sin \theta}, \\ \frac{1}{p} + \frac{1}{q_s} = \frac{2 \sin \theta}{R}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 p 为物距, q_t 和 q_s 分别为子午和弧矢面内的像距, R 为曲率半径, θ 为布拉格角 (或掠入射角). 从 (1) 式可以得出, 球面镜只有当物体位于光轴上时, 才会有子午像面和弧矢像面重合. 若 θ 不等于 90° , 存在有像散像差现象, 子午和弧矢焦距之比为 $\sin^2 \theta$. 在较小掠入射角情况下, 子午焦线和弧矢焦线间间距 (或像散差) 很大, 如图 2 所示. 由于该系统存在像散差, 对于物体上无限小点成像, 并非点

像而实际是弥散斑. 弥散斑横向和纵向的大小决定成像系统横向和纵向的分辨能力. 在设计 X 射线光束准直系统时, 需要考虑 3 个重要性能指标: 一是光束发散角; 二是单色性; 三是 X 射线光强度. X 射线光强度可以提高成像质量. 光束发散度的好坏直接影响成像视场和图像重建的分辨力, 对几何放大倍数也有着重要意义. 而 X 射线单色性有益于光谱技术和 X 射线背光成像方法的应用^[16]与推广.

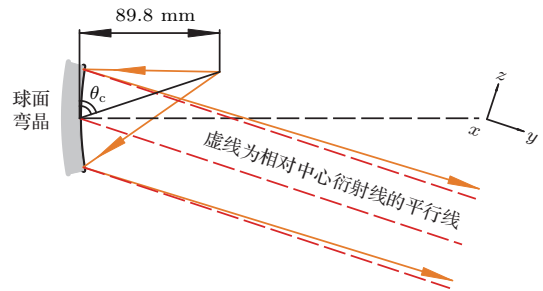


图 1 球面弯晶准直光束光路图

Fig. 1. Ray trace of collimated beams using a spherically bent crystal.

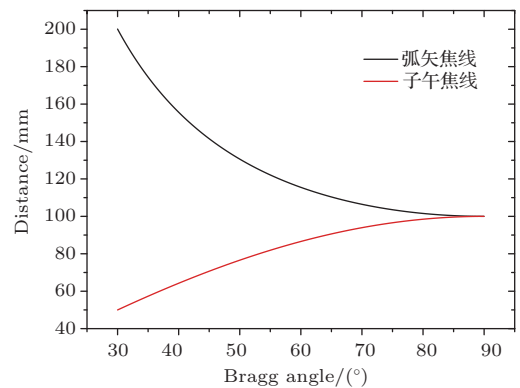


图 2 球面弯晶子午面和弧矢面焦距随布拉格角的演化

Fig. 2. Bragg angle evolutionary curves of the focal distance in the tangential plane or sagittal plane for spherically bent crystal, respectively.

事实上, 进行激光等离子体 X 射线源准直光束的前提是要满足球面镜成像和布拉格衍射条件的 X 射线. 对于轴对称系统, 点光源位于球面镜的焦点上, X 射线光束经球面镜反射后成为理想的平行光束 (零发散度). 而准直 X 射线光束的光强度取决于下列 3 个主要因素: 系统的集光能力、光能损失程度和成像放大倍数. 光能损失包括有由于晶体反射的光能损失和光谱带宽限制引起的光能损失. 根据布拉格衍射方程: $2d \sin \theta = n\lambda$, 这里 $2d$ 为晶格常数, n 为衍射级次, λ 为波长. 只有入射光满足

布拉格衍射条件时, 方有可利用的积分衍射效率, 但能否满足布拉格衍射条件是关系到球面弯晶准直 X 射线光束的效率. 基于球面弯晶 X 射线衍射准直光束的光学结构, 考虑到在离轴条件下的布拉格角、曲率半径和通光孔径等关键因素对 X 射线衍射单色性的影响, 并从图 1 中推出相对光谱带宽 ($\Delta\lambda$) 为

$$\Delta\lambda \approx \lambda \frac{\Delta S_{\text{crystal}}}{R \text{tg} \theta}, \quad (2)$$

这里 $\Delta S_{\text{crystal}}$ 为球面弯晶工作区域所对应的弦长.

