

钛靶 X 射线超环面晶体衍射高分辨率聚焦诊断技术研究

姚童¹, 黎森^{1*}, 施军², 尚万里³, 杨祖华³, 王峰³, 杨国洪³, 韦敏习³, 孙奥³

¹重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065;

²重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

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 针对等离子体 X 射线成像诊断高空间分辨率的需求, 本文提出了一种基于超环面石英晶体衍射聚焦元件的钛靶 X 射线高分辨率聚焦成像结构, 研究分析了超环面晶体成像的原理及特性。为证明超环面晶体具有高空间分辨率特性, 基于 X 射线衍射追迹原理对球面及超环面晶体的 X 射线衍射进行性能仿真, 在保持射线源及成像物体不变的条件下, 对比分析了不同晶体面形结构的衍射成像结果, 计算得到球面晶体和超环面晶体在弧矢方向上的成像空间分辨率分别约为 $40\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 。仿真结果表明超环面晶体作为 X 射线衍射分光元件较传统的球面晶体具有强聚焦、高空间分辨率的特点, 是较为理想的 X 射线衍射分光元件。此外, 本文利用特征峰能量为 $4.75\ \text{keV}$ 的钛靶激光装置、IP 板以及超环面石英晶体完成了 X 射线背光成像实验研究, 其中超环面石英晶体的子午面和弧矢面半径分别为 $295.6\ \text{mm}$ 和 $268.5\ \text{mm}$, 晶格常数 $2d=0.2749\ \text{nm}$, 实验获得了清晰的栅格成像图。实验结果表明该超环面石英晶体能够对钛靶 X 射线进行衍射成像, 并能获得较高的成像空间分辨率。实验中获得的超环面石英晶体衍射的最终成像空间分辨率为 $10\ \mu\text{m}$ 。

关键词 材料; 超环面石英晶体; X 射线衍射; 聚焦; 成像空间分辨率

中图分类号 O536

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2103002

1 引言

惯性约束聚变反应(ICF)是解决人类资源短缺问题的一道曙光。惯性约束聚变反应依靠激光驱动实现受控核聚变, 利用内爆产生的物质向心运动惯性约束高温等离子体, 完成核聚变反应并释放出能量^[1-3]。基于惯性约束聚变反应产生的聚变能是一种高效且相对清洁的能源。在惯性约束聚变反应的实验研究中, 通常需要对微弱 X 射线信号进行聚焦成像诊断。晶体具有内部原子周期性规则排列以及晶格间距与 X 射线波长数量级相近的特性, 将晶体作为分光元件应用于 X 射线衍射谱仪可以获得 X 射线源的相关信息^[4-6], 因此晶体谱仪是光谱诊断仪

器中重要的组成部分^[7-9]。

目前, 随着我国激光惯性约束聚变研究的不断深入, 各种实验装置也在不断升级和发展。复旦大学现代物理研究所的 Yang 等^[10]设计制作了一种高精度平面晶体谱仪(简称“平晶谱仪”)。采用平面晶体作为分光元件的平晶谱仪是一种最简单的 X 射线光谱诊断仪器, 其以结构简单、加工难度小等优点被广泛应用于 X 射线光谱分析实验研究中。然而, 在实验过程中, 平晶谱仪的射线收集效率较低且谱线强度较弱, 不具备射线聚焦能力; 此外, 平晶谱仪所获得的光谱分辨率在很大程度上受到光源尺寸的影响, 达不到高分辨率的诊断效果。为了解决平晶谱仪存在的缺点, 曲面弯晶谱仪得到了广泛研

收稿日期: 2021-03-02; 修回日期: 2021-03-25; 录用日期: 2021-04-15

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

通信作者: *limiao@cqupt.edu.cn

究^[11-13]。在目前所研制的弯晶谱仪中,大多数采用的分光晶体是圆柱面弯晶^[14]、球面弯晶^[15]、圆锥面弯晶^[16]以及椭圆面弯晶^[17],使用这几类曲面晶体作为谱仪的分光元件可以增强谱仪的聚焦性能和衍射效率。但将这几类类型的弯晶作为分光晶体时仍存在一些问题。例如:圆柱面弯晶谱仪不适用于耦合条纹相机的时间分辨诊断实验,其原因在于条纹相机尺寸较大,为避免与其他诊断设备发生干扰,通常要求探测平面与圆柱对称轴相互垂直。圆锥面弯晶谱仪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:1)球差的存在展宽了像的横向尺寸,影响谱仪的空间聚焦性能;2)相同波长的 X 射线在成像面上存在散焦现象,影响谱仪的光谱分辨能力。球面弯晶谱仪在子午面和弧矢面上的两个散焦线不重合,使用球面弯晶进行自发光成像时,会存在较大的像差;此外,两个焦点的距离随着布拉格角的减小而增大,因此应用球面弯晶进行自发光成像时,布拉格角需要接近 90°,从而限制了成像能谱的选择范围。因此,研制一种既具有强聚焦性能又有着高分辨率的 X 射线诊断晶体谱仪是目前性能不断提升的惯性约束聚变反应装置对等离子体 X 射线诊断技术的迫切需求。

