

$K\alpha$ 射线源半影成像研究*

王 剑^{1)†} 赵宗清¹⁾ 蔡达锋²⁾ 黄文忠¹⁾ 何颖玲¹⁾ 谷渝秋^{1)†}

1) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) 内江师范学院物理与电子信息工程学院, 内江 641112)

(2008 年 9 月 2 日收到, 2009 年 1 月 8 日收到修改稿)

在 SILEX-1 激光装置上, 采用半影成像技术对超短超强激光与纳米靶作用产生的 $K\alpha$ 源进行了空间二维成像, 获得了分辨率为 $10\ \mu\text{m}$ 左右的图像. 与国外的结果相比, 在较小能量激光器上高质量地实现了铜 $K\alpha$ 源空间二维半影成像. 实验表明, 半影成像能得到详细的 $K\alpha$ 源空间分布的细节信息, 优于刀边成像等一维成像技术.

关键词: $K\alpha$ 源, 半影成像, 纳米靶

PACC: 5270L, 2925

1. 引 言

超短超强激光与固体靶相互作用通常用来产生高能电子及质子^[1]. 在靶表面所产生的超热电子在靶内部冷材料中传播时, 将会产生短脉冲形式的特征 $K\alpha$ 辐射, 大量超热电子激发 $K\alpha$ 辐射可以形成一个 $K\alpha$ 辐射源. 这种新型短脉冲形式 $K\alpha$ 源在时间分辨 X 光衍射照相等方面具有广阔的应用前景, 已经成为科学家们的热点研究领域^[2-4]. 国内外做了大量有关 $K\alpha$ 射线源产生的实验, 不过大部分都是在皮秒装置上完成, 与我们实验条件相似的亚皮秒 $K\alpha$ 源实验还不多^[5, 6], 有必要进行这方面的探索.

目前广泛用于测量 $K\alpha$ 源空间尺寸的方法有刀边成像、半影成像、小孔阵列成像、球面弯晶谱仪等. 刀边成像技术利用 $K\alpha$ 射线在刀边形成的阴影来测量 $K\alpha$ 源的空间尺寸^[7]. 在该技术中, 对平行于刀边的 $K\alpha$ 强度进行空间积分. 由于是一维成像, 只能大概估计源的半高全宽. 小孔成像是另一种常用的方法, 但是实验中我们发现在目前的条件下 $K\alpha$ 源的强度比较弱且源的尺度比较小, 约为几十微米. 在不考虑衍射效应的情况下, 减小针孔的大小可以提高系统的空间分辨, 但针孔的大小也不能无限小, 针孔太小一方面减少了通过针孔的光强度, 并且越小的针孔引起的衍射效应越大, 从而也降低了分辨率, 对

实验中的 $K\alpha$ 源不能有效成像. 国外许多实验室已经使用球面弯晶谱仪来进行成像^[4, 5], 获得了分辨率较高的图像. 目前国内此方面研究仍在发展之中, 相比之下, 半影成像技术能够很好地满足需求.

本文介绍的是在超短超强激光脉冲产生 $K\alpha$ 源的实验中, 利用半影成像技术获得了较高质量的源图像.

2. 半影成像原理

半影成像的原理如图 1 所示. 利用光线的直线传播原理, 未知物体通过半影孔投影在接收平面(探测器)上形成编码像. 该编码像由中央部分的亮区以及环绕在亮区边缘的阴影部分组成, 其中物体的信息只包含在阴影区内. 源的亮度分布 $o(x, y)$ 通过半影孔点扩散函数 $h(x, y)$ 之后, 像的亮度分布 $i(x, y)$ 为

$$i(x, y) = o(x, y) * * h(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

其中, $* *$ 代表二维卷积, $n(x, y)$ 为干扰噪声.