由于不同参数总会影响到系统的整体性能表现, 因此, X 射线光束准直系统的参数设计需满足以下原则: 首先, 系统要保证 X 射线衍射为近平行光束; 其次, 系统在满足准单色性的同时, 要兼顾辐照度的均匀性, 并期望系统有较高的效率; 再就是, 系统的工作能点易调, 能覆盖当前物理实验所涉及的 X 光背光能点. 根据以上设计的基本思想, 由 (1) 和 (2) 式以及布拉格衍射条件决定 X 射线光束准直系统的设计参数.

用 SHADOW 程序包^[17] 模拟仿真了球面弯晶面形和几何误差、晶体孔径、光源深度和宽度以及入射角对 X 射线光束发散角的影响. 考虑 X 射线光源应用需求的规则, 当 X 射线束发散角与集光立体角出现矛盾时, 应优先满足最小立体角要求. 再利用光路追踪程序^[18], 模拟仿真球面弯晶准直 X 射线光束的发散度、光谱带宽和系统成像效率, 三者互为制约关系. 为此, 实际设计一套准单色近平行光束的 X 射线成像系统需要统筹兼顾系统多个因素, 包括对光源系统、球面弯晶成像系统各参数的选择和设计. 利用自研的优化软件, 具体设计了两套球面弯晶 X 射线衍射选单准直光束系统, 并将优化设计的技术参数列于表 1. 其中系统 I 采用工作能点为 4.75 keV, 布拉格角 $71.7^\circ (< 80^\circ)$; 系统 II 采用工作能点为 2.78 keV, 布拉格角 $82.4^\circ (> 80^\circ)$. 假定点光源背光, 采用限制布拉格角范围的方法, 新设计的 X 射线光束准直系统可实现 X 射线光束发散角优于 2.0 mrad, 有效辐照均匀斑直径 (ϕ) 约 2 mm.

表 1 X 射线准直系统技术参数
Table 1. Technical parameters for collimated X-ray system.

	晶体	晶格常数/ \AA	工作能点/keV	布拉格角/ $^\circ$	球面半径/mm	晶体尺寸	光谱带宽/ \AA
系统 I	石英	2.749	4.75	71.7	200	20 mm \times 20 mm	0.172
系统 II	石英	4.509	2.78	82.4	200	20 mm \times 20 mm	0.102

3 物理实验

在“神光 II”激光装置上, 对球面弯晶 X 射线衍射选单准直光束系统进行实验验证. 主要设计指标为: 靶放置在球面镜的聚焦点附近, 第九路三倍频 (3ω) 激光, 输出能量 ~ 180 J, 脉冲波形 ~ 150 ps, 点聚焦 ($\phi \sim 150 \mu\text{m}$), 激光束以靶面法线成 22.5° 角驱动固体平面靶. 若选用平面固体钛 (Ti) 靶为例, 选系统 I 为光学选单准直 X 射线光束的配置结构, 物距为 93.7 mm, 网格金属丝直径为 $60 \mu\text{m}$, 周期为 $127 \mu\text{m}$ 的 200 目金属网格, 成像板 (imaging plate, IP) 记录, 实验布局如图 3 所示. 所需诊断参数: 首先, 对 X 射线发散角测量. 用 IP 搁置在不同位置记录 X 射线背光网格成像图像. 其次, 为了对激光等