本文设计了超环面石英晶体,该晶体能够对特征峰能量为 4.75 keV 的钛靶 X 射线进行聚焦成像。仿真及实验结果表明,钛靶 X 射线经该超环面石英晶体衍射后,在弧矢面和子午面上具有较好的成像聚焦性能,能够获得具有高空间分辨率的成像结果图。

2 超环面晶体衍射成像参数设计

应用晶体进行背光成像时,晶体材料与 X 射线能量必须符合晶体 X 射线衍射理论。当 X 射线沿着与晶面成 θ 角的方向入射至晶体,且晶面间衍射线的光程差为波长的整数倍时,相邻晶面的衍射线之间就会相互干涉,光强增强。被衍射的 X 射线满足布拉格衍射条件^[18],即

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \quad (1)$$

式中: λ 为 X 射线的波长; d 为晶面间距; n 为衍射阶次; θ 为布拉格角。

目前,球面晶体已被广泛应用于 X 射线衍射成像系统中,其成像原理可根据罗兰圆结构进行解释,如图 1 所示。 p 为成像物体到晶体中心的距离; q 为射线源在子午面上的聚焦点到晶体中心的距

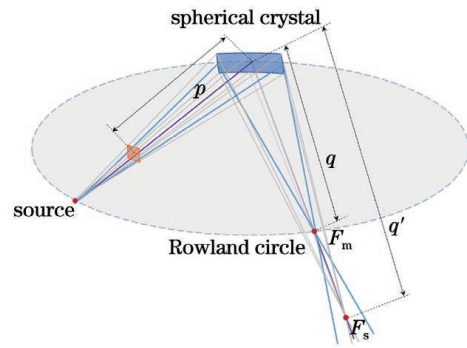


图 1 球面晶体结构成像原理图

Fig. 1 Imaging schematic of spherical crystal

离,也是光谱探测的最佳位置; q' 是射线源在弧矢面上的聚焦点到晶体中心的距离。罗兰圆直径与球面晶体的曲率半径 R 相等, X 射线源在罗兰圆上一点发出的满足布拉格条件的 X 射线经球面晶体衍射后仍在罗兰圆上一点 (F_m) 聚焦,罗兰圆所在平面即为子午面。然而,在垂直于罗兰圆平面的弧矢面上,球面晶体相当于一个凹面镜,可将 X 射线聚焦在该平面的焦点 F_s 处。根据透镜成像公式,在子午面和弧矢面分别有

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

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q'} = \frac{2 \sin \theta}{R}. \quad (3)$$

对于球面晶体衍射而言,由于子午面和弧矢面上的成像焦点不在同一位置,采用球面晶体进行背光成像时,最终的成像结果图中会存在较大的像差。为了尽可能地减小成像像差,(2)、(3)式中的 q 和 q' 的值必须近似相等,此时晶体衍射的布拉格角接近 90°。因此,应用球面晶体进行背光成像时,若要获得高质量的成像结果图,晶体的布拉格角需要接近 90°,这限制了 X 射线的能量选择范围。

为了弥补球面晶体在 X 射线衍射成像系统中的不足,本文提出了一种新型的超环面结构晶体,超环面晶体成像系统如图 2 所示。与球面晶体结构的

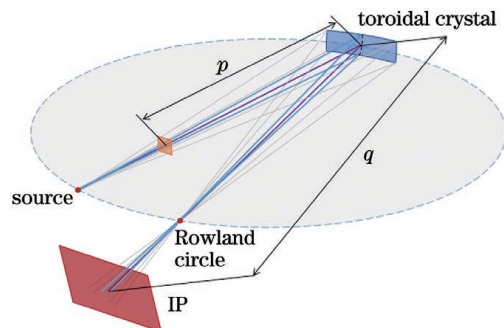


图 2 超环面晶体结构成像原理图

Fig. 2 Imaging schematic of toroidal crystal

不同之处在于,超环面晶体结构在子午面和弧矢面上具有不同的曲率半径,子午面和弧矢面的半径分别为 R_m 和 R_s 。因此,基于球面晶体结构的成像原理,超环面晶体在子午面和弧矢面上的成像公式分别为

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R_m \sin \theta}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2 \sin \theta}{R_s}. \quad (5)$$

超环面晶体要求弧矢面及子午面上的射线在同一焦点处聚焦,因此弧矢及子午方向的曲率半径满足关系式

$$\sin^2 \theta = R_s / R_m, \quad (6)$$

所以制作超环面晶体就必须使弧矢面及子午面的曲率半径之比保持固定值,该值只与布拉格角有关。当满足(6)式时,所得到的子午面和弧矢面上的像将在同一位置聚焦,系统的成像放大倍数可以简单地表示为