3. 图像重建

3.1. 点源扩展函数(PSF)

要获得源的分布, 我们必须知道半影孔的点源

* 高温高密度等离子体国家重点实验室基金(批准号: 9140C6801020801)和中国工程物理研究院重大基金(批准号: 2006Z0202)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yqgu@sina.com

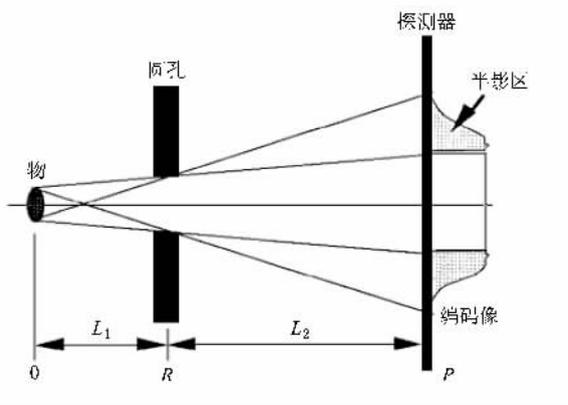


图 1 半影成像原理图

扩散函数 $h(x, y)$ 然后根据各种图像重构算法, 例如维纳滤波、中值滤波、Richardson-Lucy (RL) 方法^[8]、模拟退火法^[9]等方法来复原得到射线源的图像。由于半影孔是个圆孔, 这个圆孔的点源扩散函数可以用圆柱来近似^[10],

$$\alpha(r) = \alpha(x, y) = \begin{cases} 0 & (|r| > R), \\ 1/2R & (|r| \leq R), \end{cases} \quad (2)$$

其中 r 是半影孔的半径, R 是圆柱的半径, $R = r(1 + M)$, M 为成像系统的放大倍数。

3.2. 图像重建算法

由编码像经过图像反演得到源的亮度分布。先分别对 $i(x, y)$, $h(x, y)$ 和 $n(x, y)$ 做傅里叶变换得到其频域分布 $i(k_x, k_y)$, $h(k_x, k_y)$ 和 $n(k_x, k_y)$,

相应地, 有

$$\tilde{i}(k_x, k_y) = h(k_x, k_y) \cdot \alpha(k_x, k_y) + n(k_x, k_y). \quad (3)$$

通过一定的图像反演算法, 就可以得到 $\alpha(k_x, k_y)$, 再进行逆傅里叶变换便可以得到源强度的二维空间分布。

在本次实验的数据处理中, 主要考虑维纳滤波算法。维纳滤波^[11]就是寻找传输函数为 $h_w(k_x, k_y)$ 的滤波器, 使得恢复出的目标估计值 $o_w(x, y)$ 与真实的 $\alpha(x, y)$ 的均方差达到最小, 即

$$[o_w(x, y) - \alpha(x, y)]^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

经过推导, 可得

$$h_w(k_x, k_y) = \frac{h^*(k_x, k_y)}{|h(k_x, k_y)|^2 + s_n(k_x, k_y) / s_o(k_x, k_y)}, \quad (5)$$

其中 $h^*(k_x, k_y)$ 为编码孔成像系统的传递函数的复共轭, $s_o(k_x, k_y)$ 和 $s_n(k_x, k_y)$ 分别是靶图像和噪声的功率谱密度。

为了对上述过程进行验证, 用 Matlab 编写了数值实验程序。图 2(a) 是采用数值模拟方法对字母 E 成的像, 只要找到合适的点源扩展函数 (PSF), 即 (2) 式中的 R , 便可以对半影编码像进行重建复原, 重建效果如图 2(b) 所示。数值实验表明, 用半影成像方法对物体进行成像并且结合维纳滤波算法, 可以完整地 对 $K\alpha$ 源进行成像以及得到源的空间分布信息。

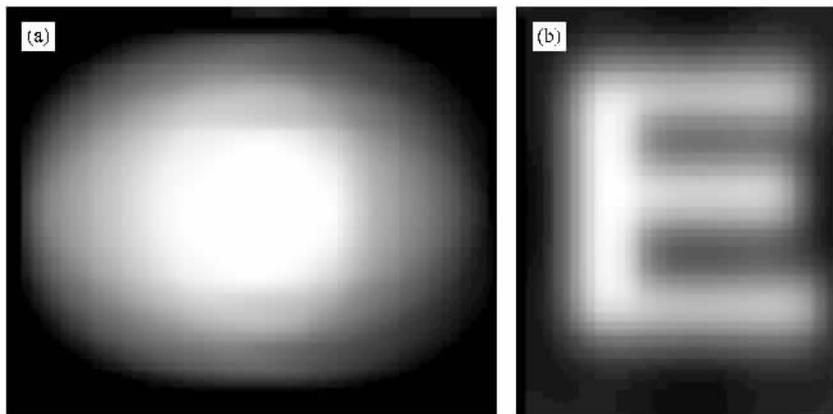


图 2 半影成像及图像重建过程 (a) 编码像, (b) 复原像

4. 实验设置

实验在中国工程物理研究院激光聚变中心

SILEX-I 掺钛蓝宝石飞秒激光器上进行。该系统采用脉冲啁啾放大技术 (CPA), 最大稳定输出能量为 6 J, 脉冲宽度可调, 本实验中为 31 fs, 中心波长为 800 nm。实验布局如图 3 所示, p 极化主激光入射进入靶