离子体辐射 X 射线能谱进行观测, 把椭圆弯晶谱仪安装在靶下方, 观测方向与靶面法线成 30° , 与入射激光束夹角为 52.5° , 分光晶体为石英, 晶格常数 ($2d$) 为 4.5\AA , 能谱覆盖范围: $E = 3.15\text{--}7.36$ keV. 第三, 要监测球面弯晶 X 射线衍射能谱的单能化. 用时空积分的球面弯晶谱仪配 IP 记录, 而 IP 放在罗兰圆上 (图 3 未标出) 来获取球面弯晶 X 射线衍射选单的光谱轮廓. 在实验过程中, 为防止溅射损伤球面弯晶元件, 提高诊断有用信息的对比度, 降低低能段 X 射线和杂散光本底的影响, 在弯晶元件和探测器前各自置上防护膜片和滤光膜片. 组成膜片的材料及厚度可根据文献^[19] 选择. 对于工作能点 4.75 keV Ti 离子类 He- K_α 中心谱线, 选择 $5 \mu\text{m}$ 厚铜 (Cu) 薄片作为防护膜片或滤光膜片最为合适.

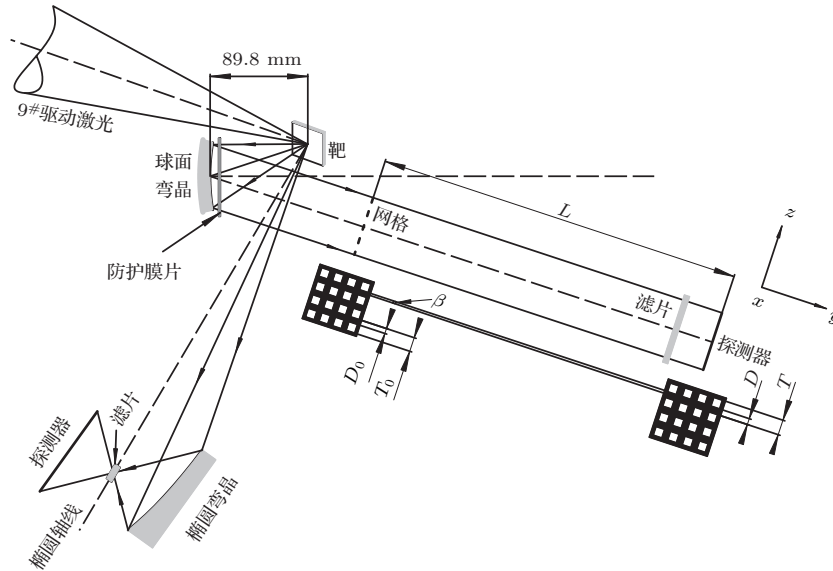


图3 准单色X射线束发散角测量布局图,其中X射线束辐照金属网格,在IP上形成网格图像

Fig. 3. Experimental diagram for measuring divergence angle of quasi-monochromatic X-ray beams. The quasi-monochromatic beam passed through a metal grid and formed an image of the grid on IP.

4 结果与讨论

图4为利用椭圆弯晶谱仪获得的Ti等离子体辐射X射线能谱图.图4(a)为IP记录的原始光谱图,其中水平方向为色散(或能谱分辨)方向,竖直

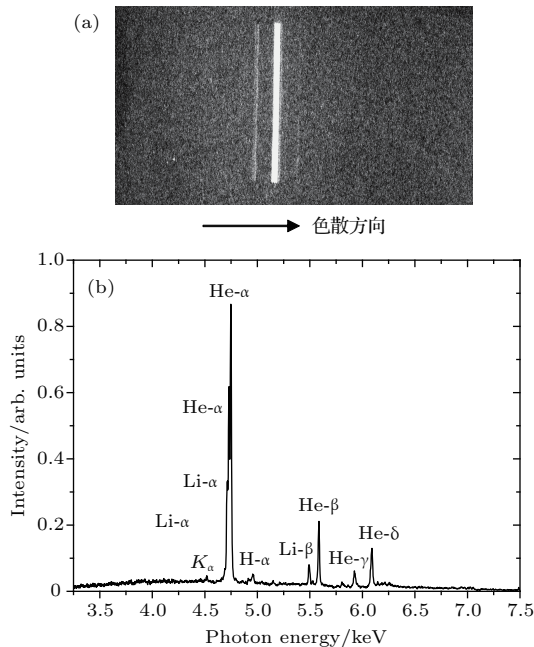


图4 椭圆弯晶谱仪测量的X射线谱 (a) IP记录原谱图; (b) 激光Ti等离子体辐射X射线谱

Fig. 4. Measured X-ray spectra with elliptically bent crystal spectrometer: (a) Original photograph of X-ray spectra; (b) spectral distribution of a laser-produced Ti plasma.