$$M = q/p. \quad (7)$$

该公式在子午和弧矢方向上都适用。对于超环面晶体,弧矢面与子午面的放大倍数是一致的。

在给定 X 射线能量的条件下,超环面晶体可以通过优化曲率半径来减少图像像散,这一功能使得人们可在不同 X 射线能量下对聚爆等离子体进行高分辨率成像分析。

3 X 射线衍射追迹仿真

在晶体衍射成像系统设计过程中,进行射线追迹是十分必要的。射线追迹用于确定射线束从射线源发出后经由成像物体并在晶体面衍射后位于成像面上的准确位置。对于不同的 X 射线入射结构,科研人员采用了不同的光线追迹程序^[19]。本文利用自主研发的射线衍射仿真程序^[20]对设计的超环面晶体成像系统进行晶体衍射聚焦模拟成像实验。在 X 射线晶体衍射聚焦仿真过程中,根据给定能量范围的 X 射线的空间、角度、能量分布,采用蒙特卡罗方法建立特定的 X 射线源,采用基于多层近似法(multi-lamellar method)的动力学衍射方程对 X 射线在弯曲形变超环面晶体衍射聚焦元件中的衍射过程进行计算,最终获得了 X 射线在给定系统空间中的传播轨迹以及指定探测器平面上衍射聚焦 X 射线的空间分布及强度信息。已知钛靶的 K_α 射线波长为 0.262 nm,因此选用晶面间距 $2d=0.2749$ nm 的石英(2023)作为衍射聚焦晶体。根据上述(1)~

(7)式确定晶体衍射布拉格角为 72.3° ,石英超环面晶体的子午面半径为 295.6 mm,弧矢面半径为 268.5 mm(与实际测试制作的衍射晶体参数一致)。成像系统仿真装置如图 3 所示。设定理想成像关系满足(4)、(5)式,射线源到晶体中心的距离为 281.6 mm,选用 3×3 金属栅格作为成像目标,栅格大小为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ (间隔 $50 \mu\text{m}$),金属栅格到晶体中心的距离为 170 mm,成像面到晶体中心的距离为 850 mm,设定射线源是直径为 $0.5 \mu\text{m}$ 的点源(即近似为理想点源),不考虑射线源尺寸对最终成像结果的影响。

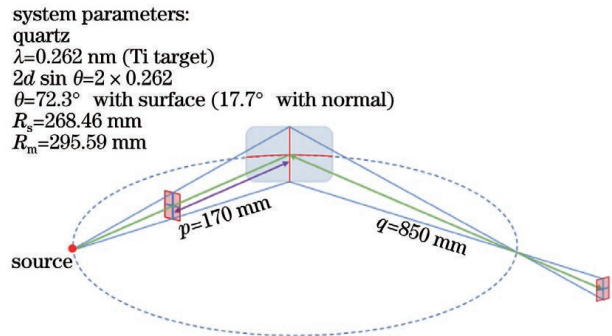


图 3 成像系统的仿真装置图

Fig. 3 Simulated device diagram of imaging system

本文对材料相同的球面晶体(半径为 295.6 mm)和超环面晶体进行了 X 射线衍射仿真成像对比实验。图 4 所示为相同材料的球面晶体和超环面晶体的成像结果。从图 4(a)中可以看出,X 射线经球面晶体衍射后的聚焦成像图在子午方向(Z 轴),各栅格之间的分界线明显,栅格在子午方向上的长度约为 $500 \mu\text{m}$,是成像物体金属栅格长度的 5 倍,满足(7)式所示的成像放大倍数关系。这说明球面晶体在子午方向上具有较高的分辨率。在弧矢方向(X 轴),成像栅格长度约为 $1000 \mu\text{m}$,不满足成像放大倍数关系且成像栅格纵横比约为 2,整体成像栅格发生严重形变,弧矢方向的成像栅格严重展宽,导致成像栅格在弧矢方向出现缺失,成像面最终只接收到 3×3 阵列栅格中的一列。综上,X 射线经球面晶体衍射后在弧矢方向上的聚焦性能不明显,存在明显像差,从而影响了最终的成像空间分辨率。

从图 4(b)可以看出,X 射线经超环面晶体衍射后的聚焦成像图在子午和弧矢方向都具有较好的成像空间分辨率,两个方向上的栅格都能清楚地分辨,且成像栅格在两个方向上的长度均为 $500 \mu\text{m}$,满足成像放大倍数关系,栅格纵横比约为 1,成像栅格形状几乎没有形变。仿真结果表明,与传统球面