室后,经过 F/3 离轴抛物面镜聚焦在固体靶上(见图 4)。为了避免靶后方向冲击波带来的靶碎片对成像系统的 X 射线 CCD 造成破坏, K_{α} X 射线成像系统安装在与水平面夹角 23.7° , 其在水平面的投影与入射激光夹角 37° 的斜上方法兰上, 其放大倍数 M 等于 10。半影孔直径为 $800 \mu\text{m}$, Ta 材料基底上用激光打孔机打孔制成。另外在半影孔前我们还采用了厚度为 $200 \mu\text{m}$ 的 Be 滤片对靶碎片进行防护并保持真空。从靶后出来的射线能谱有一定的范围, 我们在成像系统前面加上 $10 \mu\text{m}$ 的 Cu, 利用 Cu 的吸收边来选择 8.054 keV 的单色 K_{α} 射线。

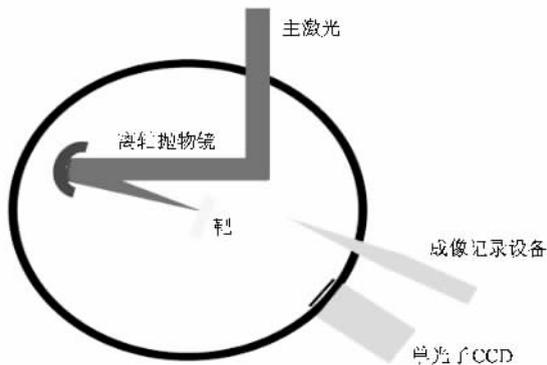


图 3 实验布局简图

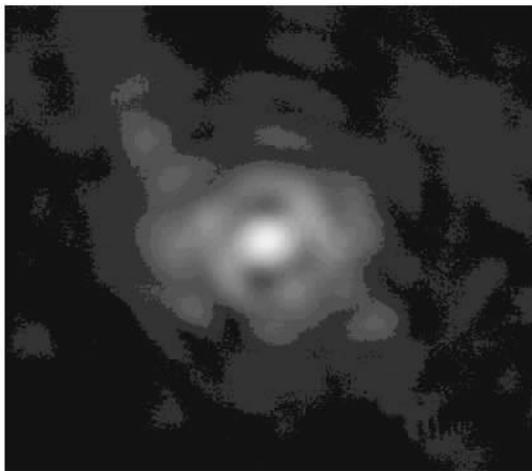


图 4 激光光学焦斑

5. 典型实验结果与分析

Kulcsár 等^[12]的实验表明,金属靶表面纳米结构、微结构光栅凹槽等的特殊构造比单纯的固体靶更能有效吸收激光能量,从而可以大大提高 X 光的

产生效率。他们主要考虑 XUV 和软 X 射线,实验结果显示比固体靶高 50 倍的产额。为了获得更高亮度的 K_{α} 射线源,考虑在实验中主要采用纳米靶。图 5 为扫描电子显微镜下的纳米靶,在 $5 \mu\text{m}$ 厚的 Cu 箔上,由直径为 20 nm 的 Cu 纤维组成了一层类似天鹅绒的结构。入射激光与靶法线的夹角为 10° ,图 4 中激光焦斑半高全宽 (FWHM) 为 $17 \mu\text{m}$ 。图 6 (b) 是在实验中获得的一个典型结果,其对应的激光能量为 3.39 J 。将该结果使用维纳滤波方法重建还原图像,得到了图 6 (a) K_{α} 源的二维图像。图 7 是 Gauss 拟合的 K_{α} 源近似尺寸。从图 6 中可以看出,超短强激光脉冲和靶产生的 K_{α} 源尺寸大约为 $100 \mu\text{m}$, 远比激光焦斑大。国外有实验表明, K_{α} 源尺度通常是激光焦斑的 3—10 倍^[4]。在国内所做的类似实验中^[7],报道 K_{α} 源的半高全宽为 $48 \mu\text{m}$, 为激光焦斑的 5 倍左右,与本文报道的结果较相似。主激光脉冲与靶产生的超热电子在靶内输运过程中,电子束的横向扩散是导致 K_{α} 源尺度远大于激光焦斑的主要原因。此外还有一个合理的解释就是,主激光脉冲焦斑附近存在着一个晕区,在晕区内激光功率密度要低大约一个数量级,但还是能产生一定数量的超热电子,这部分超热电子对 K_{α} 源尺度大于激光焦斑也有贡献。 K_{α} 源中心部分亮度较强,边缘部分稍弱,且呈椭圆形(见图 6)。电子束在传输过程中已经破裂,但是没有形成 Taguchi 等^[13]通过数值模拟发现的环状结构。目前关于这种分裂的解释还不一致,主要的观点是认为与在靶前产生的超热电子束在靶内传输时,超热电子束流的成丝不稳定性有关。Gremillet 等^[14]利用三维混合 PIC (particle-in-cell) 模拟程序模拟了 0.5 MeV 的电子束进入 Si 靶中的输运过程,程序中同时考虑了碰撞效应和电磁场。模拟中也出现了成丝现象并且给出了超热电子温度分布随传输距