方向为空间方向.为了得到Ti等离子体辐射X射线能谱分布,将图4(a)沿空间方向取150个像数点积分求平均,并对谱线进行定标,标识、归类辨认,得到了Ti等离子体辐射X射线能谱光强度分布图,如图4(b)所示.从图4(b)中看到,Ti激光等离子体辐射X射线含有丰富的原子、离子跃迁线,主线为高剥离态类离子谱线,诸如类氢离子H- α ,类氦离子He- K_{α} , He- K_{β} , He- γ 和He- δ ,类锂离子Li- K_{α} , Li- K_{β} 和Li- γ 等跃迁线,也发现了冷原子K特征线,并对能谱分布谱线轮廓的光强度进行了比较,最强峰线为类氢离子He- K_{α} ,次强峰线为类锂离子Li- K_{α} 伴线,光谱带宽 $\Delta E = 4.7\text{--}4.75\text{ keV}$.若要得到光源真实光谱线的光强度信息,必须对测量光谱线的光强度进行“反卷积”处理.利用光源到探测器的距离、晶体积分衍射效率、谱仪传递函数、IP光子响应效率以及激光等离子体辐射X射线光强度所遵循角度余弦函数分布等^[20]参量,建立实验测量光谱线的光强度与激光等离子体辐射X射光强度的关系(有关这方面的工作将单独成文另作报道).

图5(a)是用球面弯晶谱仪获得的Ti等离子体辐射X射线能谱图.由于激光等离子体辐射X射线谱由两部分组成,在连续谱上叠加有线谱.从得到的谱线分布轮廓看,衍射本底计数很低,共振线和伴线轮廓比较分明,信噪比好,类He- K_{α} 线和类Li- K_{α} 伴线衍射峰的结构十分清晰,表明球面弯晶谱仪分辨本领很高.假设X射线衍射峰为高斯型

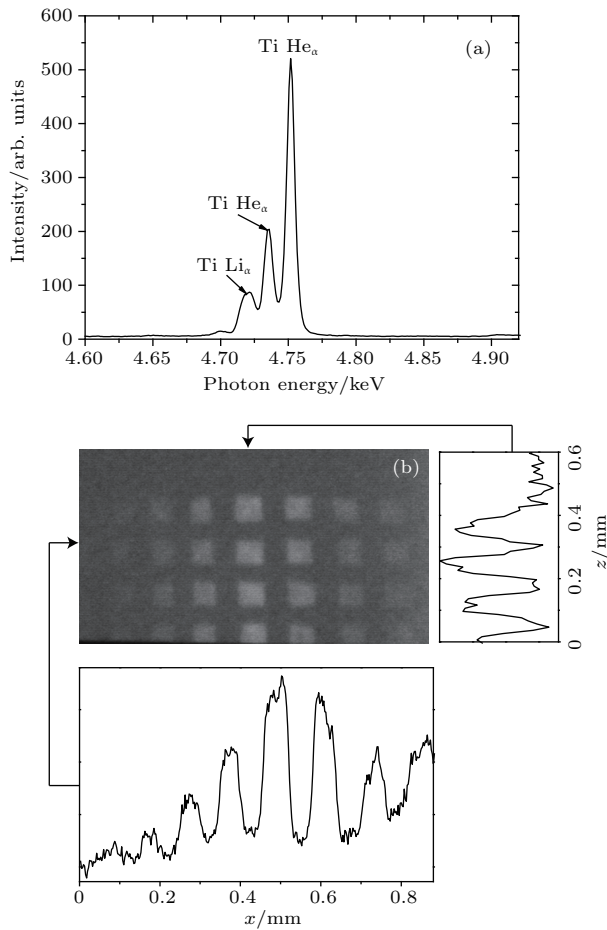


图5 X射线光谱及背光网格阴影成像图像 (a) Ti等离子体辐射~4.75 keV X射线光谱; (b) 与网格间隔600 mm处IP记录的X射线背光网格阴影成像图像