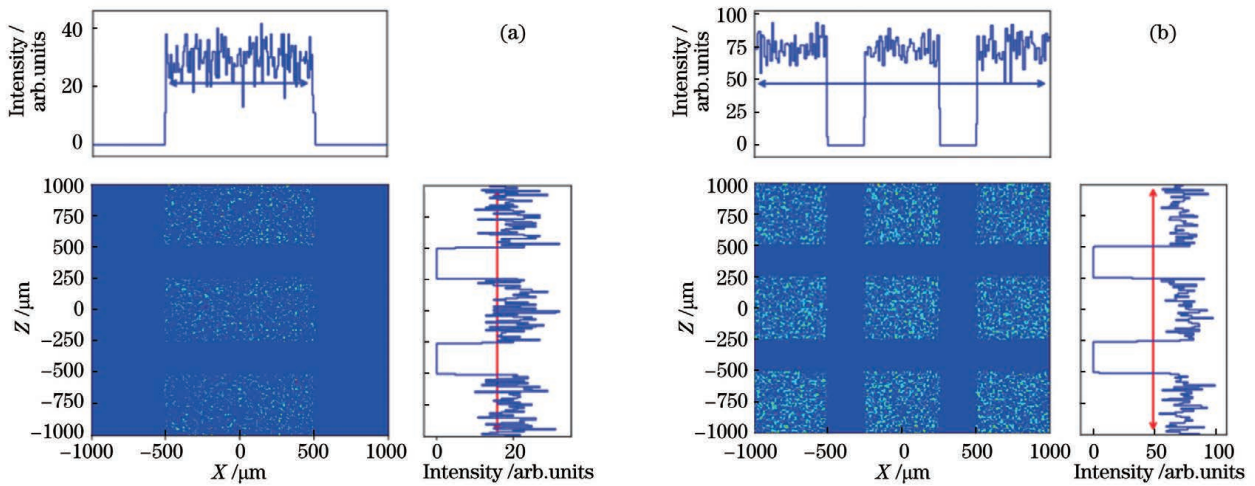


图 4 仿真成像结果对比图。(a) 球面晶体成像图；(b) 超环面晶体成像图

Fig. 4 Comparison charts of simulated imaging results. (a) Image of spherical crystal; (b) image of toroidal crystal

晶体相比,用新型超环面石英晶体作为 X 射线衍射分光元件具有强聚焦、高空间分辨率的特点,是较为理想的 X 射线衍射分光元件。

依据图 4 成像图上方及右边的曲线图可以分析球面晶体及超环面晶体成像的空间分辨率。波峰表示 X 射线透过金属栅格的部分,波谷则表示 X 射线被金属栅格遮挡的部分。空间分辨率的计算公式为^[21]

$$\sigma = l/M, \quad (8)$$

式中: l 为光谱强度从其峰值的 20% 上升至峰值的 80% 所对应的成像面栅格长度。由(8)式计算所得的空间分辨率只是一个近似估算值。利用 Origin 软件对所得仿真成像结果进行数据处理,可以得到球面晶体和超环面晶体沿弧矢、子午方向的 X 射线谱线强度与栅格位置的关系,如图 5 所示。依据

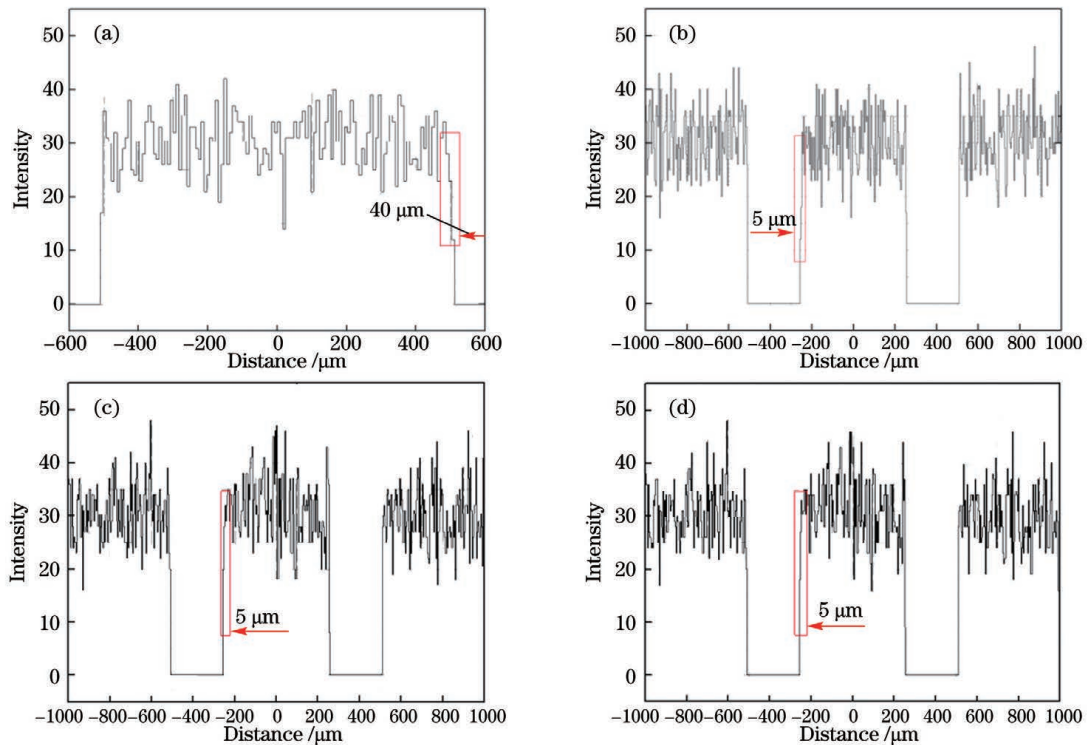


图 5 仿真成像谱线的对比图。(a) 球面晶体在弧矢面上的成像谱线；(b) 超环面晶体在弧矢面上的成像谱线；(c) 球面晶体在子午面上的成像谱线；(d) 超环面晶体在子午面上的成像谱线

Fig. 5 Comparison charts of simulated imaging spectra. (a) Imaging spectrum of spherical crystal in sagittal plane; (b) imaging spectrum of toroidal crystal in sagittal plane; (c) imaging spectrum of spherical crystal in meridional plane; (d) imaging spectrum of toroidal crystal in meridional plane