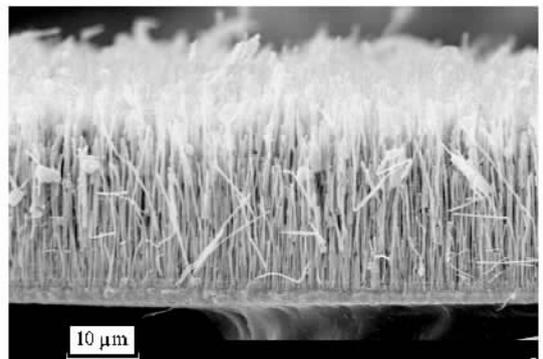
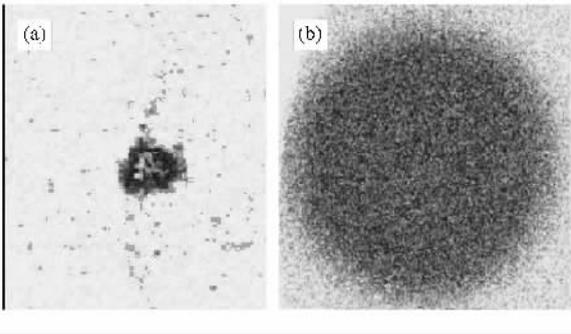
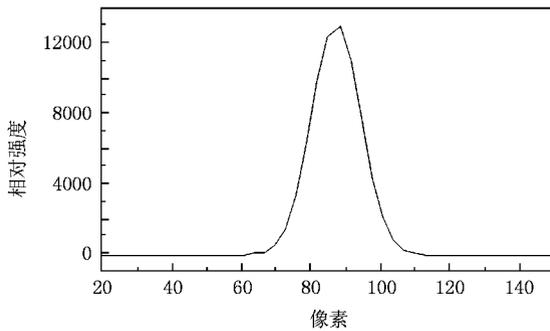


图 5 扫描电子显微镜下的纳米靶

图 6 $K\alpha$ 源半影成像复原像(a)和编码像(b)图 7 拟合的 $K\alpha$ 源的尺寸

离的演化过程.随着电子束在靶内传输距离的增加,

成丝不稳定性开始发展,逐步分裂成丝,而后又在自生磁场的作用下合并成较大的丝.我们认为除了成丝不稳定性外,还存在另外一种可能:靶表面的纳米直径的纤维丝具有“波导”作用,使得在电流形成之初就是丝状的电流,丝状的电流进一步在衬底内传输时受到自生磁场的作用,合并形成观察到的大的电流丝.半影成像结果从图 7 上看空间分辨率在 $10\ \mu\text{m}$ 左右.半影成像比刀边成像等一维方法提供了更多的源区分布细节,有助于我们更深入地分析其中的现象,为 $K\alpha$ 源应用提供条件.

6. 结 论

与国外的结果相比^[4],本实验使用半影成像方法,在较小能量激光器上高质量地实现了铜 $K\alpha$ 源空间半影成像.空间分辨率为 $10\ \mu\text{m}$ 左右,不仅可以获得一维刀边成像所能得到 $K\alpha$ 源的尺寸,还能得到我们所感兴趣的 $K\alpha$ 源的形状和结构等分布细节. $K\alpha$ 源尺度远大于激光焦斑,中心亮度高,边缘较暗淡,光斑破裂成几个部分.这些细节是未来短脉冲形式 $K\alpha$ 源的应用以及与之相关的快点火等研究所需要的.