Fig. 5. Spectrum of X radiation and image of the grid formed by the quasi-monochromatic parallel beam: (a) Spectrum of X radiation emitted from the Ti plasma around 4.75 keV; (b) image of the grid formed by the quasi-monochromatic parallel beam. The grid is placed 600 mm from the IP.

分布, 对类He- K_α 线和Li- K_α 伴线衍射线谱进行高斯拟合, 两峰剥离后为孤立的类He- K_α 和Li- K_α 衍射线谱, 其光谱带宽($\Delta E/E$)为 1.5×10^{-3} — 3.2×10^{-2} . 在已知谱仪传递函数条件下, 推导了激光等离子体X射线源在某一波长的光子能量强度的求解公式, 并将该求解公式应用到图5(a)中, 得到了

类He- K_α 和Li- K_α 两衍射线谱的相对光强度之比为6.29. 由于伴线类Li- K_α 的光强度相对较小, 球面弯晶X射线衍射光束得到能谱的准单能化.

本轮实验是通过打靶来获得IP任意位置记录物像网格线直径差, 得到X射线衍射光束发散角的方法. 图5(b)为IP离金属网格600 mm处记录的200目金属网格图像. 基于X射线背光阴影网格成像原理, 假定网格位置(图3所示)的光束发散角为0, 图3中推出球面弯晶X射线衍射选单准直光束的发散角为

$$\beta = \arctan \left[\frac{(D - D_0)/2}{L} \right], \quad (3)$$

其中 D 为网格线像直径, D_0 为静态网格线直径, L 为IP接收面到网格的距离. 通过(3)式得到了该系统准直X射线光束的子午发散角为(5.69 ± 0.46) mrad; 弧矢发散角为(16.69 ± 0.6) mrad.

(1)式表明: 当布拉格角(θ)不等于 90° 时, 子午焦线和弧矢焦线是不重合的. 由于球面弯晶X射线衍射光束发散角与X射线能量相关联, 像散像差会干扰球面弯晶X射线衍射光束平行度的质量. 为了探究布拉格角对球面弯晶X射线衍射选单准直光束发散角的影响规律, 用纳秒(ns)激光驱动固体平面靶聚氯乙烯($[\text{CH}_2\text{-CHCl}]_n$, 简称PVC)生成氯(Cl)等离子体辐射X射线的类He离子跃迁特征谱线 $E = 2.78$ keV进行研究. 选用“晶格常数($2d$)为 4.5 \AA , 曲率半径为200 mm的球面弯晶+89.8 mm的物距+82.4°的布拉格角”的配置结构, 用IP记录. 在实验中, 得到了光束发散角小于2 mrad的X射线衍射准直光束, 其中子午发散角为(1.52 ± 0.16) mrad; 弧矢发散角为(1.86 ± 0.23) mrad. 子午发散角与弧矢发散角近似相等. 显然, 要减少子午方向和弧矢方向的X射线衍射光束发散角的差别, 布拉格角应保持尽量大. 表2列出了在不同布拉格角条件下, 球面弯晶X射线衍射选单准直光束发散角的结果.

表2 不同布拉格角条件下X射线束发散角

Table 2. Divergence angle of X-ray beam in different Bragg angle cases.