(8)式可以计算出球面晶体和超环面晶体在弧矢、子午方向上的图像空间分辨率,其中球面晶体在子午和弧矢方向的空间分辨率分别约为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$,超环面晶体在子午、弧矢方向的空间分辨率近似相等,均约为 $5\ \mu\text{m}$ 。根据分辨率计算结果可知超环面晶体在子午、弧矢方向都可以达到较高的空间分辨率,且在两个方向上的分辨能力近似相等;然而,球面晶体在子午方向上能够得到较高的空间分辨率,但在弧矢方向上的成像结果发散严重,空间分辨能力较差。对比分析球面晶体和超环面晶体的空间分辨率可知,球面晶体在子午方向上的空间分辨能力与超环面晶体的近似相等,而在弧矢方向上的空间分辨能力与超环面晶体还存在较大差距。

为了进一步证明超环面晶体的强聚焦特性,本文对球面晶体和超环面晶体分别进行了聚焦成像仿真分析。在实验中设定具有一定尺寸的射线源(半径为 $50\ \mu\text{m}$ 的圆形光斑),分别记录射线源发射的 X 射线经球面晶体和超环面晶体衍射后的聚焦成像

图,衍射晶体参数与空间分辨率仿真实验中的参数一致,最终得到的结果图如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出,半径为 $50\ \mu\text{m}$ 的圆形光斑经球面晶体衍射后的光斑成像在子午面和弧矢面上的尺寸存在差异,子午面能够较好地聚焦还原最初设定的射线源,射线集中区域的宽度约为 $50\ \mu\text{m}$,而弧矢面上的射线存在严重的散焦现象,射线集中区域的宽度约为 $800\ \mu\text{m}$ 。子午面和弧矢面上聚焦程度的差异使得最终的射线源成像图存在形变,射线源在弧矢面上展宽,射线源形状近似为一个椭圆。根据图 6(b)所示的超环面晶体射线源聚焦成像图可知,半径为 $50\ \mu\text{m}$ 的圆形光斑经超环面晶体衍射后能够较好地完成光斑的聚焦成像,成像光斑的尺寸近似于射线源所设定的大小,且子午面和弧矢面上的成像光斑尺寸几乎相等。由射线源聚焦成像仿真实验可知本文提出的超环面石英晶体具有较强的聚焦特性,能够对射线源进行聚焦成像,从而提高最终的射线强度,便于后续数据处理分析。

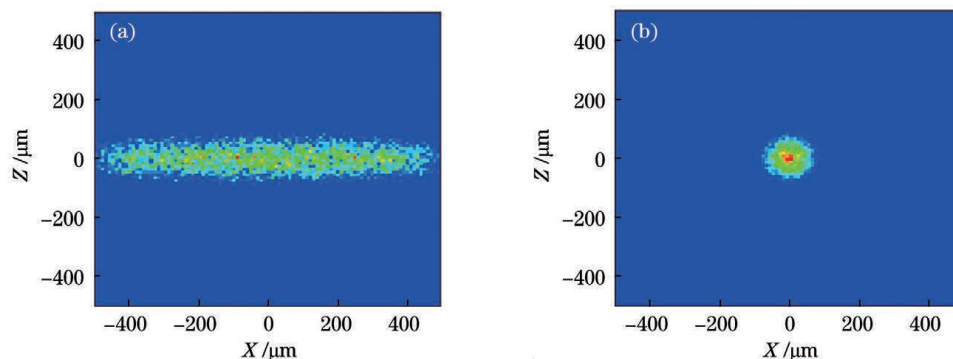


图 6 射线源聚焦成像结果。(a)射线源经球面晶体衍射后的聚焦成像;(b)射线源经超环面晶体衍射后的聚焦成像

Fig. 6 Focus images of radiation source. (a) Focus image of radiation source diffracted by spherical crystal; (b) focus image of radiation source diffracted by toroidal crystal

4 超环面晶体 X 射线成像实验

目前,激光装置在我国得到了长足发展^[22-24]。石英晶体的衍射效率相对于硅晶体要弱很多,为了验证超环面晶体谱仪的成像能力,本文在脉宽为 $920\ \text{ps}$ 、能量为 $1137.34\ \text{J}$ 的钛靶激光装置上完成了衍射聚焦成像实验。 K_α 射线中心波长为 $0.262\ \text{nm}$,核心成像元件为石英超环面晶体($2d = 0.2749\ \text{nm}$),其子午与弧矢半径分别为 $295.6\ \text{mm}$ 和 $268.5\ \text{mm}$,晶体的布拉格角为 72.3° 。加工完成的石英超环面晶体如图 7 所示。成像目标为 3×3 金属栅格,栅格尺寸为 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ (间隔 $50\ \mu\text{m}$);成像面采用 X 射线 IP 板。根据成像光路