[1] Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J, Yang X D, Wen T S, Chunyun S T 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 575 (in Chinese) 蔡达锋、谷渝秋、郑志坚、杨向东、温天舒、淳于书泰 2003 强激光与粒子束 **15** 575]

[2] Riley D, Angulo-Gareta J J, Khattak F Y, Lamb M J, Foster P S, Divall E J, Hooker C J, Langley A J, Clarke R J, Neely D 2005 *Phys. Rev. E* **71** 016406

[3] Ziener Ch, Uschmann I, Stobrawa G, Reich Ch, Gibbon P, Feurer T, Morak A, Düsterer S, Schwoerer H, Förster E, Sauerbrey R 2002 *Phys. Rev. E* **65** 066411

[4] Koch J A, Aglitskiy Y, Brown C, Cowan T, Freeman R, Hatchett S, Holland G, Key M, MacKinnon A, Seely J, Snavely R, Stephens R 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 2130

[5] King J A, Akli K, Zhang B 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 191501

[6] Boschetto D, Mourou G, Rousse A, Mordovanakis A, Hou B X, Nees J, Kumah D, Clarke R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 011106

[7] Xu M H, Chen L M, Li Y T, Yuan X H, Liu Y Q, Nakajima K, Tajima T, Wang Z H, Wei Z Y, Zhao W, Zhang J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 353 (in Chinese) [徐妙华、陈黎明、李玉同、远晓辉、刘运全、Nakajima K, Tajima T, 王兆华、魏志义、赵卫、张

杰 2007 物理学报 **56** 353]

[8] Zhao Z Q, Ding Y K, Dong J J, Dong J J, Hao Y D, Wu S C, Cao L F, Pu Y K 2007 *Plasma Phys. Control. Fusion* **49** 1145

[9] Nozaki S, Chen Y W, Nakao Z, Kodama R, Shiraga H 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 2240

[10] Chen Y W, Otsuki, K Nakao Z 1998 *Rev. Sci. Instrum.* **69** 1966

[11] Seeking-truth Science&Technology 2006 *Visual C++ Digital Image Classical Dealing Algorithm and Realization* (Beijing: People Post & Telecom. Press) pp576—578 (in Chinese) [求是科技 2006 Visual C++ 数字图像处理典型算法及实现(北京:人民邮电出版社)第 576—578 页]

[12] Kulcsár G, AlMawlawi D, Budnik F W, Herman P R, Moskovits M, Zhao L L, Marjoribanks R S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5149

[13] Taguchi T, Antonsen Jr T M, Liu C S, Mima K 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5055

[14] Gremillet L, Amiranoff F, Baton S D, Gauthier J, Koenig M, Martinolli E, Pisani F, Bonnaud G, Lebourg C, Rousseaux C, Toupin C, Antonicci A, Batani D, Bernardinello A, Hall T, Scott D, Norreys P, Bandulet H, Pépin H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 5015

Penumbra imaging of $K\alpha$ radiation source^{*}

Wang Jian^{1,2)} Zhao Zong-Qing¹⁾ Cai Da-Feng²⁾ Huang Wen-Zhong¹⁾ He Ying-Ling¹⁾ Gu Yu-Qiu¹⁾†

¹ *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

² *Department of Physics and Electronic Information Engineering, Neijiang Normal College, Neijiang 641112, China*

(Received 2 September 2008; revised manuscript received 8 January 2009)

Abstract

At the SILEX- I laser facility, penumbral imaging technique was used to record a $K\alpha$ source in two dimensions. Due to the fact that the source was produced via the interaction between ultrashort-ultraintensity laser and 'Velvet' target, we can obtain high quality $K\alpha$ source images. More details about the source spatial distributions can be deduced from the two-dimensional imaging than that from the one-dimensional imaging such as knife edge imaging.

Keywords: $K\alpha$ source, penumbral imaging, nanostructure target

PACC: 5270L, 2925

^{*} Project supported by the Foundation of the State Key Laboratory for High-Temperature and High-Density Plasma Physics, China (Grant No. 9140C6801020801) and the Key Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2006Z0202).

† Corresponding author. E-mail: yqgu@sina.com