靶材	谱峰 K/keV	布拉格角 $\theta/(\circ)$	子午发散角 β_z/mrad	弧矢发散角 β_x/mrad	光源-晶体距离 p/mm
Ti	4.75	71.7	5.69 ± 0.46	16.69 ± 0.6	93.7
Cl	2.78	82.4	1.52 ± 0.16	1.86 ± 0.23	89.8

对于X射线背光成像,除了要求X射线光束发散角和单色性外,辐照均匀光斑尺寸(ϕ)也是关键指标之一.图6为球面弯晶X射线衍射准直光束的辐照光斑照片.从照片中,X射线衍射光束的光斑亮度中间强边缘弱.将图6沿着 z 方向选取150个像素点积分求平均,得到了球面弯晶X射线衍射光束的光斑沿 x 方向X射线源光强度分布,如图7所示.假定X射线衍射光束光斑光强度分布可近似等效为高斯型分布,取其半高全宽为光斑尺寸,得到了X射线衍射光束光斑为1.68 mm.若规定光强度曲线从最大值下降20%处的高宽值来估算匀照区域的方法,得到了匀斑有效直径 $\phi \sim 500 \mu\text{m}$.

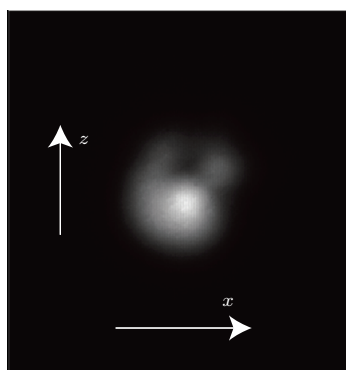


图6 没有网格时IP记录的X射线光斑照片

Fig. 6. Photograph of X-ray spot recorded by IP without grid.

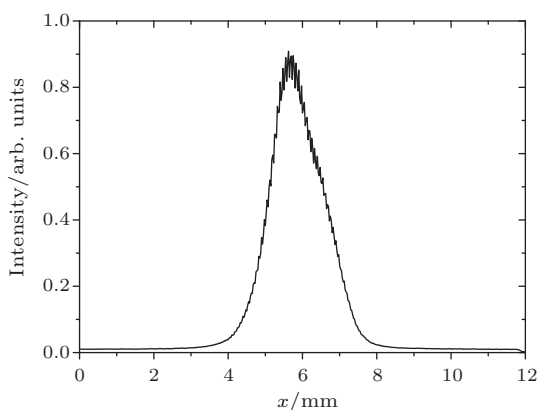


图7 沿图6 x 轴方向的X射线光强度分布

Fig. 7. X-ray intensity distribution along x axis from Fig. 6.

而球面镜几何成像像差有五类:球差、彗差、像散、场曲和畸变.对于物点放在对称轴上成像,只有球差,对于物点在轴外,存在上述五种像差.如图1所示的布局是典型的轴外成像,而最大的差异出现有双焦点.以下分析是基于球面镜聚焦原理产生双焦点而影响X射线衍射光束发散角的原因.采

用解析方法估算像散比较复杂,这里选择了最简单的光线追迹方法.由于像散在于子午和弧矢方向产生光束发散度权重是不一样的,若子午面由焦点处发出的一个理想球面波可以成像在无穷远处,而同一个理想球面波在弧矢面内是无法匹配实现在无限远处成像,而是聚焦于多个焦点,并且子午(z 轴方向,晶体衍射方向)光束发散角小,弧矢(x 轴方向)光束发散角大.若布拉格角变大,除有光束发散度总体要变小外,子午发散角和弧矢发散角差别也要变小.像散差会影响到X射线衍射准直光束的整体性能.但如何减少像散差对球面弯晶X射线衍射光束发散角的影响,将是继续研究的主要问题.