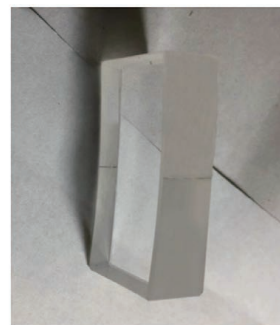


图 7 石英超环面晶体实物图

Fig. 7 Photo of quartz toroidal crystal

校准要求,X 射线源、超环面晶体中心与 IP 板中心均都在同一平面上。

实验中的曝光时间为 $300\ \text{s}$,射线源到晶体中心

的距离为 190 mm, 金属栅格到晶体中心的距离 $p = 170$ mm, 接收装置 IP 板的像素尺寸为 $25 \mu\text{m}$ 。为了减小 X 射线及其他杂散光的影响, 成像前端放置了铝膜滤片, 成像面到晶体中心的距离 $q = 850$ mm, 根据(7)式可知成像放大倍数为 5。激光装置上的实际成像结果如图 8 所示, 可以看出, 射线源发出的 X 射线的强度不均匀, 图中左上方射线强度较高。从图中还可以明显观察到网格整体基本没有发生变形, 纵横比一致, 在子午面和弧矢面上的图像放大倍数约为 5, 与预期仿真结果接近, 实验测试所得网格图样清晰。依据成像结果数据, 采用(8)式可以计算得到图像的空间分辨率约为 $10 \mu\text{m}$, 该结果与仿真成像数据计算结果存在一定差异, 其原因有以下几点: 1) 仿真成像系统中的超环面晶体为理想晶体, 此时晶体对特定波长的 X 射线的衍射为镜面反射, 不存在 X 射线穿透力引起的几何像差; 2) 仿真成像系统中的射线源为理想点源, 没有考虑射线源尺寸对成像空间分辨率的影响; 3) 晶体内在缺陷和表面形变使射线传播路径发生偏移, 从而引起了散焦现象。

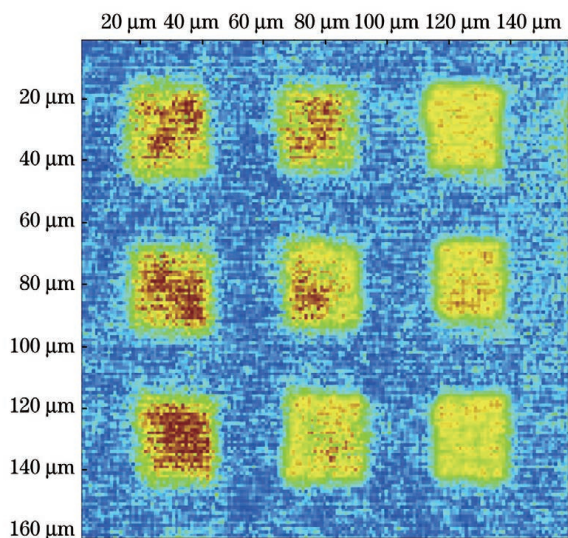


图 8 石英超环面晶体的背光成像结果

Fig. 8 Backlight imaging results of quartz toroidal crystal

此外, 利用相关软件对所得石英超环面晶体的背光成像图进行数据处理, 得到了弧矢面上的 X 射线的相对强度与栅格位置的关系, 如图 9 所示。根据(8)式计算得出石英超环面晶体在弧矢面上的成像空间分辨率为 $10 \mu\text{m}$ 。背光成像系统的相关成像参数如表 1 所示。最终的成像分辨率受射线源尺寸的影响, 射线源的尺寸越小, 图像的空间分辨率越高。

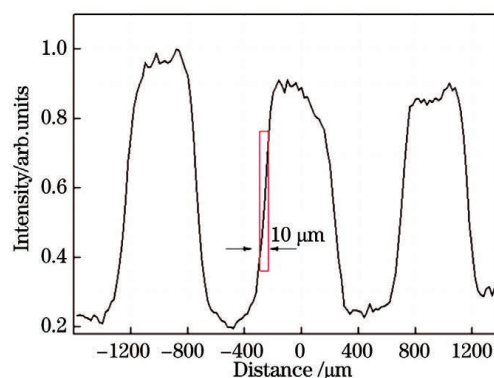


图 9 成像面上的谱线强度分布

Fig. 9 Intensity distribution of spectrum on imaging surface

表 1 背光成像系统的成像参数

Table 1 Imaging parameters of backlight imaging system

Imaging parameter	Content
System magnification M	5
Field of view	31.12 mm (meridional) \times 28.26 mm (sagittal)
Spatial resolution / μm	10
Collection solid angle / sr	0.0079

5 结 论

本文提出了一种超环面石英晶体, 并将其与同种材料的球面晶体在相同的参数条件下进行了 X 射线衍射追迹仿真研究, 通过对比分析经两种不同面形晶体衍射后的成像结果, 发现 X 射线经超环面晶体衍射后的聚焦成像图在子午和弧矢方向上都具有较高的成像空间分辨率, 且在两个方向上的金属网格都能清楚地分辨, 且成像金属网格几乎没有变形; 通过成像结果数据计算可获得仿真成像的空间分辨率约为 $5 \mu\text{m}$ 。

利用激光装置钛靶作为射线源, 对超环面石英晶体衍射成像效果进行测试, 通过背光成像实验获得子午面和弧矢面放大倍数均为 5 的聚焦成像图, 根据成像结果数据计算得出石英超环面晶体的 X 射线衍射成像空间分辨率可达 $10 \mu\text{m}$ 。仿真成像空间分辨率与实测成像空间分辨率存在一定差异, 该差异源于实际射线源的尺寸、几何像差以及晶体缺陷。本课题组拟计划在后续研究中针对以上几个影响最终成像空间分辨率大小的因素进行具体讨论。