需要指出的是,本轮实验确实尚有些因素未能考虑清楚,存在数据置信度问题.可值得质疑置信度的最大问题是由于真实的X射线光源并非理想点光源,不能忽略尺度,光源深度和面度都会导致光束发散角增大;其次,晶体表面粗糙度和有限孔径将会影响到X射线光束发散角;第三,晶体衍射表面形状和几何误差可能造成光束发散角增大,曲率半径误差会产生散焦或聚焦位置漂移.因此,在“神光II”激光装置上的本轮实验尽管获得了准单色近平行光束X射线的实验数据,但X射线衍射光束特性的实验结论仍然远远不足以让人信服,对于目前的情况,尚有待改进.在今后的实验研究中,如何通过优化系统结构和界定实验的具体参数,以提高输出X射线光束匀斑和减少光束发散角,将是获取优质准单色近平行光束的X射线光源的必然要求,也是研究的主要内容.

5 结 论

本文提出了一种利用激光等离子体产生准单色近平行光束的X射线光源方法.设计了利用球面弯晶X射线衍射选单来获得准直光束的系统,并给出了设计原则和参数要求.在“神光II”激光装置上,完成了激光等离子体X射线辐射选单准直光束的实验验证,得到了准单色($10^{-3} < \Delta\lambda/\lambda < 10^{-2}$)、光束发散角小于2 mrad和辐照匀斑有效直径 $\phi \sim 500 \mu\text{m}$ 的X射线光源.同时研究发现,布拉格角会影响球面弯晶X射线衍射光束发散度,从而对球面弯晶X射线衍射光束的整体性能有着重要影响.若要获取良好的X射线

选单准直性能, 系统设计过程中必须合理给定布拉格角. 优化设计结果表明, 控制布拉格角范围有望进一步获得发散角优于 1 mrad、辐照匀斑直径 $\phi > 500 \mu\text{m}$ 的 X 射线光源.

感谢重庆大学光电工程学院肖沙里教授和神光 II 激光装置运行组成员的大力协助.

参考文献

- [1] Zhao Z Q, He W H, Wang J, Hao Y D, Cao L F, Gu Y Q, Zhang B H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 104202
- [2] Yi T, Wang C K, Yang J W, Zhu X L, Xie C Q, Liu S Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 165201 (in Chinese) [易涛, 王传珂, 杨进文, 朱效立, 谢常青, 刘慎业. 2016 物理学报 **65** 165201]
- [3] Wang C, Zhang G P, Zheng W D, Qiao X M, Fang Z H, Sun J R, Wang W, Xiong J, Fu S Z, Gu Y, Wang S J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6264 (in Chinese) [王琛, 张国平, 郑无敌, 乔秀梅, 方智恒, 孙今人, 王伟, 熊俊, 傅思祖, 顾援, 王世绩. 2009 物理学报 **58** 6264]
- [4] Lang J C, Srajer G, Wang J, Lee P L 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 4457
- [5] Zhang Q Q, Wei L, Yang Z H, Qian F, Chen Y, Cao L F 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 1234001 (in Chinese) [张强强, 魏来, 杨祖华, 钱风, 陈勇, 曹磊峰. 2016 光学学报 **36** 1234001]
- [6] Babacar D, Vu Thien B 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 094704
- [7] Huang K, Yan W C, Li M H, Tao M Z, Chen Y P, Chen J, Yuan X H, Zhao J R, Ma Y, Li D Z, Gao J, Chen L M, Zhang J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 205204 (in Chinese) [黄开, 闫文超, 李明华, 陶孟泽, 陈燕萍, 陈洁, 远晓辉, 赵家瑞, 马勇, 李大章, 高杰, 陈黎明, 张杰. 2013 物理学报 **62** 205204]
- [8] Li F Z, Liu Z G, Sun T X 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 093106
- [9] Henke B L, Gullikson E M, Davis J C 1993 *At. Data Nucl. Data Tables* **54** 181
- [10] Chen J P, Wang J Y, Zou J, Lü H Y, Hu X D, Xu Y 2017 *Nucl. Instrum. Meth. A* **870** 19
- [11] Wilkins S W, Stevenson A W 1988 *Nucl. Instrum. Meth. A* **269** 321
- [12] Protopopov V, Shishkov V A, Kalnov V A 2000 *Rev. Sci. Instrum.* **71** 4380
- [13] Wilkins S B, Spencer P D, Hatton P D, Tanner B K, Lafford T A, Spence J, Loxley N 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 2666
- [14] Korotkikh E M 2006 *X-Ray Spectrom.* **35** 116
- [15] Hraý J, Oberta P 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 073105
- [16] Nishikino M H, Sato K S, Hasegawa N, Ishino M H, Ohshima S S, Okano Y, Kawachi T Y, Numasaki H, Teshima T, Nishimura H 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 026107
- [17] Sanchez del Rio M, Fraenkel M, Zigler A, Faenov A Ya, Pikuz T A 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 1614
- [18] Chen C, Tong Y J, Xie H L, Xiao T Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 104102 (in Chinese) [陈灿, 佟亚军, 谢红兰, 肖体乔. 2012 物理学报 **61** 104102]
- [19] X-ray database, The Center for X-ray Optics, see <http://www.cxro.lbl.gov> [2018-4-30]
- [20] Gerritsen H C, van Brug H, Bijkerk F, van der Wiel M J 1986 *J. Appl. Phys.* **59** 2337