综上所述, 本文所提出的超环面石英晶体具有强聚焦以及高空间分辨率的特点, 可以满足对高能量密度等离子体进行光谱诊断的要求。

参 考 文 献

- [1] Jiang S E, Wang F, Ding Y K, et al. Experimental progress of inertial confinement fusion based at the ShenGuang-III laser facility in China [J]. Nuclear Fusion, 2019, 59(3): 032006.
- [2] Hall G N, Burdiak G C, Suttle L, et al. Monochromatic radiography of high energy density physics experiments on the MAGPIE generator [J]. The Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11): 11D608.
- [3] Xu T, Shang W L, Wei H Y, et al. Resolvability experiments of shock ignition implemented on Shenguang III prototype laser facility [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(5): 97-103.
徐涛, 尚万里, 魏惠月, 等. 基于神光 III 原型装置的冲击点火分解实验 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(5): 97-103.
- [4] Yang G H, Wei M X, Hou L F, et al. Calibration of characteristic parameters for X-ray plane crystal on the automatic X-ray diffractometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(9): 1090-1093.
杨国洪, 韦敏习, 侯立飞, 等. 基于 X 射线衍射仪的 X 光晶体本征参量的标定 [J]. 光子学报, 2012, 41(9): 1090-1093.
- [5] Yang G H, Zhang J Y, Zhang B H, et al. Analysis of fine structure of X-ray spectra from laser-irradiated gold dot [J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(12): 2389-2393.
杨国洪, 张继彦, 张保汉, 等. 金激光等离子体 X 射线精细结构谱研究 [J]. 物理学报, 2000, 49(12): 2389-2393.
- [6] Zheng Z J, Ding Y K, Ding Y N, et al. Recent progress and application of diagnostic technique in laser fusion [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2003, 15(11): 1073-1078.
郑志坚, 丁永坤, 丁耀南, 等. 激光-惯性约束聚变综合诊断系统 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(11): 1073-1078.
- [7] Stoeckl C, Bedzyk M, Brent G, et al. Soft X-ray backlighting of cryogenic implosions using a narrowband crystal imaging system [J]. The Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11): 11E501.
- [8] Haugh M J, Wu M, Jacoby K D, et al. Measuring the X-ray resolving power of bent potassium acid phthalate diffraction crystals [J]. The Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11): 11D619.
- [9] Seely J F, Glover J L, Hudson L T, et al. Measurement of high-energy (10–60 keV) X-ray spectral line widths with eV accuracy [J]. The Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11): 11D618.
- [10] Yang Y, Xiao J, Lu D, et al. A high precision flat crystal spectrometer compatible for ultra-high vacuum light source [J]. The Review of Scientific Instruments, 2017, 88(11): 113108.
- [11] Shi J, Li M, Luo L D Y, 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Shah K, Chowdhuri M B, Shukla G, et al. Design of tangential X-ray crystal spectrometer for Aditya-U tokamak [J]. The Review of Scientific Instruments, 2018, 89(10): 10F115.
- [15] Jahrman E P, Holden W M, Ditter A S, et al. Vacuum formed temporary spherically and toroidally bent crystal analyzers for X-ray absorption and X-ray emission spectroscopy [J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(1): 013106.
- [16] Robledo J I, Pérez C A, Sánchez H J. A compact high-resolution spectrometer based on a segmented conical crystal analyzer [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(4): 043105.
- [17] 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(9): 093109.
- [18] Bragg W L. The diffraction of short electromagnetic waves by a crystal [M] // Thomson J J. X-ray and neutron diffraction. Amsterdam: Elsevier, 1966: 109-125.
- [19] Zhao L L, Sun D L, Wang L L, et al. Ray-tracing program for grazing incident X-ray microscope system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0401002.
赵玲玲, 孙德林, 王丽丽, 等. 掠入射 X 射线显微镜系统光线追迹程序 [J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0401002.
- [20] Sun A, Shang W L, Yang G H, et al. Study on X-ray line emission diffraction in inertial confinement fusion and its recent progress [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 96-104.

- 孙奥, 尚万里, 杨国洪, 等. 惯性约束聚变 X 射线晶体衍射研究及最新进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(11): 96-104.
- [21] Shi J, Xiao S L, Liu L F, et al. Study of X-ray imaging with toroidally bent crystal[J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2012, 22(4): 27-33.
- [22] Gao Z F, Deng H X, Liu B, et al. Polarization control of Shanghai soft X-ray free-electron laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500015.
- 高张峰, 邓海啸, 刘波, 等. 上海软 X 射线自由电子激光装置的偏振控制[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500015.
- [23] Zheng W G, Li P, Zhang R, et al. Progress on laser precise control for high power laser facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(1): 9-22.
- 郑万国, 李平, 张锐, 等. 高功率激光装置光束精密调控性能研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(1): 9-22.
- [24] Zhao Z T, Wang D, Yin L X, et al. Shanghai soft X-ray free-electron laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100004.
- 赵振堂, 王东, 殷立新, 等. 上海软 X 射线自由电子激光装置[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100004.