X-ray source with quasi-monochromatic parallel beam*

Wang Rui-Rong[†] An Hong-Hai Xiong Jun Xie Zhi-Yong Wang Wei

(Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China)

(Received 1 May 2018; revised manuscript received 18 November 2018)

Abstract

In inertial confined fusion experiments, an excellent-performance and high-efficiency X-ray source plays an important role in X-ray radiography schemes. Indeed, it can be used in a variety of X-ray experimental techniques. The monochromaticity, flux intensity, degree of collimation (the radiation can be transported long distances without loss), and spot size of the X-ray source affect the quality of imaging. Ray-tracing simulations, which are validated by experimental results, demonstrate that high-intensity collimated X-ray beams can be produced from an isotropic X-ray source. Therefore, a method of improving the performance of an X-ray source from a laser-produced plasma is presented. A spherically bent crystal is used to collimate mono-chromatic X-rays emitted from a laser-produced plasma. Here we design a spherically bent crystal spectrometer system for collimating the laser-produced X-rays. The system performance is experimentally tested at the Shenguang II (SGII) laser facility located in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. The beam divergence is measured by using a metal grid placed downstream from the crystal, the metal grid that possesses wires with 60 μm in diameter and 127 μm in period. An imaging plate (IP) is placed at various distances downstream from grid. The quality of the generated beam is monitored by measuring the dimensions of the grid image formed by the beam on IP. While the narrow range of wavelength is measured with a spherically bent crystal spectrometer. Experimental results show that the spherically bent crystal spectrometer system can produce quasi-monochromatic ($10^{-3} < \Delta\lambda/\lambda < 10^{-2}$) X-ray beams with a high degree of collimation (less than 2 mrad divergence), uniform spot size ($\sim 500 \mu\text{m}$), and a relative tenability in the wide spectral range. The influences of various experimental parameters on the quality of beam collimation are evaluated in two ways. They can be investigated in test experiments by representing the beam divergence distribution as a function of Bragg angle. In another study of the effect of the aberrations, when the incident beam on the spherically bent crystal is not normal, the beam is less collimated in the tangential plane, and out of collimation in the sagittal plane. Following the ray-tracing method, we analyze the diffracted beam divergence produced by the astigmatic aberration. The qualitative conclusion is that the good agreement with the experimental results is obtained. By fully utilizing limited Bragg angle range, the spherically bent crystal spectrometer system can realize collimated diffracted X-ray beams with divergence of less than 1 mrad by using a laser-produced plasma X-ray source under the appropriately experimental parameters.

Keywords: X-ray source, monochromatic diffraction, collimated beams

PACS: 07.85.-m, 61.05.cp, 87.56.nk

DOI: 10.7498/aps.67.20180861

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11575168).

[†] Corresponding author. E-mail: wangrr59@sina.com