High-Resolution Focusing Diagnosis Technology on Ti-Target X-Ray Diffraction Using Toroidal Crystals

Yao Tong¹, Li Miao^{1*}, Shi Jun², Shang Wanli³, Yang Zuhua³, Wang Feng³,
Yang Guohong³, Wei Minxi³, Sun Ao³

¹ College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

² Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

³ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract

Objective Fusion energy based on inertial confinement fusion (ICF) is both efficient and environment friendly. It is necessary for ICF research to diagnose weak X-ray signals by focusing on imaging. Because the crystal has a periodic and regular arrangement of internal atoms and the lattice spacing is close to the order of X-ray wavelength, the X-ray diffraction spectrometer can obtain relevant information about the X-ray source using the crystal as the spectroscopic element; thus, the crystal spectrometer is an important part of the spectrum diagnostic instrument. Several types of crystals that are currently being developed have some issues. Planar crystals, for example, do not have the ability to focus rays. Likewise, the cylindrically bend crystal spectrometers are not suitable for diagnostic experiments using coupled fringe cameras. The application of spherically bend crystals for self-luminous imaging requires Bragg angle close to 90°, limiting the imaging energy spectrum selection range. As a result, the development of a crystal spectrometer for diagnosing X-rays with both strong-focus performance and high-resolution is an urgent need for plasma X-ray diagnosing technology for the current ICF devices with ever-increasing performance. This paper proposes a toroidal quartz crystal that can perform focused imaging on Ti-target X-ray at 4.75 keV. The results of simulations and experiments show that after the Ti-target X-rays are diffracted by the toroidal quartz crystal, they have good imaging focusing performance on the sagittal and meridional planes and can achieve high spatial resolution imaging results.

Methods A quartz crystal with a toroidal structure was proposed in this paper. First, the imaging principles and properties of spherical and toroidal crystals were investigated and analysed. Then, to demonstrate that the toroidal crystal had high-resolution properties, the X-ray diffraction of spherical and toroidal crystals was simulated in this paper using the X-ray diffraction tracing principle. The diffraction results of various crystal structures were compared and analysed while the radiation source and imaging object remained constant. Then, the imaging spatial resolution of spherical and toroidal crystals in the sagittal plane was calculated. In addition, a Ti-target laser device, an IP plate, and a toroidal quartz crystal were used to complete the X-ray backlight imaging experiment. The imaging

results of the toroidal crystal were obtained through actual experiments and the actual resolution was calculated. Finally, the differences between the actual and simulated results were analysed. The related influencing factors were discussed in this paper.

Results and Discussions The toroidal crystal's X-rays have good imaging spatial resolution in the meridional and sagittal planes. The imaging grid's length in both directions is 500 μm , which meets the imaging magnification relationship, and the shape of the imaging grid has almost no deformation [Fig. 4(b)]. The toroidal crystal has a spatial resolution of approximately 5 μm in the meridional and sagittal planes [Fig. 5(b) and Fig. 5(d)]. The simulation of focusing imaging on spherical and toroidal crystals indicates that the circular spot can be better focused and imaged after being diffracted from the toroidal crystal. The size of the imaging spot is roughly equal to the size of the original source. In addition, the sizes of the imaging spots on the meridional and sagittal planes are nearly equal (Fig. 6). From the simulation of the focused imaging of the source, it can be concluded that the toroidal quartz crystal proposed in this paper has strong-focus characteristics and can effectively focus the source, thereby improving the intensity of rays, which is useful for subsequent data processing and analysis. The actual experiment of diffraction focusing imaging on a Ti-target laser device with a pulse width of 920 ps and energy of 1137.34 J can achieve the resolution of 10 μm .

Conclusions We propose a toroidal quartz crystal and conduct a simulation study based on X-ray diffraction tracing using a toroidal crystal and a spherical crystal of the same material under the same conditions. The focused imaging image of X-rays diffracted by toroidal crystals has a high spatial resolution in the meridional and sagittal planes, as determined by comparing and analysing the imaging results of X-rays diffracted by two crystals of different structures. Metal grids in both planes can be clearly distinguished, and the imaged metal grids show almost no deformation. The imaging result data is used to calculate the simulated imaging spatial resolution, which is approximately 5 μm . The Ti-target laser device is used as the source in the experiment to test the effect of diffraction imaging of the quartz crystal's toroidal structure. The backlight imaging experiment yields a focused imaging image with a magnification of five on both the meridional and sagittal planes. The spatial resolution of X-ray diffraction imaging of toroidal quartz crystal is estimated to be 10 μm . The imaging spatial resolution obtained by the simulation and imaging spatial resolution measured by the experiment differs slightly. The difference depends on the actual source's size, geometric aberrations, and crystal defects. In future, we intend to discuss the aforementioned factors that influence resolution. In conclusion, the quartz crystal with the toroidal structure proposed in this paper has the ability of strong-focus and high-resolution, which can meet the requirements for the spectral diagnosis of high energy density plasma.

Key words materials; toroidal quartz crystal; X-ray diffraction; focusing; imaging spatial resolution

OCIS codes 340.7440; 230.5298; 260.1180